Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio, sviluppo e definizione di linee guida per interventi di miglioramento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio e per la gestione efficiente del sistema edificio-impianto

M. Morandotti, D. Besana, M. Pia Riccardi, B. Messiga, V. Cinieri, E. Basso, M. Malagodi, V. Guidetti, R. Avagliano, M. Grandi, S. Olivero, F.Stirano, D. Donfrancesco, R. Sabbatelli

Report RdS/2011/63

STUDIO, SVILUPPO E DEFINIZIONE DI LINEE GUIDA PER INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO PER L'EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI DI PREGIO E PER LA GESTIONE EFFICIENTE DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

M. Morandotti (coordinatore), D. Besana, M. Pia Riccardi, B. Messiga,. V.Cinieri, E.Basso, M. Malagodi (Università di Pavia Centro Interdisciplinare di Studi e Ricerche per la Conservazione dei Beni Culturali (CISRiC)

V.Guidetti, R.Avagliano, M. Grandi (Arkedos – soluzioni per il patrimonio culturale)

S. Oliviero, F. Stirano, D. Donfrancesco, R. Sabbatelli (SITI – Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica
Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Responsabile Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

INDICE

1. Contesto della ricerca

1.1 Contenuti e Obiettivi

- Soggetti coinvolti, compiti e azioni

1.2 Il Caso di studio

- La Villa Reale di Monza: brevi note storiche .
- Elementi architettonici e oggetti di valore storico-culturale

1.3 Ipotesi di riuso della Villa

- l'Ala Sud

1.4 Riferimenti normativi

- Vincoli sugli edifici storici
- Requisiti prestazionali per edifici con finalità espositive

2. Linea 1

2.1 Protocolli integrati di monitoraggio, rilievo e diagnostica dello stato di conservazione

- Protocollo di monitoraggio
- Protocollo di rilievo
- Protocollo di diagnostica dello stato di conservazione

2.2 Linee guida per la correlazione dello stato di degrado con le condizioni ambientali interne

- Introduzione: una normativa per la standardizzazione
- Codici etici e deontologici
- Standard legislativi
- La normativa

2.3 Applicazione ai casi di studio individuati

- Monitoraggio microclimatico interno finalizzato alla determinazione delle condizioni ambientali d esercizio
- Azioni di diagnostica non invasiva e micro-invasiva finalizzate alla caratterizzazione materica del manufatto; determinazione dello stato di conservazione; correlazione dello stato di degrado con le condizioni ambientali rilevate
- Analisi dello stato di degrado di alcuni manufatti lignei della Villa Reale di Monza – Ala Sud: possibili correlazioni con le condizioni di conservazione

3. Linea 2

3.1 Impostazione metodologica della ricerca

3.2 Assessment prestazionale della fabbrica

- Morfologia e caratteri distributivi
- Materiali dell'involucro e comportamento energetico attuale dell'edificio
- Ulteriori elementi di conoscenza

3.3 Valutazione dell'impatto prestazionale

- Soluzioni tecnologiche orientate all'efficienza energetica
- Obiettivi della sostenibilità e classi di esigenza
- Matrice di correlazione tra le categorie d'intervento e le classi di esigenza
- Valutazione prestazionale delle tecnologie per l'efficientamento dell'involucro

3.4 Assessment funzionale

- Lettura metaprogettuale: il concetto di qualità
- Definizione delle esigenze ai fini della conservazione
- Condizioni di benessere indoor per l'utenza
- Congruenza tra esigenze di conservazione di benessere

3.5 Azioni progettuali

- Possibilità d'intervento sulle chiusure verticali
- Azioni d'intervento sulle chiusure inclinate
- Schede esemplificative di progetto

3.6 Conclusioni

- Prospettive di sviluppo della ricerca

3.7 Bibliografia e sitografia

4. Linea 3

4.1 Definizione di requisiti

- Introduzione
- Definizione di requisiti
- Struttura e impianti dell'Ala Sud

4.2 Sistema di indicatori

- Definizione indicatori
- Qualità ambientale
- Safety
- Gestione dell'edificio

4.3 Comportamento termico dell'edificio

- Edifici storici e riqualificazione energetica
- Simulazione del comportamento termico degli edifici
- Indicatori relativi all'efficienza energetica

4.4 Caratterizzazione ambientale

- Definizione delle modalità di monitoraggio
- Supporto alla creazione di modelli per l'analisi del comportamento termico degli ambienti

della Villa Reale monitorati

- Valutazione dei livelli prestazionali del primo piano dell’Ala Sud della Villa Reale di Monza

4.5 Linee guida per la stesura di capitolati tecnici

- Struttura di un capitolato
- Requisiti tecnici

1. CONTESTO DELLA RICERCA

STUDIO, SVILUPPO E DEFINIZIONE DI LINEE GUIDA PER INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO PER L'EFFICIENZA ENERGETICA NEGLI EDIFICI DI PREGIO E PER LA GESTIONE EFFICIENTE DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

Gruppo di lavoro

Università di Pavia

Centro Interdisciplinare di Studi e Ricerche per la Conservazione dei Beni Culturali (CISRIC)

Laboratorio di Scienza e Tecnica per l'Edilizia e la Progettazione (STEP)

Dipartimento di Ingegneria Edile e del Territorio

Prof. Marco Morandotti (coordinatore)

Prof.sa Daniela Besana

Ing. Valentina Cinieri

Laboratorio di Scienza dei Materiali Antichi (ARKADAE) – Dipartimento di Scienze della Terra

Prof.sa Maria Pia Riccardi

Laboratorio Arvedi – Dipartimento di Scienze della Terra

Prof.sa Maria Pia Riccardi

Prof. Bruno Messiga

Dott.sa Elena Basso

Dott. Marco Malagodi

Arkedos – soluzioni per il patrimonio culturale

Dott.sa Viviana Guidetti

Dott.sa Rosaria Avagliano

Dott. Marco Grandi

SITI – Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione

Ing. Sergio Olivero

Ing. Federico Stirano

Ing. Diego Donfrancesco

Dott.sa Roberta Sabbatelli

La ricerca si inserisce all'interno di un Accordo di Programma stipulato nell'agosto 2010 tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA in base al quale è concesso il contributo finanziario

per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

L'ambito è ascrivibile all'Area "Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica", tematica di ricerca "Risparmio di energia elettrica nel settore civile"; nello specifico, all'obiettivo "Efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica" ed all'obiettivo del progetto "Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile".

In particolare i temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e l'Università di Pavia CISRiC riguardano la definizione di linee guida per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici di pregio e per una loro efficiente gestione del sistema edificio-impianto, propedeutiche per la redazione di un piano di intervento finalizzato alla riduzione dei consumi.

Tale rapporto di collaborazione e di ricerca inoltre si inserisce all'interno delle attuali politiche in termini di conservazione e valorizzazione del patrimonio architettonico-culturale già ben espressi all'interno del Codice dei Beni Culturali (D.Lgs 42/2004) che, in particolare all'art.29, comma 5, afferma:

"il Ministero definisce, anche con il concorso delle regioni e con la collaborazione delle Università e degli Istituti di Ricerca competenti, linee di indirizzo, norme tecniche, criteri e modelli di intervento in materia di conservazione dei beni culturali";

1.1 CONTENUTI E OBIETTIVI

Lo scenario intorno al quale si inserisce la presente ricerca discende da una precisa e nel contempo complessa problematica relativa alla definizione di soluzioni consapevoli e rispettose dell'esistente ai fini di un necessario controllo dell'efficienza energetica di edifici di elevato valore storico, artistico e culturale.

Se da un lato infatti la problematica del controllo energetico risulta di primaria importanza non solo nel contesto del dibattito per lo sfruttamento consapevole dell'ambiente, ma anche ai fini di una reale sostenibilità economica e ambientale dei processi di gestione di tali manufatti, dall'altro la complessa stratificazione storica e architettonica di cui sono testimoni deve essere salvaguardata, rispettata e valorizzata al fini di non snaturare la natura della fabbrica.

Riuso, conservazione e valorizzazione del patrimonio storico devono progressivamente essere integrati con l'esigenza di una sempre più efficiente gestione energetica, che deve essere sviluppata secondo approcci e metodi ovviamente compatibili con le stesse esigenze di conservazione e tutela.

Proprio in relazione al tema della valorizzazione, il Codice dei Beni Culturali, in particolare all'articolo 114 definisce il concetto di qualità della valorizzazione affermando:

"1. Il Ministero, le Regioni e gli altri enti pubblici territoriali, anche con il concorso delle Università, fissano i livelli minimi uniformi di qualità delle attività di valorizzazione su beni di pertinenza pubblica e ne curano l'aggiornamento periodico.

2. I livelli di cui al comma 1 sono adottati con decreto del Ministro previa intesa in sede di Conferenza unificata.

3. I soggetti che, ai sensi dell'articolo 115, hanno la gestione delle attività di valorizzazione sono tenuti ad assicurare il rispetto dei livelli adottati."

Obiettivo generale della ricerca è la definizione di linee guida che si prefiggono l'obiettivo di fornire suggerimenti e indicazioni per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici e per una efficiente gestione del sistema edificio-impianti propedeutiche alla redazione di un piano di intervento finalizzato alla riduzione dei consumi. La ricerca assume quale scenario di verifica sperimentale il complesso della Villa Reale e del Parco di Monza, in ragione della sua eccezionale rilevanza e della grande complessità, che ne fanno un territorio ideale di sperimentazione, ma in una logica di ulteriore esportabilità operativa.

In questo contesto strategico, le competenze pluridisciplinari offerte dal CISRiC possono garantire un supporto scientifico su alcune linee complementari e integrate, funzionali al perseguimento degli obiettivi della ricerca:

1. supporto alla caratterizzazione microclimatica interna degli spazi confinati, in relazione alle dinamiche di degrado delle apparecchiature costruttive e degli eventuali beni mobili contenuti;
2. supporto alla individuazione di soluzioni tecnologiche e costruttive per l'integrazione in edifici di pregio storico – architettonico di sistemi e soluzioni orientate all'efficienza energetica e allo sfruttamento di fonti rinnovabili.
3. supporto alla definizione di un sistema di indicatori in grado di valutare lo stato dell'edificio secondo entrambe le dimensioni del problema: efficienza energetica e qualità dell'ambiente interno. In questo modo sarà possibile condurre un'analisi dello stato dell'edificio per la definizione dei requisiti da inserire all'interno dei capitolati di gara d'appalto riguardanti lavori di ristrutturazione e/o miglioramento di un edificio di pregio.

In particolare ad ogni singola azione sono state a sua volta previste delle azioni a cui faranno capo differenti specialisti. In particolare alla linea 1 ci si riferirà prevalentemente ai risultati degli studi effettuati dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia, in stretta collaborazione con il Laboratorio Arvedi e lo spin-off Arkedos; alla linea 2 convergeranno le competenze specifiche del Dipartimento di Ingegneria Edile e del Territorio dell'Università di Pavia, in particolare il Laboratorio di Scienza e Tecnica per l'Edilizia e la Progettazione (STEP) e infine, relativamente alla linea 3, si concentreranno gli studi condotti dall'Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione di Torino.

LINEA 1: supporto alla caratterizzazione microclimatica interna degli spazi confinati, in relazione alle dinamiche di degrado delle apparecchiature costruttive e degli eventuali beni mobili contenuti:

1.1 protocolli integrati di monitoraggio, rilievo e diagnostica dello stato di conservazione

1.2 linee guida per la eventuale correlazione dello stato di degrado con le condizioni ambientali interne

1.3 applicazione ai casi di studio individuati

- 1.3.1 monitoraggio microclimatico interno finalizzato alla determinazione delle condizioni ambientali di esercizio
- 1.3.2 azioni di diagnostica non invasiva e micro-invasiva finalizzate alla caratterizzazione materica del manufatto
- 1.3.3 determinazione dello stato di conservazione
- 1.3.4 correlazione dello stato di degrado con le condizioni ambientali rilevate

LINEA 2: supporto alla individuazione di soluzioni tecnologiche e costruttive per l'integrazione in edifici di pregio storico – architettonico di sistemi e soluzioni orientate all'efficienza energetica e allo sfruttamento di fonti rinnovabili:

2.1 linee guida per modalità di integrazione di soluzioni tecnologiche orientate all'efficienza energetica e all'uso di fonti rinnovabili con apparecchiature costruttive storiche

2.2 applicazione ai casi di studio individuati

- 2.2.1 determinazione della consistenza materica e tecnologica dell'apparecchiatura costruttiva
- 2.2.2 determinazione dell'impatto delle soluzioni tecnologiche previste sul manufatto

LINEA 3: supporto alla definizione di un sistema di indicatori in grado di valutare lo stato dell'edificio secondo entrambe le dimensioni del problema: efficienza energetica e qualità dell'ambiente interno. In questo modo sarà possibile condurre un'analisi dello stato dell'edificio

per la definizione dei requisiti da inserire all'interno dei capitolati di gara d'appalto riguardanti lavori di ristrutturazione e/o miglioramento di un edificio di pregio:

3.1 Definizione dei requisiti

- 3.1.1 Identificazione tipologia e caratteristiche dell'edificio
- 3.1.2 Valutazione delle modalità di impiego dell'edificio
- 3.1.3 Studio delle normative vigenti
- 3.1.4 Analisi dei requisiti di efficienza energetica

3.2 Definizione del sistema di indicatori sulla base dei requisiti definiti nel punto 1

- 3.2.1 Definizione di indicatori prestazionali
- 3.2.2 Identificazione dei livelli qualitativi per gli indicatori definiti all'interno del punto 2.1

3.3 Integrazione del sistema indicatori (definito nel punto 2) con il sistema di efficienza energetica

3.4 Caratterizzazione ambientale della Villa Reale di Monza sulla base del sistema di indicatori definito

- 3.4.1 Supporto all'identificazione dei punti di raccolta dati per il monitoraggio microclimatico
- 3.4.2 Caratterizzazione microclimatica degli ambienti della Villa Reale sulla base dei dati raccolti tramite monitoraggio
- 3.4.3 Supporto alla creazione di modelli per l'analisi energetica degli ambienti della Villa Reale monitorati
- 3.4.4 Valutazione dei livelli qualitativi per gli indicatori definiti all'interno del punto 2
- 3.4.5 Validazione del sistema di indicatori

3.5 Identificazione requisiti per stesura gare d'appalto

È chiaro inoltre che la presente schematizzazione risulta funzionale a rispondere in maniera adeguata e complessiva agli obiettivi proposti dalla ricerca. Dal punto di vista metodologico dunque le presenti linee di ricerca sono risultate funzionali alla definizione di azioni consequenziali e specifiche delle diverse competenze coinvolte, nella convinzione che solo un approccio ed una lettura realmente integrata di tutte le competenze multidisciplinari coinvolte possa rispondere in maniera esaustiva agli obiettivi previsti.

1.2 IL CASO DI STUDIO

Lo studio del contesto di sperimentazione risulta di primaria importanza ai fini di una comprensione della specificità del caso ma soprattutto, in relazione all'obiettivo della presente ricerca, risulta essenziale per una valutazione prestazionale del sistema edificio e per la definizione dei requisiti di efficienza energetica.
A tale scopo, nel prosieguo della trattazione, saranno riportate sommariamente alcune note relative alla ricostruzione storica del complesso, ai suoi caratteri morfologici e costitutivi non solo riferite al fabbricato ma anche ai singoli elementi architettonici di cui è composto, agli oggetti

mobili e alle sue differenti finiture di pregio. Parallelamente la campagna conoscitiva si è indirizzata anche allo studio degli impianti ad oggi presenti e alle loro specifiche modalità di impiego.
Le informazioni ottenute permetteranno di individuare e studiare, attraverso il confronto con la normativa vigente, i parametri che influiscono sulla qualità dell'edificio.

- LA VILLA REALE DI MONZA: BREVI NOTE STORICHE

La Villa Reale venne costruita tra il 1777 e il 1780 per volontà dell'imperatrice Maria Teresa d'Austria come residenza estiva per il figlio Ferdinando d'Asburgo, governatore generale della Lombardia.
L'architetto prescelto, il Giuseppe Piermanini, progettò un edificio a "U" , in stile neoclassico, secondo la sobria tradizione tipologica della villa lombarda, ma ispirato al fasto e alla grandiosità della reggia di Caserta, alla cui realizzazione aveva partecipato come allievo del Vanvitelli.
Con l'incoronazione di Napoleone nel 1805, la Villa divenne residenza del figliastro Eugenio di Beauharnais. La caduta di Napoleone riconsegnò la Villa Reale nelle mani degli austriaci, i quali la lasciarono per alcuni anni in uno stato di relativo abbandono, fino a quando nel 1818 non ne prese possesso il viceré del Lombardo-Veneto Giuseppe Ranieri.
Occupato nel 1848 dai militari di Radetzky, tra il 1857 e il 1859 il palazzo ritornò a essere sede di una corte sfarzosa durante il breve soggiorno monzese dell'ultimo rappresentante della casa d'Austria, Massimiliano I d'Asburgo, fratello di Francesco Giuseppe.
Quando il Lombardo-Veneto venne annesso allo Stato del Piemonte, la Villa divenne residenza privilegiata di Umberto I (1844-1900), ritornando al suo ruolo originario di residenza di villeggiatura.
Il sovrano si affidò alla direzione dell'architetto Majnoni per ornarla, restaurarla e migliorarla secondo il gusto dell'epoca. Fu dunque in quegli anni che la Villa subì una radicale trasformazione di molte delle sue parti, in particolare nell'Ala Sud della Villa dove erano ubicate le sale dell'appartamento del Re.
In seguito all'assassinio di Umberto I, il 29 luglio 1900, il nuovo Re Vittorio Emanuele III non volle più utilizzare la Villa Reale, facendola chiudere e trasferendo al Quirinale gran parte degli arredi.
Nel 1934 con Regio Decreto Vittorio Emanuele III fece dono di gran parte della Villa ai Comuni di Monza e di Milano. Ma mantenne ancora la porzione sud con le sale dell'appartamento del padre, Umberto I, costantemente chiusi.
Le vicende dell'immediato dopoguerra della Seconda Guerra Mondiale provocarono occupazioni, ulteriori spoliazioni e decadimento della Villa. Con l'avvento della Repubblica, l'ala sud divenne patrimonio dallo Stato.
Attualmente la Villa è gestita da un Consorzio unico, di cui fanno parte gli enti proprietari della Villa. Dopo un lungo periodo di degrado, dovuto anche al frazionamento delle amministrazioni, nel 2003 sono partiti i lavori di restauro conservativo delle nove sale di rappresentanza del primo Piano Nobile, conclusisi nel 2007 con l'apertura straordinaria al pubblico.
Il 30 luglio 2008 è stato siglato un accordo strategico per Villa Reale e il Parco di Monza, relativo al restauro e alla successiva valorizzazione della Villa Reale e del Parco di Monza.

fig. 1.2.1 – Immagine satellitare del parco della Villa Reale, in cui sono segnalate la posizione della reggia e dell'Ala sud. Fonte Google Earth

- ELEMENTI ARCHITETTONICI E OGGETTI DI VALORE STORICO-CULTURALE

Le sale della Villa presentano soffitti a volta rifiniti con stucchi, in parte dorati come nella sala da letto del re, e dipinti murali al centro della sala delle udienze e della sala d'attesa. Le pareti dell'Ala Sud sono tutte abbellite con tappezzerie in seta originali, ad eccezione del corridoio dove le pareti sono solamente dipinte e la sala biblioteca circondata da arredi lignei. I pavimenti delle stanze risultano in legno intarsiato, alcuni dei quali disegnati da Giuseppe Maggiolini, mentre per il corridoio sono stati impiegati marmi pregiati. Gli ambienti sono inoltre impreziositi da boiserie, camini, porte e lunette lignee decorate e fregi.

In particolare, tra le sale dell'Ala Sud della Villa, è possibile segnalare:

- La camera da letto del Re (fig. 1.2.2) con le colonne scanalate e dorate, le decorazioni sopra la porta, il camino, gli stucchi dorati, la pavimentazione lignea e gli arredi.
- La sala da bagno del Re (fig. 1.2.3) con la vasca, i gradini e le pareti marmoree e con la tappezzeria in seta originale.
- La sala della Biblioteca (fig. 1.2.4) con gli arredi lignei dell'ebanista Giuseppe Maggiolini e il soffitto a volta stuccato.

Per quanto riguarda gli arredi, essi nel 1900 furono trasferiti dai Savoia al Quirinale. L'esigenza ora è di recuperare l'atmosfera originaria degli ambienti attraverso una campagna di ricognizione del patrimonio disperso, di restauro degli arredi e degli oggetti ritrovati e la loro ricollocazione nella Villa.

Ad oggi sono stati riportati in Villa parte degli arredi tra cui alcuni mobili, tavoli, letti e sedie e alcuni altri oggetti in materiali vari ma la fase di recupero è tuttora in corso.

La maggior parte degli arredi e degli oggetti rimarranno permanentemente nella Villa mentre altri sono stati prestati temporaneamente alla Villa per la mostra sulla Regina Margherita che si terrà nell'Ala Sud per un anno a partire da settembre 2011.

fig. 1.2.2 camera del re

fig. 1.2.3 bagno del re

fig. 1.2.4 la biblioteca

fig. 1.2.5 esempi di arredi contenuti nella Villa

1.3 IPOTESI DI RIUSO DELLA VILLA

Come visto, il complesso monumentale della Villa ha subìto nel corso della storia diversi cambiamenti di uso. Si intende oggi restaurare e valorizzare l'intero complesso monumentale destinando i suoi locali a finalità culturali e di alta rappresentanza istituzionale. In particolare i locali della Villa Reale saranno impiegati principalmente a mostre permanenti e temporanee, convegni, uffici di rappresentanza dei ministeri e ad eventi internazionali tra cui l'Expo 2015.

A tal fine il complesso della Villa dovrà essere dotato di spazi espositivi, sale riunioni, uffici, spazi di foresteria e servizi di accoglienza e ristoro. Le funzioni ipotizzate saranno dunque in grado di garantire che gli spazi della Villa Reale siano vissuti ed utilizzati per un ampio arco della giornata, in un'ottica di fruizione e valorizzazione del bene; per contro però, proprio perché beni ed oggetti di elevato valore storico-architettonico risulteranno aperti al pubblico, risulta di primaria importanza definire le aree meno "sensibili" ai cambiamenti, in modo da poterle utilizzare in maniera flessibile per differenti usi.

In particolare al primo piano nobile dell'Ala Sud si prevede di realizzare delle mostre permanenti e temporanee, esponendo al pubblico il patrimonio culturale ed architettonico presente nella Villa o temporaneamente prestato ad essa.

Al fine di garantire la fruibilità dei locali del primo piano dell'Ala Sud da parte dei visitatori, senza compromettere la salvaguardia e la sicurezza del luogo, sarà importante definire le caratteristiche dei locali e i requisiti necessari all'impiego richiesto (cfr. linea di azione 3)

- L'ALA SUD

La ricerca prevede in particolare di testare l'impostazione metodologica sopra descritta in particolare nei locali dell'ala sud della Villa Reale.
Tale porzione del complesso è stata dunque oggetto di sopralluoghi specifici da parte di tutti i soggetti coinvolti , finalizzati al perseguimento dei seguenti obiettivi:

- descrizione dell'impianto geometrico e morfologico (cfr. linea 2)
- studio relativo alla localizzazione ed orientamento del complesso (cfr. linea 1-2-3)
- informazioni di carattere tecnico-costruttivo (cfr. linea 2)
- prelievo di campioni di materiali (cfr. linea 1)
- studio degli impianti ad oggi presenti (cfr. linea 2-3)

Per una trattazione più approfondita si rimanda ai contenuti più specifici dei contributi delle singole unità nei relativi capitoli.

La Villa Reale è caratterizzata da muratura portante in laterizio ed, in particolare, l'ala sud presenta pareti esterne di 70-75 cm circa di spessore e sono, in diversi casi, rivestite sul paramento interno da tappezzerie in seta o velluto. La copertura è caratterizzata da struttura lignea su cui sono disposte lastre ondulate di fibrocemento-amianto, portanti il manto di coppi in laterizio e certamente dovute ad un'opera di ristrutturazione.
I solai sono caratterizzati per lo più da volte di laterizio intonacate e decorate con stucchi barocchi. Le altezze dei locali sono variabili (l'altezza dei locali voltati varia tra 4,10 m e 4,80 m circa).

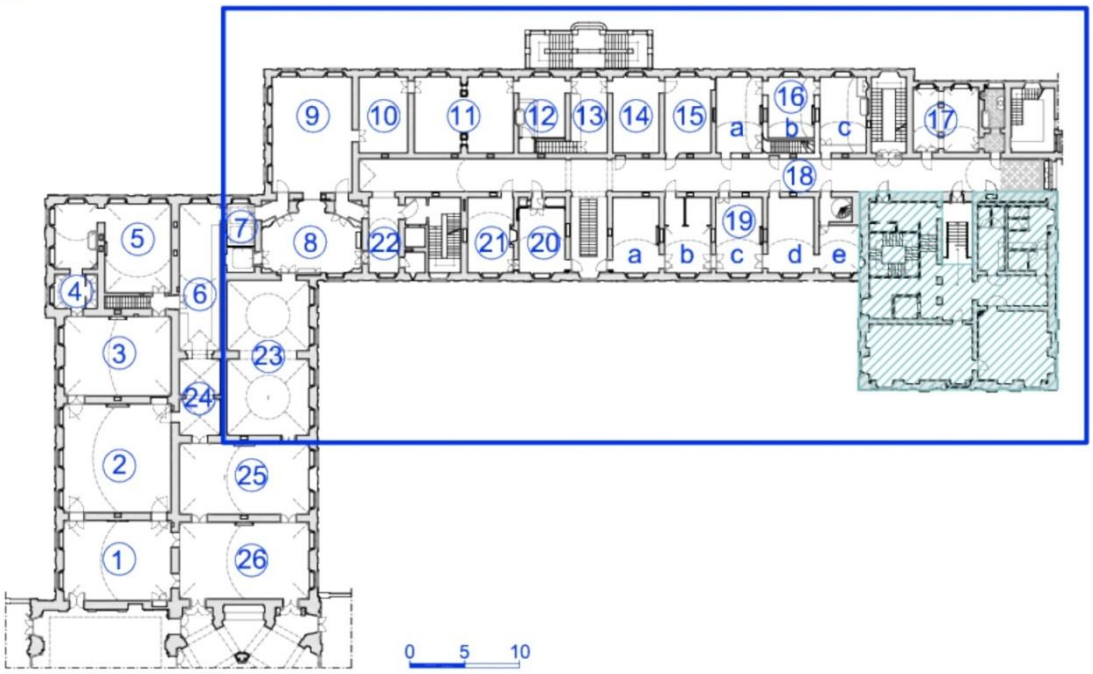
L'ala Sud della Villa Reale di Monza è composta da un piano terreno e due piani nobili intervallati da altrettanti piani ammezzati, impiegati in passato dalla servitù. Al di sopra dell'ultimo livello ammezzato è presente il sottotetto aerato non abitabile (altezza al colmo pari a 3,40 m circa).

In particolare questa ricerca ha preso in considerazione il primo piano nobile di questa ala, poiché in questo il luogo verrà ambientata la mostra sulla regina Margherita e dato che questo piano risulta aver già subito delle operazioni di restauro.
I locali del primo piano nobile ospitavano l'appartamento reale di Umberto I. Queste stanze hanno già subito delle opere di restauro e sono fruibili in occasione di visite guidate.

L'appartamento privato del re è il risultato dell'intervento, operato alla fine dell'800, dall'Architetto di Corte Achille Majnoni d'Intignano, il quale adeguò tutti gli ambienti collocati a destra del Salone Centrale e da sempre destinati a tale funzione, al gusto dell'epoca.
La sala è caratterizzata dalla presenza di tappezzeria moiré rossa moderna, poiché l'originaria tappezzeria di "seta moiré color cremisi" è stata sostituita, al contrario di ciò che è avvenuto in tutti gli altri locali. La volta è caratterizzata da stucchi barocchi e, nel centro, in cornice dorata, è inserito un piccolo affresco raffigurante "Apollo tra le nubi". Il parquet riprende in modo semplificato lo stucco della volta. La boiserie vede presenza di intagli e motivi barocchi.
Sono presenti tre porte, di cui una monumentale con cimasa e fogliami, in cui s'impone un mascherone di gusto seicentesco. Il camino a marmi policromi è in stile seicento, con fondale di mattonelle a fiori. È qui conservato un parascintille in bronzo dorato e traforato stile Luigi XV.
Lo studio conserva la tappezzeria d'epoca di seta a ghirlande di fiori ed una boiserie laccata grigio perla. Porte e sopraporte sono di legno a tono grigio-azzurro, come la volta a stucchi.
La camera da letto del re é divisa in due ambienti da due plinti su cui poggiano una colonna e una semicolonna, addossata ai pilastri, aventi fusti scanalati e decorazioni dorate. La tappezzeria in opera é di seta celeste, riquadrata di gallone doppio di seta crème. La boiserie dello zoccolo si presenta a riquadri dorati, mentre sulle porte, sui due pilastri laterali e sulla trabeazione si inscrivono motivi "rocaille" dorati. Lo stesso si ritrova nei due soffitti, con medaglioni femminili angolari. Nella parte antistante l'alcova, è presente un camino barocco con parascintille in bronzo dorato, Il letto conservato possiede fusto in legno a contorni festonati in stile Luigi XV, con cimasa da capo a conchiglia, dorato, avente imbottitura e coperto in stoffa seta celeste (operata) con ricchi ornati di gallone seta crème a ricamo in stile.
La sala da bagno vede la presenza di una tappezzeria di velluto a fiori, color ocra. Il pavimento e lo zoccolo della parete sono di mattonelle policrome a fiori con inserti di alabastro. La vasca, incassata in una pedana a due scalini, presenta una nicchia a trompe-l'œil d'alabastro. Vi sono, poi, un lavabo monumentale in legno laccato bianco in stile Luigi XV ed un camino barocco con parascintille in bronzo traforato e dorato.
Il guardaroba del re possiede, invece, tappezzeria di damasco cremisi. È qui presente un grande armadio a cinque battenti fisso alla parete, laccato con decorazioni "rocaille", così come le porte e le soprapporte. Le ultime due ante dell'armadio servono da porta di passaggio ad una scaletta interna che scende al piano terreno. La volta è trattata a stucchi.
Infine, l'armeria è rivestita da una tappezzeria simile a quella del guardaroba e della sala da bagno e la volta è trattata con stucchi. In questa stanza sono conservati una grande vetrina a squadra di mogano liscio, a due corpi, per riporre armi e munizioni, ed un grande bancone di mogano a cassetti.
Su questo piano è presente, poi, la sala delle udienze, la quale è anch'essa caratterizzata da tappezzeria di seta, qui di colore rosso. Il pavimento è di legno intarsiato e la boiserie (porte e zoccolo) è di legno con decorazioni dorate.

Gli elementi d'arredo dell'epoca necessitano di essere conservati, in quanto oggetti di valore storico-culturale. Le porte ed i serramenti delle finestre sono di legno.

NAVIGATORE - planimetria primo piano nobile Ala Sud - Villa Reale di Monza



LEGENDA

Area di progetto

Cavallerizza

Sala n.	Denominazione sala	Superficie (m^2)
1	sala della pendola	71
2	salotto della regina	97
3	camera della regina	67
4	bagno della regina	37
5	boudoir della regina	49
6	guardaroba della regina	49
7	disimpegno 2	10
8	sala d'attesa	60
9	sala delle udienze	77
10	studio del re	31
11	camera da letto del re	62
12	bagno del re	29
13	guardaroba del re 1	23
14	guardaroba del re 2	29
15	armeria del re	29
16	appartamento del primo ministro	54
17	camera del gran scudiere	35
18	corridoio disimpegno 1	137
19	appartamento degli ambasciatori	87
20	sala consultazione archivio informatico	28
21	sala consultazione archivio cartaceo	25
22	disimpegno 4	18
23	biblioteca	105
24	disimpegno 3	26
25	sala quadri	76
26	sala del biliardo	82

1.4 RIFERIMENTI NORMATIVI

- VINCOLI SUGLI EDIFICI STORICI

Un edificio, sia esso in costruzione o esistente, deve risultare conforme alla normativa vigente in termini strutturali ed impiantistici. Il rispetto di tali norme in un edificio esistente è più difficile rispetto ad uno di nuova costruzione in quanto ciò comporta modifiche da apportare in un secondo tempo sul costruito.

Gli edifici di elevato interesse culturale sono soggetti al Codice dei Beni Culturali e Paesaggistici, definito tramite il D.Lgs n.42 del 22 gennaio 2004 e successive modifiche, secondo la definizione riportata nell'Art.136 nel quale si definiscono gli immobili di notevole interesse pubblico.

Alcune norme strutturali e impiantistiche per gli edifici prevedono specifici vincoli per quelli ad alto interesse culturale, mentre per altre norme occorre valutare caso per caso la loro applicabilità. Per questi edifici, il Codice richiede che l'esecuzione di opere e lavori di qualunque genere (inclusi demolizioni, modifiche e interventi di restauro) su un edificio storico sottoposto a vincolo di interesse culturale sia subordinata ad autorizzazione del Ministero per i Beni Culturali e Ambientali (Art. 21 e Art.169) e che tali edifici non possano essere adibiti ad usi non compatibili con il loro carattere storico o artistico, o tali da recare pregiudizio alla loro conservazione o integrità (Art. 170).

Un esempio che tiene conto di tali vincoli è la norma sulla certificazione energetica (DLgs 311/2006, e successive modifiche), essa infatti all'art.3, comma 3, prevede che siano esclusi dall'adeguamento normativo e dalla certificazione gli immobili ricadenti nell'articolo 136 comma 1, lett. b) e c) del Codice nel caso in cui il rispetto delle prescrizioni implichino una alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto storico-artistico. Questo non esclude però la possibilità di inserire nell'edificio impianti meccanici, termici, elettrici e/o elettronici per renderli più idonei alle necessità d'uso, o per ottimizzare il comportamento in condizioni di esercizio.

- REQUISITI PRESTAZIONALI PER EDIFICI CON FINALITÀ ESPOSITIVE

Un edificio con finalità espositive deve soddisfare i requisiti di conservazione, gestione e cura delle sue collezioni e nel contempo garantire l'accessibilità in sicurezza del personale e del pubblico. A tale fine l'edificio deve assicurare "la sicurezza ambientale, la sicurezza strutturale, la sicurezza nell'uso, la sicurezza anticrimine e la sicurezza in caso di incendio, considerando i problemi della sicurezza in modo mirato ed integrato" (DM 10 maggio 2001).

Per sicurezza ambientale si intendono le azioni di protezione dell'edificio e del Patrimonio culturale in esso contenuto nei confronti di fattori naturali ed antropici involontari (microclima, inquinamento atmosferico, ecc.). Tra i parametri che possono influire sulla sicurezza ambientale vi sono, infatti, le condizioni termo-igrometriche e di illuminamento, le componenti UV, gli inquinanti chimici aerodispersi, ecc. i cui limiti di tollerabilità sono espressi in specifiche norme tecniche tra le quali il D.M. 10 maggio 2001 e lo standard ASHRAE. Tali valori devono essere poi confrontati con le condizioni reali al fine di identificare un compromesso che tenga conto dei requisiti di conservazione, delle necessità di uso (presenza di persone, apertura di finestre, ecc.) e della funzionalità degli impianti presenti.

Per sicurezza strutturale si intende la stabilità degli edifici e delle strutture nei confronti di azioni naturali, quali quelle ambientali di cui al precedente punto. A fronte delle suddette azioni, occorrerà verificare l'idoneità statica delle strutture e, se necessario, predisporre un progetto di adeguamento e/o miglioramento (DM 10 maggio 2001).

Per sicurezza nell'uso si intendono le problematiche connesse con la destinazione d'uso e con le modalità di fruizione dell'immobile (rimozione delle barriere architettoniche, gestione dei flussi turistici, necessità di servizi aggiuntivi, ecc.). Particolare attenzione andrà rivolta all'eliminazione delle barriere architettoniche (DPR 24 luglio 1996, n. 503), oltre che per motivi legati alla fruibilità, anche per l'importante aspetto legato alla eventuale evacuazione in caso di emergenza.

Per sicurezza anticrimine si intende la tutela del patrimonio culturale con particolare attenzione riguardo ai beni mobili nei confronti di “azioni” dolose (furti, vandalismi, ecc.). Gli strumenti disponibili sul piano tecnico per poter perseguire gli obiettivi di sicurezza, come riportato nel DM 10 maggio 2001, sono essenzialmente: sbarramenti alla azione dolosa (sbarramenti fisici, vigilanza, ecc.); contrasto alla azione dolosa (sistemi di protezione attiva, interventi di repressione, ecc.).

Per sicurezza antincendio, infine, si intendono le azioni di protezione che vengono attuate per limitare i rischi per occupanti, beni mobili e immobili in caso di incendio. È quindi necessario un “progetto sicurezza” che deve fare riferimento ad un percorso costituito da diversi momenti, tra i quali: definire l’incendio che si vuole affrontare e risolvere; provvedere al suo rilevamento tempestivo; provvedere all’invio di allarmi mirati; provvedere al controllo e/o allo spegnimento con sostanze idonee ed infine provvedere all’intervento ad uomo presente per verifiche e/o azioni mirate (DM 10 maggio 2001, DM 20 maggio 1992, n. 569).

Un edificio storico con finalità espositive, quale ad esempio il primo piano dell’Ala sud della Villa Reale di Monza, deve soddisfare i suddetti requisiti prestazionali tenendo però conto dei vincoli a cui gli edifici storici ad alto interesse culturale sono sottoposti. Occorre perciò verificare a priori che gli interventi siano compatibili con i criteri strutturali ed estetici dell’edificio e potenzialmente reversibili.

2. LINEA 1

SUPPORTO ALLA CARATTERIZZAZIONE MICROCLIMATICA INTERNA DEGLI SPAZI CONFINATI, IN RELAZIONE ALLE DINAMICHE DI DEGRADO DELLE APPARECCHIATURE COSTRUTTIVE E DEGLI EVENTUALI BENI MOBILI CONTENUTI

2.1 PROTOCOLLI INTEGRATI DI MONITORAGGIO, RILIEVO E DIAGNOSTICA DELLO STATO DI CONSERVAZIONE

Gruppo di lavoro

Prof.sa Maria Pia Riccardi

Prof. Bruno Messiga

Dott.sa Viviana Guidetti

Dott.sa Rosaria Avagliano

2.2 LINEE GUIDA PER LA CORRELAZIONE DELLO STATO DI DEGRADO CON LE CONDIZIONI AMBIENTALI INTERNE

Gruppo di lavoro

Prof. Bruno Messiga

Dott.sa Rosaria Avagliano

Dott. Marco Malagodi

2.3 APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO INDIVIDUATI

Gruppo di lavoro

Prof.sa Maria Pia Riccardi

Prof. Bruno Messiga

Dott.sa Elena Basso

Dott. Marco Malagodi

Dott.sa Viviana Guidetti

Dott.sa Rosaria Avagliano

Dott. Marco Grandi

.1 PROTOCOLLI INTEGRATI DI MONITORAGGIO, RILIEVO E DIAGNOSTICA DELLO STATO DI CONSERVAZIONE

PROTOCOLLI DI MONITORAGGIO

Introduzione

Il patrimonio culturale è costituito da Beni mobili, immobili e superfici decorate che possono trovarsi in differenti condizioni ambientali; in linea generale si è soliti distinguere ambienti “indoor”, ossia confinati all’interno di edifici o strutture architettoniche, ed ambienti “outdoor", ossia esterni e all’aperto.
Indipendentemente dal luogo di conservazione, i beni sono costantemente inseriti in ambienti in cui il microclima e l’eventuale fluttuazione dei valori dei parametri climatici nell’arco di una giornata, delle stagioni e più in generale dell’anno possono fortemente determinarne lo stato della loro conservazione.
Sempre più di frequente l’attenzione dei conservatori si rivolge alla problematica del microclima e lo studio di come esso interagisce con i beni culturali è un’importante linea di ricerca soprattutto in tempi recenti in cui ai parametri fisici dell’umidità, della temperatura e della luce si aggiungono i fattori chimici dovuti all’inquinamento. Questo stretto legame tra ambiente e Bene porta alla progettazione di campagne di monitoraggio del microclima al fine di correlare i suoi valori e i suoi andamenti con gli effetti del degrado che si manifestano sui manufatti.
Su questo argomento sono state enunciate dall’UNI delle Norme nazionali del settore Beni Culturali e raccomandazioni Normal che indicano le metodologie da adottare per il controllo del microclima, in ambienti interni o esterni, in presenza di Beni Culturali. Facendo riferimento a questo ambito è necessario riportare le definizioni di alcune parole-chiave citate nelle norme più importanti (UNI 10969-2002; UNI 11120-2004; UNI 11131-2005):

Ambiente di conservazione: Luogo dove sono conservati gli oggetti; può essere con o senza la presenza di pubblico.

Microclima: Clima locale di un ambiente specifico, o parte di esso, definito dall’insieme dei parametri ambientali di natura fisica, dalle loro distribuzioni nelle tre dimensioni spaziali e dalla loro evoluzione temporale.

Parametri ambientali di natura fisica: Variabili che nel loro insieme caratterizzano il microclima o alcuni aspetti di esso. Le più note sono: temperatura, umidità relativa, umidità specifica, umidità assoluta, punto di rugiada, velocità e direzione dello spostamento delle masse d’aria, turbolenza atmosferica e sua intensità, illuminamento e livello di illuminamento.

Si riporta una breve descrizione dei parametri indicati:

Temperatura: Grandezza che descrive lo stato termodinamico di un sistema in equilibrio. Esso assume lo stesso valore numerico in sistemi diversi che sono in equilibrio reciproco.

Umidità relativa (UR): Rapporto (adimensionale) tra la frazione molare del vapore d’acqua presente e la massima quantità possibile alla stessa temperatura e pressione atmosferica, cioè in condizioni di saturazione rispetto alla fase liquida.

Umidità specifica (US): Massa di vapore d’acqua per unità di massa di aria umida. E’ un rapporto adimensionale compreso tra 0 e 1.

Umidità assoluta (UA): Densità del vapore, cioè la massa di vapore d’acqua per unità di volume di aria umida a temperatura e pressione costanti.

Punto di rugiada (TR): Temperatura a cui l’aria umida deve essere raffreddata (a pressione costante e a contenuto di vapore costante) perché inizi la condensazione nella fase liquida, ovvero la temperatura a cui il vapore diventa saturo in condizioni di equilibrio con una superficie piana d’acqua distillata. Questa grandezza viene calcolata o misurata direttamente.

Velocità e direzione dello spostamento delle masse d’aria: La velocità media del vento è fortemente influenzata dal tipo di superficie terrestre su cui l’aria fluisce (luogo disabitato e di

conformazione regolare come un deserto o luogo urbanizzato con struttura irregolare), in particolare diminuisce progressivamente con l'avvicinarsi al suolo per effetto dell'attrito dell'aria con la superficie terrestre ed aumenta con la quota fino ad un'altezza oltre la quale il suo valore si mantiene costante. L'impatto tra il flusso d'aria principale ed il suolo dà origine a vortici di varie dimensioni che si muovono in tutte le direzioni, anche se, prevalentemente, seguono il vento principale. La velocità del vento dipende dal flusso d'aria principale e dalla componente fluttuante, che è determinata dalla presenza dei vortici e varia casualmente nel tempo e nello spazio.

Turbolenza atmosferica e sua intensità: La turbolenza atmosferica descrive la componente fluttuante della velocità del vento e determina una continua variazione della sua velocità istantanea e della sua direzione. Fisicamente la turbolenza atmosferica è creata dallo "stiramento meccanico" delle masse di aria in movimento: gli strati di aria che si trovano a differenti altezze dal terreno si muovono con velocità medie orizzontali diverse tra loro; ciò provoca uno stiramento delle particelle d'aria che sono contenute fra tali strati, questo movimento relativo provoca una rotazione della cella d'aria e, quindi, la formazione di vortici che si muovo, prevalentemente, nella direzione del flusso principale. L'intensità di turbolenza è il parametro che quantifica numericamente la turbolenza, con un valore mediato nello spazio e nel tempo.

Illuminamento e livello di illuminamento: L'illuminamento è la grandezza fotometrica che, per un punto della superficie, corrisponde al flusso luminoso ricevuto dalla superficie nell'intorno del punto considerato. Il livello di illuminamento è espresso come la quantità di lumen per ogni metro quadrato (lux) di superficie investita dai raggi luminosi e permette di quantificare la luce che investe superfici e oggetti.

Come sopra detto, attualmente l'ambiente che circonda il patrimonio culturale non può essere descritto soltanto attraverso i parametri ambientali di natura fisica, ma richiede anche la determinazione della concentrazione di una numerosa serie di composti chimici, allo stato gassoso, e di particolato sospeso presenti nell'aria e trasportati dal vento, dalle piogge che nel loro insieme costituiscono l'inquinamento atmosferico. La misura dell'inquinamento atmosferico è finalizzata da un lato a correlare la presenza di prodotti di alterazione dei manufatti con la presenza di particolari inquinanti, dall'altro a controllare fonti e natura dell'inquinamento al fine di individuare gli interventi necessari per ridurre al minimizzare livelli ed effetti attraverso un'azione diretta sui processi di formazione e reazione dei composti inquinanti, sui fattori di trasporto e sulle fonti.

In riferimento agli ambienti confinati destinati alla conservazione di manufatti storico-artistici, l'azione di questi inquinanti risulta essere di minore entità dato che la loro interazione con i manufatti non è prolungata, costante e diretta nel tempo come nel caso di manufatti esposti all'aperto. Essa è di solito limitata ai momenti di aerazione degli ambienti. Tra gli inquinanti maggiormente dannosi si evidenziano:

Ossidi di zolfo: La presenza deriva in piccola parte da processi naturali, biologici, vulcanici, tuttavia la fonte prevalente di immissione nell'atmosfera sono i processi industriali e la combustione dei carboni fossili e dei prodotti petroliferi. Tali ossidi sono i più nocivi per i Beni Culturali in quanto gli acidi corrispondenti che si formano per idratazione reagiscono con il substrato dei manufatti artistici (è noto il caso delle croste nere che deturpano molti monumenti in materiale lapideo).

Ossidi di azoto: La presenza deriva sia da attività biologiche dal suolo sia da processi di combustione di carbone, petrolio e da processi industriali.

Acido cloridrico e acido fluoridrico: la presenza deriva principalmente da scarichi di processi industriali.

Ozono: Si forma nella troposfera in seguito a reazioni fotochimiche dell'ossigeno.

Anidride carbonica: È un prodotto naturale presente nell'atmosfera in quantità relativamente notevoli; in anni recenti la sua concentrazione mostra un andamento crescente, infatti è il prodotto di alcuni processi di produzione industriale della combustione del petrolio e del carbon fossile, delle centrali termoelettriche e degli autoveicoli.

Inquinanti particolati: Questa componente può essere di natura inerte e trasportata da correnti d'aria, o di natura polverulenta solubile in acqua.

Studi eseguiti nel campo di Beni Culturali evidenziano come oggetti realizzati in materiali differenti interagiscano diversamente con i fattori ambientali e possono essere variamente sensibili alle fluttuazioni microclimatiche. Conseguenza di questa interazione spesso sono danni a livello estetico e strutturale, modifiche delle caratteristiche chimico-fisiche dei manufatti e dei loro comportamenti a seguito di stress e sollecitazioni, innesco di reazioni chimiche e di processi che favoriscono l'attacco biologico o altre forme di degrado. Nel caso particolare dell'attacco da parte di biodeteriogeni su superfici d'interesse artistico, esistono specifiche raccomandazioni Normal (39/93) che definiscono la metodologia per il monitoraggio ed il rilevamento della carica microbica dell'aria. Anche questo controllo è di primaria importanza dal momento che alcuni materiali costituenti i Beni Culturali forniscono un ottimo substrato per la sopravvivenza e la riproduzione di microrganismi, la cui attività biologica può essere determinante per la conservazione del manufatto.

Per prevenire o minimizzare le fonti di degrado associate ad una errata condizione microclimatica, è necessario intervenire sul luogo di conservazione, progettando una sistematica campagna di rilevamento dei valori di temperatura, di umidità, di luce e degli altri parametri ad essi correlati. In questo modo sarà possibile valutare le migliori condizioni conservative ed applicarle in modo continuativo e controllato.
In linea generale ogni materiale ha dei valori climatico-termoigrometrici ottimali che dovrebbero essere rispettati per la sua conservazione; tuttavia nei casi reali, scelte ed esigenze di allestimento e/o di disponibilità di spazi impongono la "convivenza" di manufatti risalenti a differenti epoche, di diversi materiali, differente stato di conservazione e altre caratteristiche intrinseche alla loro storia pregressa. In questo caso, pur risultando molto difficile impostare dei valori climatici che possano soddisfare pienamente le esigenze conservative di ogni manufatto, è di primaria importanza quindi verificare e monitorare lo stato dell'aria per cercare di ridurre al minimo i possibili effetti sulle opere. Le indicazioni microclimatiche relative alle condizioni ottimali di conservazione delle opere devono basarsi su alcuni studi preliminari:

- valutazione dello stato di conservazione del Bene Culturale ed indicazione delle forme di degrado in atto o latenti; analisi della storia del Bene in termini di precedenti ubicazioni, interventi di restauro, problematiche di degrado;
- analisi delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali costituenti l'opera;
- analisi della risposta dell'oggetto a seguito di un cambiamento climatico (test da eseguire su provini opportunamente trattati e preparati);
- analisi delle condizioni microclimatiche presenti nel luogo indicato per la conservazione delle opere.

Qualora venisse verificata una inadeguatezza delle condizioni termo-igrometriche di un ambiente, è necessario variare i parametri fisici ed impostare dei sistemi climatici in grado di mantenere i valori più consoni. Per far questo bisogna individuare e modificare le cause perturbanti ed adattare l'oggetto in modo lento e graduale alla nuova condizione microclimatica, affinché non soffra del repentino cambiamento. Quest'ultimo aspetto è consigliato eseguire tests di laboratorio per studiare la risposta del materiale alle variazioni termoigrometriche: in questo caso si utilizzano provini, aventi materiale, caratteristiche chimico-fisiche e stato di conservazione il più possibile assimilabili al caso reale da studiare.
Le Norme forniscono indicazioni sulle metodologie di intervento da seguire per la misura degli specifici parametri ambientali (scelta dei punti di misura il più possibili rappresentativi della problematica da analizzare, scelta della strumentazione) ed elenca le strumentazioni in commercio specificando per ognuna il principio di funzionamento, le migliori condizioni di applicazione e le caratteristiche metrologiche. Ciò che le norme non forniscono sono dei protocolli con la sequenza operativa che parta dallo studio del manufatto e delle sue alterazioni e dallo studio dell'ubicazione e delle caratteristiche dell'ambiente di conservazione per definire quali parametri microclimatici monitorare e le modalità operative del monitoraggio (numero e localizzazione dei punti, durata, ecc.). Anche la norma UNI 10969, che contiene un paragrafo dal titolo "Linee guida per la scelta ed il controllo del microclima", in realtà fornisce solo consigli generici in relazione ai 3 parametri fisici

ritenuti più significativi (T, UR e luce), ma non chiarisce mai come controllarli, come valutare i risultati ottenuti e come correlare fra loro i risultati dei diversi parametri in funzione dei materiali in esame.
In conclusione, poiché lo studio del microclima di un ambiente è un importante strumento per l'individuazione di strategie di mitigazione e adattamento nel comparto della la protezione dei Beni Culturali, si ritiene indispensabile definire un protocollo operativo.
Le misurazioni nell'ambiente possono essere eseguite con tempi e metodologie differenti che devono essere opportunamente scelti in base al caso che si sta trattando.
La procedura per la valutazione di idoneità climatica di un ambiente prevede l'individuazione dei parametri e dello spazio da monitorare, la scelta dei punti in cui installare i sistemi di misura, quando sia identificato il manufatto di interesse. Al termine delle misure e dell'elaborazione dei dati è possibile descrivere le condizioni ambientali attraverso i descrittori di interesse, ossia parametri che permettono di dare una definizione oggettiva alle condizioni climatiche, e valutare l'idoneità del luogo. Oltre allo studio climatico, risulta di particolare importanza analizzare ogni bene che deve essere conservato per avere informazioni sulla funzione che deve svolgere, sulle caratteristiche costruttive, sui materiali costitutivi, sul suo stato di conservazione, sulla presenza di segni di interventi pregressi, sugli ambienti in cui è stato conservato durante la sua storia.
Da queste osservazioni deriva che l'ambiente deve essere valutato in relazione alle caratteristiche dell'oggetto da conservare che ha come principale scopo il mantenimento dell'integrità del manufatto attraverso la prevenzione dell'insorgere di danni fisici, chimici e biologici.
Prima di definire tale protocollo si ritiene però necessario un approfondimento specifico sul monitoraggio ambientale di spazi confinati destinati alla conservazione dei manufatti lignei.
Infatti il legno è in generale uno dei principali materiali che costituiscono il patrimonio culturale ed in particolare è presente con diversi usi nella Villa di Monza, in quanto i pavimenti sono quasi totalmente lignei e vi sono molte boiseries e infissi lignei decorati. Esso può essere messo in opera rivestendo sia una funzione estetico-decorativa sia una funzione portante-strutturale. La natura stessa del legno rende questo materiale particolarmente sensibile all'acqua sia liquida sia sotto forma di vapore e fornisce un substrato favorevole allo sviluppo di diverse forme di biodeteriogeni autotrofi ed eterotrofi (funghi, alghe, insetti). Queste sue caratteristiche chimico-fisiche (assorbimento di acqua e fonte di materiale organico) determinano numerosi effetti che si riscontrano frequentemente nei manufatti lignei tra cui la variazione dimensionale del materiale, la perdita di capacità di portatanza e di resistenza, fessurazioni, formazione di macchie di colore chiaro o scuro e di alterazione delle caratteristiche fisico-meccaniche. Questo degrado crea gravi conseguenze anche in termini di conservazione e di integrità dell'opera che implicano un controllo accurato delle condizioni microclimatiche dell'ambiente in cui l'opera viene conservata.
L'importanza di questa problematica è evidenziata nelle Norme Italiane, che trattano la problematica della conservazione dei manufatti lignei in funzione delle condizioni ambientali in cui essi sono inseriti, stabiliscono dei requisiti e forniscono delle linee guida che riguardano sia la determinazione e la classificazione delle condizioni dell'ambiente sia la progettazione di attività di conservazione, manutenzione e restauro per la salvaguardia del Bene stesso (UNI 11161-2005 e UNI11202-2007).
Attraverso la misurazione dei parametri fisici ambientali, di cui i principali sono la temperatura e l'umidità relativa, ma non sono trascurabili altri quali la concentrazione di CO_2, l'illuminazione e, in località soggette a traffico, la concentrazione di inquinanti quali gli ossidi di zolfo e di azoto ed il particolato atmosferico, è possibile valutare l'idoneità climatica dell'ambiente per prevenire o comunque minimizzare le conseguenze sopra citate.

Definizione di un protocollo per il monitoraggio ambientale in spazi confinati destinati alla conservazione di Beni Culturali

L'aria di uno spazio destinato alla conservazione dei Beni Culturali deve essere il più possibile consona alla preservazione del materiale stesso. Per questo motivo deve essere garantito il controllo sia dei parametri fisici ambientali (radiazione, temperatura, umidità, intensità e direzione del vento, quantità, frequenza ed intensità delle precipitazioni, pressione) sia di quelli dell'inquinamento atmosferico (biossido di carbonio, ossidi di azoto, ossidi di zolfo, ozono,

particolato, solfati, nitrati, cloruri, calcio, sodio, potassio, magnesio, ferro, ammonio). I primi fattori hanno un'importante ricaduta sul patrimonio culturale che si trova in luoghi indoor ed outdoor, mentre i secondi sono maggiormente influenti per lo stato di conservazione di manufatti esposti in luoghi outdoor.
La misurazione dei parametri sopra citati è finalizzata a:

- determinare l'azione esercitata dalle condizioni atmosferiche sul manufatto;
- correlare la presenza di prodotti di alterazione dei manufatti con quella di particolari inquinanti atmosferici;
- controllare fonti e qualità dei parametri per poter individuare gli interventi necessari per ridurre le cause di una errata conservazione.

Per il monitoraggio microclimatico è necessario progettare una campagna di misure che deve essere svolta secondo determinate metodologie, indicate in modo più o meno specifico dalle normative, e criteri che devono essere valutati e presi in considerazione in base al caso di studio affrontato.
In linea generale, la procedura da seguire e da adeguare al caso specifico può essere schematizzata come riportato di seguito.

1. Definizione dei materiali costitutivi i manufatti presenti nel sito da monitorare

E'stato più volte sottolineato lo stretto rapporto che esiste tra microclima e materiali che costituiscono i manufatti e quanto l'effetto dei parametri fisici ambientali e dei fattori inquinanti possa compromettere lo stato di conservazione delle opere stesse. Per questo motivo in presenza di un luogo già destinato alla conservazione è di fondamentale importanza la conoscenza delle opere e della loro costituzione materica, nonché l'individuazione e lo studio dei processi di degrado che possono essere correlabili alle caratteristiche ambientali a cui i manufatti sono sottoposti. Quest'ultimo punto è particolarmente significativo e può essere approfondito attraverso uno studio diagnostico non distruttivo, se si tratta di andare ad indagare fenomeni fisico-meccanici (variazioni dimensionale dell'opera, distorsione della sua forma come l'imbarcamento o la svergolatura di una tavola, ecc.), o micro-distruttivo, se si deve esaminare la composizione chimica di alcuni prodotti e le forme di degrado (prodotti di corrosione di un metallo, le efflorescenze saline o solfatazione di un affresco, presenza di microrganismi, ecc.). Da queste indicazioni si possono dedurre le cause di alterazione dell'opera ed individuare i parametri ambientali maggiormente dannosi e che risultano fondamentali per il monitoraggio.

2. Definizione e caratterizzazione dell'ambiente da monitorare

Le motivazioni che spingono i conservatori alla progettazione di una campagna di monitoraggio dei parametri ambientali e degli inquinanti all'interno di uno spazio espositivo sono spesso sono legate allo stato di conservazione dei manufatti. Per poter pianificare le sessioni di misura è necessario individuare e descrivere il luogo di esposizione sia da un punto di vista spaziale sia attraverso le sue caratteristiche riconducibili alla funzione che esso ricopre. Sulla base di questo sono da tenere in considerazione numerosi fattori che possono influire sull'azione dei parametri ambientali e che sono legati sia all'ambiente esterno sia a quello interno al sito: il clima dell'area in cui si inserisce il luogo da monitorare (clima secco, umido, precipitazioni frequenti/abbondanti/scarse, velocità e direzione del vento, caratteristiche delle idrometeore); i dati topografici della zona (altitudine, latitudine e longitudine, luogo in montagna o al mare); l'esposizione del luogo in relazione alle coordinate geografiche (luogo assolato o in ombra; durata dell'esposizione del manufatto ai due fattori; radiazione solare globale e componente ultravioletta della radiazione solare che investono il luogo); la vicinanza a fattori inquinanti come reti di trasporto, arterie stradali od autostradali e il loro livello di frequentazione (reti più o meno trafficate); la vicinanza al mare/aerosol marino (soprattutto in presenza di manufatti metallici); la vicinanza a siti industriali le cui emissioni di inquinanti risultano dannose; la fruizione del luogo da parte del pubblico (flusso di visitatori, ore in cui il luogo rimane aperto); gli orari di apertura e chiusura delle porte e finestre per l'aerazione del luogo in riferimento ai momenti della giornata (apertura di mattina, di pomeriggio o di sera) e alla concentrazione degli inquinanti, soprattutto se si tratta di un sito posto al centro del tessuto urbano ad esempio: (la concentrazione degli inquinanti è maggiore nelle ore di punta); i sistemi ed i

prodotti utilizzati per la pulizia giornaliera dell'ambiente (alcuni metodi di pulizia possono favorire la circolazione di materiale polverulento che si deposita sui manufatti; altri prodotti possono fornire le condizioni idonee per lo sviluppo di colonie di microrganismi); la presenza di sistemi di controllo ambientale artificiale e di impianti tecnici di cui valutare l'attività (deumidificatori, condizionatori, pompe di calore, fonti di illuminazione; la verifica che la direzione dei flussi d'aria o di luce non sia diretta sui manufatti, ma abbia un raggio di diffusione il più ampio possibile).
L'azione dei fattori antropici, spesso concomitanti, si somma a quella dei parametri fisici ambientali, le cui fluttuazioni non sempre sono costanti e determinabili o evitabili a priori, ciò favorisce l'instaurarsi di condizioni microclimatiche molto complesse. Per questo motivo è necessario approcciarsi alla campagna di monitoraggio avendo a disposizione una corposa documentazione sulle caratteristiche e sui fattori endogeni ed esogeni del luogo che si deve sottoporre all'analisi, in modo da correlare queste evidenze con i dati rilevati dalle misure del monitoraggio.
Per lo studio dei parametri fisici ambientali e degli inquinanti esogeni, e perché esterni al luogo confinato, sono comunque, in un certo modo, influenti sul microclima e sulla qualità dell'aria interni al sito stesso; si hanno a disposizione i valori registrati dalle stazioni di rilevamento degli Enti locali o nazionali preposti al controllo dell'ambiente. Questi dati sono di particolare interesse perché permettono di svolgere differenti studi sullo stato dell'atmosfera e dell'aria: la determinazione delle condizioni ambientali in tempi precedenti al controllo; la valutazione delle fluttuazioni e dei cambiamenti dei parametri su scale di tempo più o meno prolungate; il confronto tra i parametri esterni e quelli interni per verificare l'entità dell'influenza dell'ambiente esterno sul microclima di un luogo confinato.

3. Definizione e scelta dei parametri fisici ambientali e dei fattori inquinanti da misurare e monitorare

Lo scopo della campagna di monitoraggio ambientale è quello di descrivere la qualità dell'aria ed il comportamento del microclima dell'ambiente sottoposto ad analisi; per soddisfare questa esigenza è di fondamentale importanza selezionare ad hoc i parametri che devono essere misurati e monitorati.
Il microclima che caratterizza un ambiente indoor è descritto principalmente attraverso i dati relativi alla Temperatura ed all'Umidità relativa: questo è dovuto al fatto che un luogo chiuso e confinato ha una limitata interazione con l'ambiente esterno e di conseguenza con tutti i suoi numerosi parametri atmosferici di origine naturale o antropica. Tuttavia, come descritto nel punto 2, i luoghi indoor non sono completamente isolati e quindi, anche se in minima parte, possono risentire dello stato dell'atmosfera esterna.
Una prima indicazione per la scelta dei parametri da misurare può essere fornita dall'osservazione delle opere, dal loro stato di conservazione e dai risultati ottenuti dalle analisi scientifiche opportunamente eseguite sui prodotti di degrado (si veda punto 1). Uno studio di questi tipo permette di avanzare ipotesi sulla correlazione tra le forme di alterazione e i fattori ambientali, considerando che i materiali costituenti i manufatti, per la loro composizione chimica, possono essere maggiormente sensibili a determinati parametri piuttosto che ad altri. Inoltre bisogna ricordare che anche l'ubicazione del sito (campagna, zona urbana, area industriale), la topografia della zona e le specie inquinanti a concentrazione maggiore presenti nell'aria circostante sono considerati delle caratteristiche di riferimento che indirizzano la scelta dei parametri da monitorare.
La campagna di monitoraggio deve essere progettata per fornire indicazioni esaustive, precise e complete sulla descrizione del microclima dell'ambiente, le sue fluttuazioni e variazioni nel corso del periodo di durata del monitoraggio, pertanto, in determinati casi è opportuno estendere le misure anche a quei parametri che possono agire a lungo temine, o in determinati periodi dell'anno o in particolari condizioni ambientali anche se nell'immediato non mostrano evidenze o non risultano pericolosi per lo stato di conservazione del manufatto.

4. Numero e localizzazione dei punti di rilevamento

Dopo aver individuato il sito da sottoporre al monitoraggio ambientale e scelto i parametri fisici ambientali, le specie inquinanti ed eventualmente la carica microbica da misurare, è opportuno

determinare il numero e la localizzazione dei punti di rilevamento. Questa scelta è dettata principalmente dal caso oggetto di studio, in linea generale, per l'analisi di un luogo indoor, è consigliato posizionare diverse stazioni di rilevamento in punti strategici sia all'interno che all'esterno dell'ambiente, al fine di confrontare i dati e valutare l'influenza dei valori esterni dei parametri su quelli che si registrano all'interno. Più nello specifico, in luoghi confinati, è possibile eseguire analisi relative all'aria presente nell'ambiente in cui sono posti i manufatti ed effettuare misure in prossimità del manufatti stessi.

5. Durata del rilevamento

La complessità e la variabilità dei fattori ambientali che interagiscono in un'area suggerisce di eseguire campagne di rilevamento piuttosto prolungate, almeno un anno, e continuative. In questo modo la descrizione del microclima di un ambiente si basa su dati rappresentativi e molto esaustivi che permettono di valutare le condizioni e le fluttuazioni dello stato atmosferico all'interno delle 24 ore, dei mesi, delle stagioni e dell'anno. La metodologia migliore per lo studio ambientale prevede misure consecutive, ossia il rilevamento dei parametri avviene in modo continuo per tutto il periodo di misura stabilito; in altri casi, per cause che possono essere di impedimento a questo tipo di approccio, è possibile ricorrere a rilevamenti discontinui, con l'attenzione di raccogliere i dati almeno un mese per ogni stagione, in condizioni diurne e notturne e nei periodi con caratteristiche climatiche significative per l'area geografica in studio. Nel secondo caso, la progettazione della campagna di misure è molto più complessa, poiché i dati forniti, pur essendo discontinui, devono comunque essere in grado di fornire tutte le indicazioni necessarie e fondamentali per lo studio del microclima nei diversi periodi dell'anno ed in riferimento alle caratteristiche stesse del luogo. In definitiva la metodologia adottata deve essere valutata sulla base del caso di studio, pertanto è difficile fornire a priori indicazioni specifiche.

6. Modalità e strumenti di rilevamento

Le modalità di rilevamento oltre ad essere strettamente legate all'ambiente che deve essere monitorato, alle evidenze delle forme di degrado che si manifestano attraverso i manufatti e alle caratteristiche dello stato dell'aria indoor ed outdoor, sono determinate dalla sensibilità del metodo, dalle finalità dello studio e, in riferimento agli inquinanti, alla concentrazione delle specie chimiche. Risulta, inoltre, importante ai fini dell'interpretazione dei dati, avere a disposizione i rilevamenti corredati dall'indicazione del giorno e dell'ora solare di inizio e di fine della misura.
Per ogni parametro fisico ambientale e fattore inquinante si hanno a disposizione differenti apparecchiature, sensori, sistemi e strumenti di misura aventi specifiche caratteristiche metrologiche (dimensione, sensibilità, risoluzione, ecc.) che permettono di adeguare la metodologia analitica a differenti esigenze.

Esempi di applicazione del protocollo alla misura di alcuni parametri fisici ubiquitariamente significativi

Temperatura
Per quanto riguarda il rilevamento della Temperatura si può fare riferimento alla Norma UNI 11120-2004. "Beni Culturali. Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti" in cui vengono riportate alcune indicazioni sulla tipologia di analisi e sugli strumenti che possono essere utilizzati in funzione delle loro caratteristiche metrologiche e del caso di studio. La norma contempla due metodologie:

- misurazione in campo della temperatura dell'aria: è consigliata in presenza di evidenze artistiche di elevato pregio o per scelte dettate da motivi di studio o dall'impossibilità di mettere a punto la misurazione della temperatura della superficie dei manufatti. La strumentazione non ha alcun contatto con la strumentazione.
- misurazione in campo della temperatura della superficie dei manufatti: è consigliata per valutare il reale stato termico dell'oggetto e per poter studiare in modo più approfondito il

comportamento del parametro sul manufatto stesso e per definire le sollecitazioni termiche cui il manufatto è sottoposto. In questo caso è necessario prendere le opportune cautele nella scelta sia della metodologia operativa sia dei punti dell'opera che entrano a contatto con la strumentazione.

Misurazione in campo della temperatura dell'aria

Il primo aspetto da affrontare è la scelta dei punti di misurazione che deve essere fatta sulla base del principio della loro rappresentatività in funzione del problema che si vuole affrontare e studiare. Il numero dei punti di rilevamento, per avere dei risultati significativi, deve tener conto della volumetria della stanza. Contemporaneamente a questo bisogna valutare la tipologia di strumento da adottare sulla base delle relative caratteristiche metrologiche e del tipo di campagna di rilevamento che si vuole progettare: per le campagne di rilevamento prolungate è consigliato l'utilizzo di termoresistenze, di termistori e di termocoppie; per misure occasionali si è soliti utilizzare termometri a colonna liquida o termografi. Ogni strumentazione ha determinate caratteristiche tecniche (sensibilità, risoluzione, campo di misura) che le distinguono e giustificano l'utilizzo di una piuttosto che dell'altra.
Per ottenere una corretta misurazione della temperatura dell'aria bisogna schermare la strumentazione dalla radiazione infrarossa, legata a sistemi di illuminazione artificiale, e quindi evitare che il contributo radiante vada ad incidere sul valore della temperatura reale. A tale fine si utilizzano differenti schermi applicati allo strumento oppure, per uno studio ancora più preciso, è consigliato ricorrere alla misura della temperatura media radiante mediante un globotermometro.

Misurazione in campo della temperatura della superficie dei manufatti

La misura della temperatura sulla superficie di materiali può essere eseguita mediante strumenti che sfruttano differenti tecniche analitiche. In linea generale le misure dirette sono attuate con un sensore termometrico per contatto schermato dalla radiazione IR, quelle indirette prendono in considerazione la radiazione emessa dall'oggetto. I metodi di misura più frequente mente utilizzate sono le seguenti:

- Misurazione per contatto: misurazione eseguita utilizzando un sensore posto a diretto contatto fisico con la superficie da misurare. Può richiedere pressione diretta sulla superficie o l'uso di paste che migliorino il contatto termico tra il sensore e la superficie.
- Misurazione radiometrica: misurazione eseguita misurando il flusso di radiazione infrarossa che colpisce il sensore.
- Misurazione a radiazione totale: misurazione radiometrica eseguita utilizzando uno schermo metallico per convogliare la radiazione infrarossa diretta e diffusa emessa dalla superficie dell'oggetto di misura sul sensore radiometrico. Lo schermo metallico protegge il sensore perché non venga colpito da radiazione IR emessa da corpi estranei.

Nel caso dei Beni Culturali, a seconda del materiale di cui bisogna rilevare i valori di temperatura di superficie, occorre prendere in considerazione la seconda e la terza modalità operativa che non prevedono il diretto contatto tra strumento e superficie.
Qualora non sia possibile evitare l'utilizzo della prima modalità, bisogna adottare misure cautelative, quali:

- verificare che l'operazione non vada a danneggiare l'opera, è importante avere una valutazione dall'idoneità metodologica da parte di un restauratore;
- predisporre le misure in presenza di un operatore tecnico e di un restauratore;
- valutare la necessità di utilizzare appropriate paste conduttive e considerarne le caratteristiche;
- evitare che i termometri ad elevata capacità termica alterino la temperatura originaria del manufatto.

Umidità relativa

La misurazione dell'umidità presente in un ambiente rientra in un'attività più ampia che prende in considerazione il monitoraggi anche di altri parametri fisici, tra cui la temperatura che ha un ruolo importante sulla variazione dell'umidità relativa.
Per quanto riguarda il rilevamento dell'Umidità Relativa si può fare riferimento alla Norma UNI 11131-2005 "Beni Culturali. Misurazione in campo dell'umidità dell'aria" in cui sono riportate alcune indicazioni sulla tipologia di analisi e sugli strumenti che possono essere utilizzati in funzione delle loro caratteristiche metrologiche e del caso di studio.

Al momento di attuare uno studio sugli andamenti climatici in un luogo bisogna per prima localizzare i punti di misura, scegliendoli in base alla rappresentatività di quanto avviene nell'ambiente e alla loro idoneità per risolvere il problema verificatosi.
In secondo luogo è necessario scegliere anche la migliore strumentazione per la misurazione dell'umidità sulla base delle rispettive caratteristiche metrologiche e dei requisiti tecnico-scientifici e che si ritengono opportuni per l'esaustività dell'analisi. La misura dell'Umidità Relativa può avvenire in modo diretto, mediante sensori con uscita proporzionale a tale grandezza, o indiretto mediante il rilevamento della temperatura dell'aria e della temperatura di rugiada o di bulbo umido.
Lo strumento consigliato per la misurazione dell'Umidità Relativa dell'aria è lo psicrometro elettrico che permette di ottenere la misura a partire dalla temperatura; in alcuni casi risulta più opportuno utilizzare gli igrometri, ossia strumenti che forniscono direttamente il valore di Umidità Relativa, tra i quali si citano l'igrometro elettronico capacitivo, l'igrometro elettronico resistivo e l'igrometro a capello.

Illuminamento
Gli oggetti esposti in luoghi confinati spesso sono illuminati mediante sistemi di illuminazione artificiale, ma sono anche sottoposti alla radiazione luminosa solare che penetra attraverso le finestre se queste ultime non sono opportunamente schermate.
Le frequenze delle radiazioni elettromagnetiche che sono maggiormente dannose per i materiali dei Beni Culturali si trovano nel campo dell'Infrarosso e dell'Ultravioletto. Le prime hanno un effetto termico per cui la loro azione prolungata su un materiale può provocarne un innalzamento della temperatura; le seconde, essendo molto energetiche, esercitano un'azione di tipo fotochimico sui substrati irraggiati e favoriscono l'innescarsi di reazioni chimiche che possono arrecare danni estetici all'opera.
Per tali motivi e con lo scopo di salvaguardare il patrimonio culturale conservato in ambienti indoor da processi è opportuno valutare il valore di illuminamento.
Poiché nel campo di Beni Culturali non esiste una normativa relativa alla misurazione di tali parametri, le metodologie di seguito esposte sono tratte da normative UNI relative al settore luce ed illuminazione e riguardano la misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti, come l'IR e l'UV, emesse da sorgenti artificiali (UNI EN 14255-1 Ottobre 2005 *Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti. Parte 1: Radiazioni ultraviolette emesse da sorgenti artificiali nel posto di lavoro*; UNI EN 14255-2 Febbraio 2006 *Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti. Parte 2: Radiazioni visibili ed infrarosse emesse da sorgenti artificiali nei posti di lavoro*)
Attualmente sono in uso differenti strumentazioni atte a misurare la frazione di UV, Vis e Ir ricevuta dal manufatto che risulta sottoposto a tale irraggiamento; essi sfruttano sistemi a fibre ottiche o materiali fotocromici che mostrano una variazione di colore (viraggio) in base alla dose di luce ricevuta. Strumenti più sofisticati permettono di evidenziare effetti sinergici di luce e microambiente (inquinanti, forti fluttuazioni T, RH% etc.) che si verificano nell'ambiente monitorato.
Lo studio dell'impatto delle radiazioni IR e UV sui manufatti deve contemplare anche alcune osservazioni di particolare rilevanza, quali:

- il numero, la posizione e le tipologie delle sorgenti luminose presenti;
- la radiazione riflessa o diffusa dagli oggetti, ma anche dalle pareti della sala e dalle strutture espositive (vetrine, pannelli esplicativi,ecc.);
- lo spettro della radiazione emessa dalle sorgenti luminose (il dato è fornito dalla scheda tecnica della sorgente stessa, oppure può essere opportunamente misurato);
- il livello di esposizione;
- la costanza o la variazione dell'irraggiamento nel tempo;
- individuazione dei potenziali danni dovuti ad un eccessivo illuminamento;
- individuazione di metodologie volte a minimizzare il rischio di alterazione dei materiali interessati.

La progettazione del rilevamento di questi dati dipende molto dalle caratteristiche intrinseche della sorgente luminosa, tuttavia la durata della campagna di misura deve essere sufficientemente lunga affinché si possano ottenere dei dati rappresentativi e significativi del "comportamento" della sorgente stessa.

Definizione di una proposta di protocollo per il monitoraggio ambientale della Villa Reale di Monza

La Villa Reale di Monza è un complesso architettonico molto particolare poiché occupa un'ampia area attualmente incorporata nel tessuto urbano della città stessa ed è inserita in una serie di ambienti naturali e artificiali che nel corso dei secoli si sono sviluppati e trasformati.
Seguendo i punti delineati in modo generale nel paragrafo precedente, si definisce di seguito una proposta e/o indicazione di uno studio microclimatico che possa essere significativo per la valutazione della qualità delle condizioni ambientali interne, anche attraverso lo studio di quelle esterne che, come già più volte sottolineato, esercitano un'influenza sulle prime. Al momento della stesura di questa proposta si prende in considerazione il primo piano nobile dell'Ala Sud della Villa che risulta già restaurati e sede di una mostra che espone arredamenti originali della Villa.

1. <u>Definizione dei materiali costitutivi i manufatti presenti nel sito da monitorare</u>
   L'ala Sud della Villa Reale è costituita da una serie di ambienti e sale (quali la Sala delle Udienze, la Camera da letto di Re Umberto I, il Bagno del Re, l'Armeria del Re, la Camera del Gran Scudiere, la Biblioteca) in cui si riscontra l'utilizzo di numerosi materiali che vanno dalle opere strutturali (le tappezzerie in tessuto, le decorazioni in stucco, le tarsie lignee dei pavimenti) alle opere mobili che costituiscono l'arredamento e l'oggettistica appartenuti alla famiglia reale (la carta dei libri della biblioteca, le finiture in materiale lapideo, i metalli delle armi, le pelli animali, il legno, i tessuti delle imbottiture).

2. <u>Definizione e caratterizzazione dell'ambiente da monitorare</u>
   La Villa Reale di Monza, data la sua complessità ed estensione architettoniche, ha un'esposizione ai quattro punti cardinali:
   - ad Ovest è esposto il prospetto in cui si trova l'ingresso principale alla Villa; esso è preceduto da un ampio giardino con pavimentazione fatta di terra e ciottoli al cui centro si trova una fontana. Questo fronte della Villa è rivolto su una delle principali arterie stradali della città, in cui il traffico veicolare giornaliero è piuttosto intenso;
   - ad Est è esposto il prospetto che si affaccia interamente sul parco di pertinenza alla Villa;
   - a Sud ed a Nord sono esposte le ali laterali della Villa che si affacciano interamente sul parco.

Nel parco si trovano differenti specie arboree, non presenta aree pedonali piastrellate, ma solo percorsi in terra battuta e ghiaia, ci sono prati, frequentati da uccelli e piccoli animali da bosco, laghetti e stagni con animali acquatici.
L'esposizione della Villa è tale da permettere un'insolazione della stessa differenziata a seconda delle fasi della giornata; solo piccole porzioni subiscono l'azione dell'ombra di alcuni alberi.
L'inserimento della Villa Reale in un ambiente sia urbano sia naturalistico determina la compresenza e la conseguente interazione di numerosi fattori ambientali, naturali e inquinanti che possono agire in maniera differenziata sulle diverse esposizioni dell'edificio.
Il traffico veicolare dell'area urbanistica fa sì che nell'atmosfera si abbiano immissioni di CO_2, di particellato carbonioso e di ossidi di solfo e di azoto. La zona del parco, invece, è caratterizzata da un ambiente molto più eterogeneo che comprende numerosi fattori che entrano in gioco, sommandosi a quelli antropici, tra i quali si citano: l'aspetto polverulento dei sentieri del parco costituito dal terriccio, gli alberi, la presenza di determinati flussi di aria che possono provenire da diverse direzioni, il calpestio dei fruitori del parco che crea un rimescolamento del terreno e mette in circolazione una vasta gamma di inquinanti "naturali" come Ca, Na, Cl, pollini ecc.
L'azione di questi fattori può variare di intensità in presenza di aria secca, di diversi valori di umidità, di precipitazioni o di altre idrometeore.
Attualmente le condizioni termoigrometriche degli ambienti interni vengono mantenute su valori abbastanza costanti attraverso sistemi di controllo ambientale artificiale (fan coil) che regolano la temperatura dell'aria immessa nelle stanze, in modo tale da ottimizzarne i valori in funzione dei manufatti presenti all'interno delle sale. Ovviamente il fatto che alcune sale siano fruibili dal pubblico rappresenta uno dei principali fattori che tendono ad alterare la costanza delle condizioni termo igrometriche impostate. Per una corretta gestione del microclima interno è, quindi, di particolare importanza studiare l'andamento del flusso dei fruitori che si registra su lunga e breve

scala e in corrispondenza di festività o di giorni lavorativi al fine di valutare le correzioni da apportare al sistema di controllo ambientale artificiale.

3. Definizione e scelta dei parametri fisici ambientali e dei fattori inquinanti da misurare e monitorare

Outdoor
Le condizioni microclimatiche interne e la qualità dell'aria degli ambienti indoor è fortemente influenzata dai fattori esterni, pertanto è necessaria l'acquisizione dei dati atmosferici sia all'interno dell'edificio sia al suo esterno. La particolare area in cui è inserita la Villa porta alla scelta di monitorare i seguenti parametri:

- parametri fisici ambientali: Temperatura, Umidità Relativa, Velocità e direzione dello spostamento delle masse d'aria; Turbolenza atmosferica e sua intensità; Illuminamento e livello di illuminamento; Idrometeore (solo all'esterno), Radiazione solare globale e componente ultravioletta della radiazione solare;
- fattori inquinanti: CO_2, ossidi di zolfo e di azoto;
- fattori dovuti alla presenza del parco: cationi Ca^{++}, Na^{+}, Mg^{++}, Mn^{++}, K^{+}, NH_4^{+}; anioni F^{-}, Cl^{-}, NO_2^{-}, Br^{-}, NO_3^{-}, $HPO_4^{=}$, HSO_3^{-}, $SO_4^{=}$, $C_2O_4^{=}$, carica microbica.

Il rilevamento climatico eseguito sia all'interno che all'esterno dell'edificio permette di comparare i valori rilevati per valutare l'incidenza dell'ambiente outdoor su quello indoor, al fine di poter progettare delle azioni di salvaguardia o almeno di schermatura di quei fattori che hanno maggiore incidenza sul dato interno e sulla conservazione del patrimonio conservato.
Il monitoraggio ambientale esterno deve essere eseguito tenendo presente le esposizioni topografiche dell'edificio, pertanto sarebbe necessario posizionare le sonde di rilevamento sia sul prospetto che si affaccia sulla strada sia su quello che è rivolto verso il parco. L'analisi della qualità dell'aria esterna e dei fattori che la caratterizzano può essere supportata anche dai dati raccolti nelle stazione di monitoraggio che fanno capo agli Enti preposti a tali studi, per esempio l'Arpa della Lombardia che ha due stazione di monitoraggio nelle vicinanze di Monza, quella di Agrate Brianza e quella di Carate Brianza. Per ora sono stati presi in esame i dati raccolti dalla stazione di Carate Brianza relativi all'ultimo anno.

Indoor
L'acquisizione dei dati interni deve essere ragionata sulla base delle problematiche esistenti e rilevabili. Per progettare un monitoraggio efficiente ed efficace è importante localizzare un numero di sonde opportuno in base alla volumetria ed alle caratteristiche dimensionali dell'ambiente. Per avere dei dati dettagliati è indispensabile suddividere l'ambiente secondo una griglia immaginaria costituita da tanti piani paralleli al pavimento ed alle pareti laterali: i punti di intersezione di questa griglia corrispondono ai punti di posizionamento delle sonde di rilevamento. Questa struttura più o meno fitta permette di correlare i dati ottenuti nelle varie localizzazioni e di poter analizzare su differenti sezioni in alzato ed in piano quali sono le variazioni termo igrometriche (si riporta l'esempio del diverso valore che si può registrare a contatto con il pavimento o ad altezza uomo in riferimento alla fruizione delle sale, oppure in zone prossime all'ingresso dell'ambiente rispetto a quelle più protette, sostanzialmente quelle in fondo alla sala). Il monitoraggio microclimatico di ambienti interni prevede una campagna di misura dei parametri di Temperatura e di Umidità Relativa, in quanto questi sono i fattori che maggiormente possono subire fluttuazioni, a volte anche rilevanti in base alla funzione d'uso dei luoghi monitorati (in questo caso sale di esposizione), e che sono in grado di compromettere lo stato di conservazione dei manufatti.

4. Durata del rilevamento

Per poter fornire una buona statistica delle condizioni ambientali outdoor ed indoor, è necessario che il monitoraggio microclimatico abbia una durata annuale. Questo arco di tempo permetterà di svolgere studi comparativi di differenti tipologie, quali sono quelli giornalieri, mensili, stagionali e di comparare anche le eventuali variazioni rilevate dai sistemi in relazione ai giorni/periodi in cui sono stati registrati i flussi di visitatori presenti nelle medesime sale.

BIBLIOGRAFIA

- Normal – 5/81. Misura dei parametri ambientali.
- Normal – 5/83. Misura dei parametri ambientali
- Normal – 39/93. Rilevamento della carica microbica dell'aria.
- Normal - 20/85. Conservazione dei materiali lapidei: manutenzione ordinaria e straordinaria.
- UNI 10969-2002. Beni Culturali. Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni Culturali in ambienti interni.
- UNI 11120-2004. Beni Culturali. Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti.
- UNI 11131-2005. Beni Culturali. Misurazione in campo dell'umidità dell'aria
- UNI 11161-2005. Beni culturali. Manufatti lignei. Linee guida per la conservazione, il restauro e la manutenzione.
- UNI 11202-2007. Beni culturali. Manufatti lignei. Determinazione e classificazione delle condizioni dell'ambiente.

PROTOCOLLO DI RILIEVO

La fase di rilievo geometrico e morfologico dell'esistente costituisce un momento imprescindibile nella acquisizione complessiva della conoscenza della fabbrica.
Le modalità tradizionali di restituzione geometrica contemplano la realizzazione di disegni bidimensionali realizzati nella scale tipiche della rappresentazione edilizia, dall'1:500 per gli inquadramenti planivolumetrici d'insieme, all'1:200 o 1:100 per le planimetrie generali per passare all'1:50 per la rappresentazione di dettaglio di singole porzioni della fabbrica, in pianta, alzato o sezione. Possono essere impiegate scale minori (1:20 o 1:10) per la restituzione di dettagli costruttivi, tessiturali o decorativi.
Le tecniche tradizionali di rilievo topografico mediante trilaterazione sono oggi comunemente affiancate da rilievi fotogrammetrici mediante campagne fotografiche estensive, finalizzate a realizzare un rilievo morfologico mediante costruzione di fotopiani raddrizzati delle chiusure e delle partizioni verticali, delle pavimentazioni e delle superfici intradossali degli orizzontamenti.
Tali rilievi costituiscono la base per le successive operazioni di mappatura materica e di lettura dello stato di conservazione
Sono oggi sempre più sovente realizzati rilievi mediante modalità innovative di acquisizione mediante laser a scansione. Il laser a scansione è un apparto ad alta tecnologia costituito da un telemetro laser, da un sistema di navigazione inerziale e da un ricevitore satellitare GPS. Il funzionamento del laser a scansione si basa sull'invio di un raggio laser da un dispositivo di emissione (montato a terra o su aereo) che ha posizione nota sia in temine di coordinate del punto di emissione che di direzione lungo la quale viene emesso il raggio laser. Quando il raggio laser colpisce un punto fisico e viene da questo riflesso il laser a scansione, in funzione del lunghezza percorsa dal raggio laser, delle coordinate del punto di emissione e della direzione del raggio, determina le coordinate del punto di riflessione. In particolare, nel caso di un laser a scansione da terra, le coordinate di ogni punto vengono ricavate in funzione del cosiddetto tempo di volo che un raggio di luce infrarossa emessa dallo strumento impiega a percorrere la distanza in andata e ritorno tra il punto di emissione e il punto da cui esso viene riflesso.
I parametri che caratterizzano un laser a scansione per riprese terrestri sono molteplici, tra i quali i più importanti sono: la portata del raggio laser , la densità di punti rilevabili per unità di superficie a parità di distanza dell'oggetto, la precisione metrica delle coordinate dei punti rilevati, la possibilità di effettuare riprese in tutte le direzioni che appartengono ad una superficie sferica da un unico punto ed in un'unica sessione, ed altri ancora.
Lo strumento genera nuvole di punti, collocate univocamente nello spazio, con una densità media di alcune centinaia di punti per metro quadrato. Proprio la densità dei punti per la sua fittezza, può essere scambiata con una superficie. Tale superficie è invece prodotta da opportuni software di modellizzazione, che interpolano con una superficie la nuvola di punti generata dal laser a scansione.

PROTOCOLLO DI DIAGNOSTICA DELLO STATO DI CONSERVAZIONE

Introduzione

Negli ultimi anni sempre più frequentemente gli Enti preposti alla conservazione e alla tutela richiedono l'intervento di personale qualificato per l'esecuzione di analisi diagnostiche a supporto degli interventi di restauro.
La conoscenza di un manufatto avviene attraverso un approccio scientifico che sfrutta tecniche di analisi non distruttive e micro distruttive, al fine di ottenere una serie di dati sul bene, interessanti per procedere nell'intervento di restauro in modo più corretto e puntuale e per definire anche le migliori condizioni di conservazione a cui sottoporre il bene a restauro ultimato.
Gli scopi delle analisi scientifiche sono:

- Conoscenza tecnico-storica dell'opera: attraverso la caratterizzazione composizionale dei materiali presenti nell'opera si possono distinguere le parti originali da quelle appartenenti ad un intervento di restauro, si possono compiere studi di attribuzione attraverso confronti con opere autografe, si può studiare la tecnica di esecuzione del lavoro e definire le fasi di realizzazione.
- Definizione dello stato di conservazione, verifica dell'integrità dell'opera, progettazione delle condizioni di conservazione: è possibile rintracciare alterazioni di natura chimica, fisica, biologica e forme di degrado che si manifestano attraverso l'alterazione estetico-cromatica dell'opera, al fine di individuare i fattori che hanno provocato tale degrado e di intervenire su di essi per minimizzare il danno e per mettere in sicurezza l'opera in tempi futuri.
- Scelta dei materiali da utilizzare negli interventi di restauro: la conoscenza delle problematiche dell'opera e dei suoi materiali costitutivi permette di fornire importanti linee guida per il restauratore che si approccia all'opera e di indirizzare la sua scelta sui materiali/prodotti da utilizzare nelle diverse fasi dell'intervento. Questo permette di proteggere il Bene da eventuali danni provocati da prodotti poco idonei per il caso che si sta affrontando.
- Studio del sistema ambiente-manufatto: l'ambiente è descritto attraverso una serie di parametri che interagiscono continuamente con il manufatto e che, a seconda dei valori che assumono, possono danneggiarlo o salvaguardarlo. Risulta di primaria importanza lo studio del microclima che si stabilisce nell'ambiente in cui è conservato il Bene e correlarlo con le eventuali forme di degrado dell'opera, al fine di indirizzare le scelte sulla sua conservazione (vedi "Protocollo di monitoraggio", nel capitolo I della presente relazione).
- Il campo scientifico mette a disposizione dello studio dell'arte numerose metodologie di indagini che possono essere classificate come segue:
- Indagini non invasive: sono eseguite in situ, non è prevista la movimentazione dell'opera e non è richiesto il prelievo di campioni. Quasi sempre non apportano modificazioni né all'aspetto estetico né alle caratteristiche macro-microstrutturali dell'opera, per cui possono essere considerate anche non distruttive;
- Indagini micro-invasive: sono eseguite in laboratorio e prevedono una campagna di campionamento atta a prelevare materiale da diversi punti dell'opera che siano rappresentativi delle problematiche individuate, dei composti costituenti o di altri fattori che si vogliono indagare.

Una esemplificazione di classificazione delle metodologie analitiche utilizzabili nel campo dei Beni Culturali, ed in particolare nello studio delle opere pittoriche e dei materiali lapidei, si può trovare nella Norma italiana UNI 10945-2001 (Beni Culturali – Caratterizzazione degli strati pittorici. Generalità sulle tecniche analitiche impiegate) e nella Normal – 16/84 (Caratterizzazione di materiali lapidei in opera e del loro stato di conservazione: sequenza analitica) che descrivono, per questi specifici substrati, la tipologia dei campioni (frammento, sezione stratigrafica, materiale incoerente) ed elencano le tecniche diagnostiche che possono essere eseguite per la caratterizzazione dei materiali inorganici ed organici. Si sottolinea che tra le indagini micro-invasive, alcune permettono di utilizzare il campione per successive analisi, altre prevedono la completa distruzione del campione. La normativa esistente ha però ancora molti limiti, in quanto non definisce una procedura analitica consigliata, ma fornisce solo un elenco delle tecniche

analitiche utilizzate, riferendone a volte solo pregi e difetti ed affronta inoltre solo casi isolati e circoscritti (nello specifico strati pittorici e lapidei).
Sulla base delle richieste del restauratore e del conservatore e in riferimento alle problematiche manifestate dall'opera, il diagnosta per i Beni Culturali ha il compito invece di individuare e programmare la sequenza delle analisi da eseguire, partendo da quelle meno invasive fino a quelle più invasive, e la metodologia tecnica più adeguata al caso di studio che si sta affrontando.

Protocollo analitico per l'esecuzione delle indagini diagnostiche sul patrimonio culturale

Quando si parla di patrimonio culturale non bisogna limitarsi a considerare solo le diverse tipologie stilistiche, le tecniche esecutive e le categorie di oggetti, ma occorre principalmente riferirsi ai numerosi materiali che, in tutti i secoli più o meno recenti, l'uomo ha utilizzato per produrre oggetti e all'eterogeneità materica di cui un manufatto può essere costituito.
Il patrimonio culturale si suddivide in Beni mobili e Beni immobili aventi differenti tipologie, funzioni, età, significati, forme e dimensioni. Tuttavia l'elemento attraverso il quale si esplicano tutte queste caratteristiche è il materiale con cui il manufatto è realizzato: questo stesso materiale prima di essere messo in opera, o comunque prima di assumere la forma che lo identifica, ha subito opportuni trattamenti e processi di lavorazione (per es. si pensi alla stagionatura del legno, all'estrazione dei metalli o di un materiale lapideo) che hanno avuto lo scopo di renderlo più idoneo alla manipolazione ed all'elaborazione.
Sin dalle origini l'uomo ha sfruttato i materiali presenti in natura e ha messo a punto delle tecniche di lavorazione sempre più affinate e precise che lo hanno portato a scoprire anche nuovi materiali (per es. i metalli estratti dai minerali); oggi, a distanza di secoli, lo sviluppo dei materiali, che possono essere utilizzati per la creazione di un manufatto di arte, di oggetti di uso quotidiano o di opere di edilizia e che possono essere soggetti a studi diagnostici, viene dalla ricerca nell'ambito dell'industria chimica.
Le discipline scientifiche (fisica, chimica, biologia, ingegneria) mettono a disposizione dello studio del patrimonio culturale una serie di metodologie e di applicazioni tecniche non invasive e micro-invasive in grado di fornire indicazioni su diversi aspetti che riguardano il Bene oggetto di studio.
Tuttavia le numerose analisi scientifiche non possono essere utilizzate indiscriminatamente su tutte le tipologie di materiale, poiché ogni strumento ha caratteristiche tecniche che ne determinano il campo di applicazione. Per questo motivo si procede ad una classificazione dei materiali che si possono riscontrare nel patrimonio culturale e si elencano le indagini che ne permettono lo studio.
Nel campo dei manufatti del patrimonio culturale la prima grande suddivisione è tra materiali inorganici e materiali organici (Tabella 1).

Tabella 2.1.1 Classificazione dei materiali inorganici e organici

Nel campo delle analisi scientifiche si può individuare una suddivisione tra indagini non invasive ed

MATERIALI INORGANICI	MATERIALI ORGANICI
Materiali lapidei - Naturali con funzione strutturale-ornamentale (marmi e pietre) - Artificiali (ceramiche, terracotte, malte, intonaci, stucchi)	A base carboidratica (legno, tessuti, carta, gomme naturali)
Materiali metallici (metalli puri, leghe)	A base proteica (pergamena, adesivi, colle animali, uovo, caseina)
Pigmenti di origine minerale	A base lipidica (olio, cere, grassi)
Vetro, smalti	Pigmenti di origine animale e vegetale
Osso, avorio (compositi inorganico-organico)	A base polimerica: nitrocellulosa, polivinilacetato, cianoacrilati, resine acriliche, poliuretaniche, poliesteree, epossidiche, siliconiche, fluorurate

indagini micro invasive. Queste ultime a loro volta si suddividono in analisi non distruttive per il campione e analisi distruttive per il campione (Tabella 2).
In linea generale l'analisi di un manufatto avviene prima attraverso un'osservazione di tutte le sue caratteristiche macroscopiche che possono essere apprezzate ad occhio nudo o mediante delle lenti di ingrandimento al fine di ottenere una visione il più globale possibile sul suo stato di conservazione, sui materiali che lo costituiscono, su alterazioni e forme di degrado che si manifestano attraverso danni estetici, fisici, chimici, biologici, meccanici, su interventi di restauro.
Successivamente si procede con l'utilizzo di strumentazione non invasiva che permette di indagare la superficie del manufatto e di ottenere dati scientifici, di solito si tratta di immagini riprese con differenti sistemi operativi, con lo scopo di documentare l'opera, di fornirne una puntuale lettura attraverso una maggiore evidenza delle caratteristiche sopra elencate e di indirizzare quella che sarà la fase di campionamento. Esistono anche strumentazioni portatili che permettono di studiare la composizione elementare e molecolare (XRF, Raman, FT-IR) del materiale indagato senza necessità di campionamento.
Il campionamento, qualora fosse indispensabile per l'approfondimento analitico, è pianificato a partire dalle problematiche che devono essere indagate e risolte attraverso lo studio dei materiali. In questa fase devono essere garantiti alcuni requisiti: la rappresentatività dei campioni, il numero e le dimensioni minime dei prelievi, la non invasività del campionamento in termini di estetica e lettura dell'opera, il non inquinamento del campione.
Per quanto riguarda il campionamento si possono avere le seguenti caratteristiche metodologiche:

- Campione selettivo
- Campione stratigrafico
- Campione bulk

Inoltre i campioni possono avere le seguenti caratteristiche fisiche:

- Polvere
- Scaglia
- Soluzione

Dopo la scelta della tipologia di prelievo, i campioni sono documentati attraverso fotografie e poi possono essere sottoposti tal quali, ossia senza trattamento, a determinate analisi, oppure essere adeguatamente preparati e analizzati mediante indagini distruttive o non distruttive che prevedono diverse preparazioni: possono essere inglobati in resina epossidica, sottoposti a lappatura e lucidatura mediante panni con abrasivi di differente granulometria, possono essere ridotti in polvere, possono essere metallizzati, ecc.

INDAGINI NON INVASIVE	Analisi per la misurazione delle coordinate colorimetriche	C Colorimetro/Spettrofotometro	**INDAGINI INVASIVE**	**NON DISTRUTTIVE PER IL CAMPIONE**	Analisi in microscopia ottica	• In riflessione Vis, UV • In trasmissione
					Analisi chimiche su campione selettivo	• Spot test
					Analisi in microscopia elettronica	• SEM–EDS/WDS (Microscopio elettronico a scansione con microsonda elettronica) • TEM (Microscopio elettronico a trasmissione)
	Analisi che sfruttano onde elettromagnetiche per la restituzione di immagini	• Tecniche fotografiche speciali (Visibile, Fluorescenza UV, Infrarosso in bianco e nero, Infrarosso in falsi colori, Riflettografia IR) • Luce radente • Transluminescenza • Termografia IR • Radiografia e Tomografia a RX • Gammagrafia • Profilometria ottica			Analisi spettroscopiche	• Spettrofotometria IR • Spettrofotometria di assorbimento nel Vis e UV • Spettrometria di assorbimento atomico • Spettrometria di massa
					Analisi chimiche su stratigrafia	• Staining test
					Analisi per la datazione	• Dendrocronologia
	Analisi che sfruttano onde elettromagnetiche per lo studio della composizione chimica	• Fluorescenza dei Raggi X (strumentazione portatile)		**DISTRUTTIVE PER IL CAMPIONE**	Analisi cromatografiche	• Cromatografia su carta • Cromatografia su strato sottile • Cromatografia ionica • Gas-cromatografia • Pirolisi-gas-cromatografia con spettrometro di massa

	Analisi che sfruttano sonde per l'ispezione di oggetti	• Endoscopia • Analisi sonore e ad ultrasuoni			Analisi per la datazione	• Determinazione isotopica del ^{14}C • Termoluminescenza
	Analisi che sfruttano principi fisici per la restituzione di immagini 3D(rilievo per immagini)	• Fotogrammetria • Oleografia laser				
	Analisi per le condizioni termoigrometriche del manufatto	Sistemi di rilevamento a contatto (Igrometri termometri, sensori termometrici)				

Tabella 1.1.2 Classificazione delle indagini diagnostiche utilizzate nello studio dei Beni Culturali.

La definizione di un protocollo analitico per l'esecuzione delle indagini diagnostiche sul patrimonio culturale richiede di schematizzare le tecniche analitiche utilizzabili sui diversi materiali, riportandole in una sequenza logica in base alla loro importanza, a partire da quelle indispensabili fino a quelle complementari e di approfondimento. Nel seguito sono quindi riportate delle tabelle, una per ogni diverso materiale, in cui sono elencate, in sequenza logica, le diverse tecniche analitiche, il loro scopo ed i loro vantaggi e svantaggi, elencando prima le analisi non invasive e poi quelle invasive. Nel fare questa classificazione si è anche tenuto conto che l'Uomo, nell'utilizzare i materiali per la realizzazione delle opere d'arte, si basa sulle loro caratteristiche estetiche, strutturali, funzionali e decorative dei diversi materiali isolati o in combinazione con altri. Per questo motivo spesso non si ha a che fare con un manufatto monomaterico, ossia costituito di un solo materiale, ma con un oggetto polimaterico in cui la scelta e la collocazione dei differenti materiali, all'interno dell'oggetto, è avvenuta talvolta già a livello dell'ideazione talvolta in corso d'opera. Si portano ad esempio i dipinti, le sculture lignee policrome, gli oggetti metallici arricchiti con pietre preziose e smalti, gli edifici eseguiti con materiali da costruzione e poi rivestiti con lastre di marmo e decorati con stucchi; ma ancora più numerose e varie possono essere le combinazioni dei materiali riscontrabili nei Beni Culturali.

Per quanto riguarda lo studio diagnostico, si sottolinea che le tecniche scientifiche riguardanti un determinato materiale sono applicate sia nel caso di opera monomaterica sia nel caso di opera polimaterica in cui alcuni elementi sono stati eseguiti con quel dato materiale. Come caso esemplificativo, il riconoscimento della specie lignea di una trave di un soffitto di un palazzo e quello di una scultura lignea policroma viene eseguito applicando la medesima tecnica analitica. Le tabelle seguenti presentano le indagini scientifiche eseguibili per lo studio dei materiali che maggiormente si riscontrano nei Beni Culturali (materiale policromo, legno, materiali lapidei naturali e artificiali, tessuti, carta, metalli, materiali polimerici).

Inoltre per certi manufatti polimaterici risulta più utile, nel settore dei beni culturali, effettuare lo studio del manufatto nel suo insieme e non dei singoli materiali che lo compongono. Per questo motivo le tabelle che seguono prevedono, per alcuni casi polimaterici particolarmente significativi come i manufatti policromi, un protocollo specifico.

L'ordine delle tabelle sotto riportate è stato scelto in funzione dell'abbondanza dei diversi tipi di materiali all'interno della Villa Reale di Monza.

Manufatto policromo

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione delle caratteristiche macroscopiche: stato di conservazione, materiali, alterazioni e forme di degrado, interventi di restauro.	Conoscenza generale dell'opera, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Imaging multi-spettrale: Luce vsibile, Fluorescenza UV, Infrarosso in bianco e nero, Infrarosso in falsi colori, Riflettografia IR	Conoscenza preliminare delle caratteristiche dell'opera attraverso la risposta dei diversi materiali sottoposti a determinate radiazioni elettromagnetiche. Documentazione fotografica per la lettura dell'opera dallo strato superficiale (individuazione di interventi di restauro) a quelli più profondi (individuazione di pentimenti, rifacimenti non autografi, disegni preparatori modifiche del progetto esecutivo).	Utilizzo di radiazioni non nocive all'uomo, analisi di facile esecuzione, può essere effettuata anche in situ, previo accertamento della possibilità di schermare le fonti di illuminazione naturale e artificiale esistenti nell'ambiente di conservazione.	Lo stato di conservazione, la presenza di alcuni materiali (vernice, pigmenti a base di metalli pesanti) e il loro spessore possono complicare la lettura delle immagini.	Analisi non invasiva
Fotografia in luce radente, transluminescenza (solo per supporti tessili)	Documentazione fotografica per la valutazione del grado di planarità/tensionamento del supporto di un'opera, per l'individuazione delle lacune, cadute di colore, andamenti della superficie.	Analisi di facile esecuzione, utilizzo di radiazioni non nocive all'uomo; può essere effettuata anche in situ, previo accertamento della possibilità di schermare le fonti di illuminazione naturale e artificiale esistenti nell'ambiente di conservazione	Per la transluminescenza il dipinto deve essere illuminato dal verso per cui è richiesta la sua movimentazione dall'eventuale parete su cui è collocato.	Analisi non invasiva
Colorimetria	Caratterizzazione e classificazione dei pigmenti di un manufatto attraverso la misura delle coordinate colorimetriche, monitoraggio della variazione cromatica, talvolta non percepibile dall'occhio	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare la variazione cromatica di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale che viene	Analisi non invasiva

	umano, attraverso la valutazione del viraggio del colore di un materiale/pigmento a seguito di alterazione.		considerata come termine di confronto.	
Stereomicroscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto a basso ingrandimento e documentazione fotografica delle sue caratteristiche estetiche, morfologiche e materiche. Utile strumento anche per l'individuazione dei punti di particolare interesse su cui eseguire il prelievo sia per l'esecuzione del campionamento.	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione osservata.	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi non invasiva
Spettrofotometria di Fluorescenza a raggi X (XRF) (strumentazione portatile)	Caratterizzazione della composizione elementare di composti inorganici.	Strumentazione portatile. Analisi qualitativa e semi-quantitativa che può essere eseguita in situ.	Analisi non selettiva a livello stratigrafico (un punto di analisi fornisce uno spettro costituito dai picchi degli elementi presenti in superficie e negli strati sottostanti del manufatto); rileva gli elementi con $Z > 5$ (B). Problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Radiografia RX	Documentazione per immagini 2D di strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa, quindi non direttamente osservabili, mediante il diverso assorbimento di RX da parte dei materiali (elementi metallici, gallerie di insetti xilofagi, pigmenti a base di metalli pesanti, disegni preparatori e pentimenti, stesure sottostanti, tratti incisi, assemblaggio della struttura, interventi di restauro precedenti, autenticità di	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. Attualmente è in utilizzo la radiografia digitale che evita i problemi derivanti dalle dimensioni delle lastre radiografiche e del loro sviluppo.	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori. Nell'immagine bidimensionale non si riesce a discriminare la localizzazione degli elementi osservati nello spessore del manufatto.	Analisi non invasiva

	un'opera, stato di conservazione dei materiali costitutivi, caratteristiche del supporto)			
Tomografia RX	Documentazione per immagini 3D delle strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa e quindi non direttamente osservabili (presenza di elementi metallici, gallerie di insetti xilofagi, pigmenti a base di metalli pesanti, disegni preparatori, tratti incisi). L'acquisizione di immagini delle sezioni dell'oggetto ne permette la ricostruzione 3D.	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. E' un sistema digitale che permette attraverso specifici software di creare una immagine 3D dell'oggetto che può poi essere sezionata per mostrare la struttura interna del manufatto. Nell'immagine 3D, di ogni elemento rilevato si può studiare la sua posizione spaziale all'interno del manufatto indagato.	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Analisi IBA (PIXE, PIGE)	Analisi di pigmenti, coloranti, inchiostri. Studi di provenienza.	Analisi di oggetti di qualunque dimensione. Analisi qualitativa, quantitativa e multi-elementare, molto sensibile; elevata risoluzione; utilizzo di fasci esterni	Non sono necessari i prelievi a patto che il manufatto sia un bene mobile . E' indispensabile un acceleratore di particelle.	Analisi non invasiva; distruttiva
Termografia IR	Rilievo delle disomogeneità strutturali, non visibili ad occhio nudo, della superficie pittorica e del supporto (chiodi, gallerie di insetti xilofagi) e localizzazione delle zone di dispersione e/o accumulo termico.	Strumentazione portatile; analisi eseguibile in situ, le immagini si presentano come mappe termiche in falsi colori.	La tecnica non presenta particolari svantaggi.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica sul campione	Osservazione del campione a basso ingrandimento e documentazione fotografica del recto, verso e taglio. Studio delle caratteristiche morfologiche e	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi invasiva

	materiche (consistenza, colore, aspetto). Utile supporto per una preliminare analisi stratigrafica e dei materiali.	del campione		
Saggi microanalitici spot test	Riconoscimento di materiali organici e inorganici di origine naturale e artificiale. Determinazione degli ioni, che costituiscono le specie chimiche presenti in uno strato del campione prelevato in modo selettivo, attraverso specifiche reazioni chimiche che producono variazioni apprezzabili nei materiali (sviluppo di gas, formazione di composti colorati o di precipitati) ed osservabili al microscopio.	Analisi qualitativa e selettiva dato che viene eseguita su un campione selettivo sotto forma di polvere o scaglie. Sono sufficienti piccole quantità di campione. Fornisce una prima discriminazione tra i materiali utilizzati e indirizza la scelta sulle analisi da eseguire.	Non è possibile utilizzare il campione per un ulteriore test. La sensibilità dell'analisi dipende dalle caratteristiche dell'analita e dal suo stato di conservazione (invecchiamento, fattori di degrado) per questo motivo, talvolta, le reazione sono di difficile interpretazione.	Analisi invasiva e distruttiva per l'analita selezionato
Microscopia ottica e documentazione fotografica	Analisi in luce riflessa Vis o UV applicata su sezione stratigrafica o sul bulk del campione per lo studio preliminare morfologico-strutturale. Rende possibile la distinzione dei componenti di un campione per consistenza, colore, aspetto. Studio della stratigrafia di un campione pittorico e localizzazione dei componenti organici e inorganici mediante la risposta dei materiali alla radiazione UV.	Analisi qualitativa e morfologica che sfrutta elevati ingrandimenti, serve come osservazione preliminare alle successive indagini diagnostiche. Acquisizione di immagini tramite macchina fotografica anche digitale.	Elevati ingrandimenti non permettono di ottenere una buona messa a fuoco di superfici non planari, pertanto qualora siano necessari elevati ingrandimenti è consigliata l'osservazione di sezioni sottili del campione.	Analisi invasiva
Saggi microanalitici staining test	Riconoscimento di materiali organici e inorganici di origine naturale ed artificiale. Determinazione degli ioni, che costituiscono le specie chimiche presenti in un campione stratigrafico, attraverso specifiche reazioni chimiche che producono variazioni apprezzabili nei materiali (in prevalenza formazione di composti colorati) ed osservabili al	Analisi qualitativa e selettiva (utilizzata soprattutto per grassi, proteine e gesso). Si possono eseguire differenti tests su un unico campione, infatti la reazione avviene sull'interfaccia per cui è sufficiente lappare questa porzione superficiale per avere a disposizione un'altra	La sensibilità dell'analisi dipende dalle caratteristiche dell'analita e dal suo stato di conservazione (invecchiamento, fattori di degrado) per questo motivo, talvolta, le reazione sono di difficile interpretazione.	Analisi invasiva, micro-distruttiva per il campione

	microscopio.	superficie pulita. Fornisce una prima discriminazione sui materiali utilizzati e sulla loro localizzazione all'interno del campione stratigrafico, e quindi indirizza la scelta sulle analisi da eseguire.		
Spettrofotometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR, Micro FT-IR)	Analisi che permette il riconoscimento di sostanze organiche (resine, leganti, adesivi) e di alcune inorganiche (carbonati, solfati, silicati e altri) mediante l'assorbimento caratteristico della radiazione IR da parte dei legami chimici presenti nei composti che costituiscono il campione.	Analisi qualitativa di campioni buona versatilità grazie alle differenti modalità di misura (trasmissione, riflessione, ATR).	Non tutti i legami presentano la stessa sensibilità; a volte ci si trova in a volte ci si trova in difficoltà nell'interpretazione degli spettri in presenza di sistemi complessi e miscele a causa della sovrapposizione di picchi.	Analisi non invasiva/invasiva/ talvolta distruttiva per il campione
Spettroscopia Raman (Micro Raman)	Analisi che fornisce Analisi che fornisce spettri vibrazionali caratteristici della molecola, utile , utile per la distinzione della cella cristallina e del tipo di legame.	Analisi qualitativa, non invasiva, complementare all'analisi FT-IR, utilizza diverse sorgenti.	In presenza di alcuni composti si evidenziano a volte problemi legati a fenomeni di luminescenza del campione	Analisi invasiva/ non invasiva
Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Osservazioni morfologiche della superficie del campione, caratterizzazione elementare dei componenti chimici e loro mappatura all'interno di stratigrafie. Analisi di materiali per lo più inorganici amorfi o cristallini (pigmenti, strati di preparazione, imprimitura).	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale o su un sezione stratigrafica. E' utile per lo studio di materiali complessi. Fornisce una visione del campione realistica, tridimensionale, ad elevati ingrandimenti ed in scala di grigi. La microanalisi permette di eseguire analisi elementare di singole particelle che costituiscono il campione.	Necessita la metallizzazione dei campioni per renderli conduttivi. La microanalisi rileva gli elementi con Z > 5 (B). Poco adatta per l'analisi morfologica di componenti organici in quanto altera la loro struttura inoltre la microanalisi proprio per la natura chimica di questi analiti (C, O, N) non riesce a riconoscere il legame in cui sono coinvolti.	Analisi invasiva e micro-distruttiva
	Analisi di sostanze organiche (leganti, cere, adesivi, gomme naturali coloranti	Analisi qualitativa e quantitativa di elevata	Il campione deve essere volatile, altrimenti è sottoposto	Analisi invasiva, distruttiva per il

Gas cromatografia Gas-pirolisi Pirolisi-gas-massa	organici, resine, polisaccaridi), utilizzate nella realizzazione delle opere e negli interventi di restauro, attraverso un sistema di ripartizione selettiva dei componenti costitutivi.	sensibilità (ppm), che identifica il tipo di sostanza organica e consente la separazione di miscele, anche complesse, di composti organici.	ad un pretrattamento per ottenere derivati volatili; lo strumento richiede un'accurata preparazione prima dell'analisi.	campione
Tecniche cromatografiche (cromatografia su carta, cromatografia su strato sottile)	Analisi di sostanze organiche, provenienti da un estratto del campione, attraverso un sistema di ripartizione selettiva dei componenti costitutivi.	Analisi qualitativa, selettiva e di elevata sensibilità che permette il riconoscimento delle sostanze organiche sulla base dei tempi di ritenzione e anche a seguito di test di colorazione specifica.	Analisi non quantitativa; utilizzo di difficili procedure per l'estrazione dell'analita dal campione, talvolta l'estrazione può risultare incompleta.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Spettrofotometria UV-Vis	Analisi di sostanze organiche, per lo più lacche, coloranti naturali e di sintesi.	Analisi qualitativa e quantitativa.	Il campione contenente l'analita di interesse deve essere opportunamente trattato al fine di ottenere una soluzione acquosa. L'estrazione in alcuni casi porta alla decomposizione dell'analita e quindi ad un'errata analisi. La sensibilità dipende dall'analita e dalla sua concentrazione nel campione in cui è inserito	Analisi invasiva e distruttiva per il campione
Analisi termica differenziale (DTA)	Caratterizzazione di materiali organici (leganti, vernici, adesivi) in grado di subire trasformazioni chimiche e/o fisiche a seguito del riscaldamento del campione.	Analisi quali e quantitativa molto sensibile; sono necessarie piccole quantità di campione, il campione non deve essere pretrattato, elevato potere di discriminazione.	Bassa selettività in presenza di miscele troppo complesse, interferenze dovute a reazioni chimiche e a comportamenti fisici del campione non controllabili che vanno a sommarsi al dato finale.	Analisi invasiva e distruttiva per il campione

Legno

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione delle caratteristiche macroscopiche: stato di conservazione, materiali, alterazioni e forme di degrado, interventi di restauro.	Conoscenza generale dell'opera, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Imaging multi-spettrale: Visibile, Fluorescenza UV, Infrarosso in bianco e nero, Infrarosso in falsi colori, Riflettografia IR	Conoscenza preliminare delle caratteristiche dell'opera attraverso la risposta dei materiali sottoposti a determinate radiazioni elettromagnetiche. Documentazione fotografica per la lettura dell'opera dallo strato superficiale (individuazione di interventi di restauro, vernice) a quelli più profondi (individuazione di pentimenti, rifacimenti non autografi, disegni preparatori modifiche del progetto esecutivo).	Utilizzo di radiazioni non nocive all'uomo, analisi di facile esecuzione, può essere effettuata anche in situ, previo accertamento della possibilità di schermare le fonti di illuminazione naturale e artificiale esistenti nell'ambiente di conservazione.	Lo stato di conservazione, la presenza di alcuni materiali sovrapposti al supporto ligneo(vernice, pigmenti a base di metalli pesanti) e il loro spessore possono complicare la lettura delle immagini.	Analisi non invasiva
Fotografia in luce radente	Documentazione fotografica per la valutazione del grado di planarità del supporto di un'opera, e degli andamenti della superficie (imbarcamento, svergolatura).	Analisi di facile esecuzione, utilizzo di radiazioni non nocive all'uomo; può essere effettuata anche in situ, previo accertamento della possibilità di schermare le fonti di illuminazione naturale e artificiale esistenti nell'ambiente di conservazione	La tecnica non evidenzia svantaggi particolari.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto a basso ingrandimento e documentazione fotografica delle sue caratteristiche estetiche,	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi non invasiva

	morfologiche e materiche. Utile strumento anche per l'individuazione dei punti di particolare interesse su cui eseguire il prelievo e per l'esecuzione del campionamento.	osservata.		
Radiografia RX	Documentazione per immagini 2D di strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa, quindi non direttamente osservabili, mediante il diverso assorbimento di RX da parte dei materiali (elementi metallici, gallerie di insetti xilofagi, pigmenti a base di metalli pesanti, disegni preparatori e pentimenti, stesure sottostanti, tratti incisi, assemblaggio della struttura, interventi di restauro precedenti, autenticità di un'opera, stato di conservazione dei materiali costitutivi, caratteristiche del supporto)	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. Attualmente è in utilizzo la radiografia digitale che evita i problemi derivanti dalle dimensioni delle lastre radiografiche e dal loro sviluppo.	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX ed alla sicurezza degli operatori. Nell'immagine bidimensionale non si riesce a discriminare la localizzazione degli elementi osservati nello spessore del manufatto.	Analisi non invasiva
Tomografia RX	Documentazione per immagini 3D delle strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa e quindi non direttamente osservabili (presenza di elementi metallici, gallerie di insetti xilofagi, pigmenti a base di metalli pesanti, disegni preparatori, tratti incisi). L'acquisizione di immagini delle sezioni dell'oggetto ne permette la ricostruzione 3D.	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. E' un sistema digitale che permette attraverso specifici software di creare una immagine 3D dell'oggetto che può poi essere sezionata per mostrare la struttura interna del manufatto. Nell'immagine 3D, di ogni elemento rilevato si può studiare la sua posizione	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva

		spaziale all'interno del manufatto indagato.		
Stereomicroscopia ottica sul campione	Osservazione del campione a basso ingrandimento e documentazione fotografica del recto, verso e taglio. Studio delle caratteristiche morfologiche e materiche (consistenza, colore, aspetto). Utile supporto per una preliminare analisi stratigrafica e dei materiali.	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali del campione	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi invasiva
Microscopia ottica e documentazione fotografica	Analisi in luce riflessa Vis o UV applicata su sezione stratigrafica o sul bulk del campione per lo studio preliminare morfologico-strutturale. Rende possibile la distinzione dei componenti di un campione per consistenza, colore, aspetto. Dall'osservazione della sezione tangenziale è possibile il riconoscimento della specie lignea. Studio della stratigrafia di un campione ligneo e localizzazione dei componenti organici e inorganici mediante la risposta dei materiali alla radiazione UV.	Analisi qualitativa e morfologica che sfrutta elevati ingrandimenti, osservazione preliminare alle successive indagini diagnostiche. Acquisizione di immagini tramite macchina fotografica anche digitale.	Elevati ingrandimenti non permetto di ottenere una buona messa a fuoco di superfici non planari, pertanto, qualora siano necessari elevati ingrandimenti, è consigliata l'osservazione di sezioni sottili del campione.	Analisi invasiva
Spettrofotometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR, Micro FT-IR)	Analisi e riconoscimento di sostanze organiche (resine, leganti, adesivi) e di alcune inorganiche (carbonati, solfati, silicati) mediante l'assorbimento caratteristico della radiazione IR da parte dei legami chimici presenti nei composti che costituiscono il campione.	Analisi qualitativa di campioni con buona versatilità grazie alle differenti modalità di misura (trasmissione, riflessione, ATR).	Non tutti i legami presentano la stessa sensibilità; a volte ci si trova in difficoltà nell'interpretazione degli spettri in presenza di sistemi complessi e miscele a causa della sovrapposizione di picchi.	Analisi non invasiva/invasiva/ talvolta distruttiva per il campione

Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Osservazioni morfologiche della superficie del campione, caratterizzazione elementare dei componenti chimici e loro mappatura all'interno di stratigrafie. Analisi di materiali per lo più inorganici amorfi o cristallini (pigmenti, strati di preparazione, imprimitura).	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale o su un sezione stratigrafica. E' utile per lo studio di materiali complessi. Fornisce una visione del campione realistica, tridimensionale, ad elevati ingrandimenti ed in scala di grigi. La microanalisi permette di eseguire analisi elementare di singole particelle che costituiscono il campione.	Necessita la metallizzazione del campione per renderlo conduttivo. La microanalisi rileva gli elementi con Z > 5 (B). Poco adatta per l'analisi morfologica di componenti organici in quanto altera la loro struttura inoltre la microanalisi proprio per la natura chimica di questi analiti (C, O, N) non riesce a riconoscere i legami chimici in cui sono coinvolti.	Analisi invasiva
Gas cromatografia Gas-pirolisi	Analisi di sostanze organiche (leganti, cere, adesivi, gomme naturali coloranti organici, resine, polisaccaridi), utilizzate come finitura o protezione della superficie lignea, attraverso un sistema di ripartizione selettiva dei componenti costitutivi.	Analisi qualitativa e quantitativa di elevata sensibilità (ppm), che identifica il tipo di sostanza organica e consente la separazione di miscele, anche complesse, di composti organici.	Il campione deve essere volatile, altrimenti è sottoposto ad un pretrattamento per ottenere derivati volatili; lo strumento richiede un'accurata preparazione prima dell'analisi.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Determinazione isotopica del ^{14}C	Datazione di reperti organici caratterizzati dal contenuto di carbonio.	Analisi quantitativa; è sufficiente 1 mg di campione	A causa del tempo di decadimento dell'isotopo ^{14}C, la tecnica fornisce risultati significativi sui reperti antichi relativi ai settori dell'archeologia, antropologia, paleontologia, geologia; mentre i risultati non sono sempre attendibili su manufatti recenti. Maggiore è la quantità di campione più corretta è la misura; alcune interferenze che inficiano l'analisi possono derivare da fattori ambientali	Analisi invasiva, distruttiva per il campione

			verificatisi durante la vita del reperto.	
Dendrocronologia	Datazione di manufatti lignei attraverso la comparazione tra la curva dendrocronologia, ottenuta dall'analisi degli anelli di accrescimento della pianta di sconosciuta datazione, e le curve standard di legni antichi di datazione certa	Gli studi di datazione permettono di svolgere ricerche di attribuzione.	Non tutte le specie arboree hanno anelli di accrescimento ben distinguibili; campioni con meno di 30 anelli di accrescimento non forniscono analisi accurate. E' necessario avere a disposizione esaustivi database per il confronto con curve di materiale noto.	Analisi non invasiva

Materiali lapidei naturali e artificiali (marmo, pietra, stucchi, ceramica, terracotta)

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione delle caratteristiche macroscopiche: stato di conservazione, materiali, alterazioni e forme di degrado, interventi di restauro.	Conoscenza generale dell'opera, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Fotografia nel Visibile	Documentazione fotografica delle caratteristiche morfologiche, estetiche, materiche, conservative del manufatto.	L'immagine conserva i colori reali del manufatto, è necessaria come supporto per l'interpretazione delle immagini in UV.		Analisi non invasiva
Fotografia a Fluorescenza UV	Documentazione fotografica del degrado, individuazione di sali solubili e altre forme di alterazione	Primaria individuazione delle aree alterate; utile indicazione per la scelta dei punti di prelievo.	L'interpretazione delle immagini dipende molto dalla risposta dei materiali alla sollecitazione con la radiazione UV.	Analisi non invasiva
Colorimetria	Caratterizzazione e classificazione cromatica di un manufatto attraverso la misura delle coordinate colorimetriche; monitoraggio della variazione cromatica, talvolta non percepibile dall'occhio umano, attraverso la valutazione del viraggio del colore di un materiale a seguito di alterazione.	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare la variazione cromatica di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale che viene considerata come termine di confronto.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto a basso ingrandimento e documentazione fotografica delle sue caratteristiche estetiche, morfologiche e materiche. Utile strumento anche per l'individuazione dei punti di	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione osservata.	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi non invasiva

	particolare interesse su cui eseguire il prelievo sia per l'esecuzione del campionamento.			
Spettrofotometria di Fluorescenza a raggi X (XRF) (strumentazione portatile)	Caratterizzazione della composizione elementare dei composti del materiale lapideo e delle forme di alterazione di composizione inorganica.	Strumentazione portatile. Analisi qualitativa e semi-quantitativa che può essere eseguita in situ.	Analisi non selettiva a livello stratigrafico (un punto di analisi fornisce uno spettro costituito dai picchi degli elementi presenti in superficie e negli strati sottostanti del manufatto); rileva gli elementi con Z > 5 (B). Problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Analisi IBA (PIXE, PIGE)	Analisi di pigmenti, minerali. Studi di provenienza.	Analisi di oggetti di qualunque dimensione. Analisi qualitativa, quantitativa e multi-elementare di elementi in traccia, molto sensibile; elevata risoluzione; utilizzo di fasci esterni	Non sono necessari i prelievi a patto che il manufatto sia un bene mobile. E' indispensabile un acceleratore di particelle.	Analisi non invasiva
Ultrasuoni	Indagine acustica che consente l'ispezione interna di materiali o di oggetti: localizzazione dei difetti, valutazione della loro entità e profondità, verifica dell'efficacia dei trattamenti di consolidamento.	Strumentazione portatile, l'analisi può essere eseguita in situ.	Lacune e fessurazioni di dimensioni troppo esigue possono non essere rilevate.	Analisi non invasiva
Termografia IR	Rilievo delle disomogeneità strutturali non visibili ad occhio nudo dovute a particolarità interne alla materia o a materiali solo apparentemente omogenei (disomogeneità strutturali, mappatura dei fronti di umidità e localizzazione delle zone di dispersione/accumulo termico,	Strumentazione portatile; analisi eseguibile in situ, le immagini si presentano come mappe termiche in falsi colori.	La tecnica non evidenzia svantaggi particolari.	Analisi non invasiva

	individuazione di interventi pregressi nella struttura)			
Fotogrammetria	Applicazione in ambito architettonico: documentazione della forma e delle dimensioni per la valutazione dei processi di alterazione dimensionale nel tempo mediante confronto di rilievi ottenuti periodicamente, per il rilevamento planimetrico ed altimetrico, per il rilievo architettonico.	Indispensabile base conoscitiva su base geometrica e dello stato di conservazione, sull'oggetto nel suo insieme. Mappa di lavoro per l'integrazione delle osservazione a più scale di osservazione e dei dati analitici via via raccolti sulle differenti porzioni materiche dell'oggetto	Necessità di requisiti minimi di spazio per il rilievo e di stabilità delle apparecchiature; risulta talvolta difficoltoso quando l'oggetto è in situ	Analisi non invasiva
Gammagrafia	Documentazione per immagini di strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa e quindi non direttamente osservabili.	L'elevata penetrazione dei raggi γ permette di indagare gli strati che si trovano sotto materiali a bassa trasparenza costituenti corpi spessi come alcuni manufatti lapidei (es. statue, monumenti)	Problemi legati sia al trasporto ed all'utilizzo delle sorgenti radio-isotopiche per la generazione dei Raggi γ sia alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Tomografia (sulle ceramiche)	Documentazione per immagini 3D delle strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa e quindi non direttamente osservabili (presenza di elementi metallici, gallerie di insetti xilofagi, pigmenti a base di metalli pesanti, disegni preparatori, tratti incisi). L'acquisizione di immagini delle sezioni dell'oggetto ne permette la ricostruzione 3D.	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. E' un sistema digitale che permette attraverso specifici software di creare una immagine 3D dell'oggetto che può poi essere sezionata per mostrare la struttura interna del manufatto. Nell'immagine 3D, di ogni elemento rilevato si può studiare la sua posizione spaziale all'interno del manufatto indagato.	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva

Spettrofotometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR, Micro FT-IR)	Analisi che permette il riconoscimento di sostanze organiche (resine, leganti, adesivi) e di alcune inorganiche (carbonati, solfati, silicati) mediante l'assorbimento caratteristico della radiazione IR da parte dei legami chimici presenti nei composti che costituiscono il campione.	Analisi qualitativa di campioni con buona versatilità grazie alle differenti modalità di misura (trasmissione, riflessione, ATR).	Non tutti i legami presentano la stessa sensibilità; a volte ci si trova in difficoltà nell'interpretazione degli spettri in presenza di sistemi complessi e miscele a causa della sovrapposizione di picchi.	Analisi non invasiva/invasiva/ talvolta distruttiva per il campione
Spettroscopia Raman (Micro Raman)	Analisi che fornisce spettri vibrazionali caratteristici della molecola, utile per la distinzione della cella cristallina e del tipo di legame.	Analisi qualitativa, non invasiva, complementare all'analisi FT-IR, utilizza diverse sorgenti.	In presenza di alcuni composti si evidenziano a volte problemi legati a fenomeni di luminescenza del campione.	Analisi invasiva/ non invasiva
Stereomicroscopia ottica del campione	Osservazione del campione a basso ingrandimento e documentazione fotografica di recto, verso e taglio. Descrizione macroscopica mineralogico-petrografica, studio morfologico e materico dell'eventuale degrado superficiale e profondo. Utile supporto per una preliminare analisi stratigrafica e dei materiali.	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione osservata.	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi invasiva
Microscopia ottica	Studio morfologico-strutturale di un campione tal quale, osservato in luce riflessa e in UV per la distinzione tra materiale lapideo e forme di alterazione e/o di una sezione sottile osservata in luce trasmessa che permette il riconoscimento delle fasi mineralogiche.	Analisi qualitativa eseguita su sezione sottile. Possono essere acquisite immagini tramite macchina fotografica anche digitale.	Elevati ingrandimenti non permetto di ottenere una buona messa a fuoco di superfici non planari, pertanto, qualora siano necessari elevati ingrandimenti, è consigliata l'osservazione di sezioni sottili del campione.	Analisi invasiva
	Determinazione qualitativa di specie	Analisi selettiva la cui sensibilità	Non è possibile utilizzare il	Analisi invasiva,

Saggi microanalitici spot test	chimiche (anioni e cationi) presenti in un campione in polvere attraverso specifiche reazioni chimiche che producono variazioni apprezzabili ai materiali (sviluppo di gas, formazione di composti colorati o di precipitati).	dipende dalle caratteristiche dell'analita. Fornisce una prima discriminazione tra i materiali utilizzati e indirizza la scelta sulle analisi da eseguire.	campione per un'ulteriore test/analisi.	distruttiva per l'analita selezionato
Diffrazione a raggi X	Analisi su polvere: riconoscimento delle fasi cristalline (componenti del litotipo, sali inquinanti, forme di degrado), indicazione della composizione cristallina e della formula chimica del campione.	Analisi qualitativa e semi-quantitativa di campioni in polvere, in prevalenza di natura inorganica.	Sono analizzabili solo campioni con struttura cristallina. Le quantità necessarie di campione sono elevate, l'analisi di miscele complesse fornisce dati di difficile interpretazione, le interferenze sono dovute a sovrapposizione di picchi di diffrazione	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Cromatografia ionica	Determinazione di sostanze inorganiche, in particolare anioni e cationi, tra cui gli agenti inquinanti (nitrati, solfati, cloruri).	Analisi qualitativa e quantitativa capace di identificare in modo inequivocabile il tipo di ione presente in soluzione. Metodo selettivo e di elevata sensibilità.	E' necessaria l'estrazione dell'analita dal campione; l'identificazione avviene per confronto con adeguati standard trattati come il campione.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Spettroscopia di assorbimento ed emissione atomiche	Analisi degli elementi chimici in traccia (ppm-ppb) che costituiscono il materiale stesso o i prodotti di alterazione come i sali delle efflorescenze.	Analisi quali-quantitativa di elevata sensibilità	Essendo un'analisi elementare non fornisce indicazioni sulla natura del composto a cui appartiene l'elemento rilevato; il campione deve essere disciolto in soluzione acquosa; il pretrattamento del campione a volte può complicare l'analisi chimica del composto	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Analisi di materiali per lo più inorganici (pigmenti, strati di preparazione, imprimitura, litotipi). Osservazioni morfologiche,	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale, su una sezione stratigrafica o su una sezione	Necessita la metallizzazione dei campioni per renderli conduttivi. Poco adatta per l'analisi di componenti organici in quanto	Analisi invasiva, micro-distruttiva

	caratterizzazione elementare dei componenti chimici e loro mappatura all'interno di stratigrafie e/o sezioni sottili.	sottile; visione ingrandita e realistica del campione, elevati ingrandimenti. La microanalisi permette di eseguire analisi elementare di singole particelle che costituiscono il campione.	produce perturbazioni strutturali su di essi e la microanalisi proprio per la natura di questi analiti (C, O, N) non riesce a riconoscere il legame in cui sono coinvolti.	
Analisi termica differenziale (DTA)	Caratterizzazione di materiali inorganici (pigmenti, cariche minerali aggiunte in materiali organici) in grado di subire trasformazioni chimiche e/o fisiche con il riscaldamento del campione.	Analisi quali e quantitativa molto sensibile; sono necessarie piccole quantità di campione, il campione non deve essere pretrattato, elevato potere di discriminazione.	Bassa selettività in presenza di miscele troppo complesse, interferenze dovute a reazioni chimiche e a comportamenti fisici del campione che non possono essere controllate né evitate e che vanno a sommarsi al dato finale.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Termoluminescenza	Datazione dei reperti ceramici.		Sono necessarie elevate quantità (100mg) di polvere del materiale da datare; il campione deve provenire da uno strato profondo del manufatto da datare.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione

Tessuti

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	LIMITI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione delle caratteristiche macroscopiche: stato di conservazione, struttura e lavorazione del tessuto (armatura), alterazioni e forme di degrado, interventi di restauro (risarcimenti e suture), colorazione e opacità.	Conoscenza generale dell'opera, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica e Microscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto ad ingrandimenti crescenti e documentazione fotografica delle sue caratteristiche estetiche, morfologiche e materiche attraverso strumentazione dotata di fermo-immagine. Utile supporto per l'approfondimento dello studio delle caratteristiche (natura delle fibre, armatura, torsione, tipologia del tessuto, numero dei fili di trama e ordito per cm, presenza di parassiti o tracce di attacco biologico, aggiunta di applicazioni, presenza di rammendi o di lacerazioni), per l'individuazione delle irregolarità tessiturali dovute alla messa in opera del manufatto (deformazione dell'armatura, aumento della distanza tra un filo e l'altro, ecc.), per la scelta dei punti di particolare interesse su cui eseguire il prelievo e per l'esecuzione del	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica e a colori reali della porzione osservata.	Stereomicroscopia ottica: basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea. Microscopia ottica: ad elevati ingrandimenti difficoltà nella messa a fuoco di piani non planari.	Analisi non invasiva

	campionamento.			
Imaging multi-spettrale: Visibile, Fluorescenza UV	Conoscenza preliminare delle caratteristiche dell'opera attraverso la risposta dei materiali sottoposti alle radiazioni elettromagnetiche Vis e UV. Documentazione fotografica per la lettura del manufatto, del suo stato di conservazione e di eventuali trattamenti superficiali eseguiti per migliorare le caratteristiche intrinseche del tessuto (colle, amidi, cere).	Utilizzo di radiazioni non nocive all'uomo, analisi di facile esecuzione, può essere effettuata anche in situ, previo accertamento della possibilità di schermare le fonti di illuminazione naturale e artificiale esistenti nell'ambiente di conservazione.	Lo stato di conservazione potrebbe complicare la lettura delle immagini.	Analisi non invasiva
Spettrofotometria di Fluorescenza dei Raggi X (XRF) (strumentazione portatile)	Caratterizzazione della composizione elementare dei composti del materiale tessile, in particolare analisi della presenza di elementi chimici che possono aver indotto meccanismi di degradazione, quali, ad esempio, metalli pesanti o inquinanti.	Strumentazione portatile. Analisi qualitativa e semi-quantitativa che può essere eseguita in situ.	Analisi non selettiva a livello stratigrafico (un punto di analisi fornisce uno spettro costituito dai picchi degli elementi presenti in superficie e negli strati sottostanti del manufatto); rileva gli elementi con $Z > 5$ (B). Problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Analisi mediante pressometro	Analisi del comportamento reologico del manufatto attraverso la misura della reazione alla forza imposta (RFI)	Analisi molto semplice che permette di avere delle prime indicazioni sul comportamento del materiale sottoposto a sollecitazioni di tipo meccanico.	La tecnica non evidenzia svantaggi particolari.	Analisi non invasiva
Colorimetria	Caratterizzazione cromatica di un tessuto attraverso la misura delle coordinate colorimetriche; monitoraggio della variazione cromatica, talvolta non percepibile dall'occhio umano, attraverso la	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare la variazione cromatica di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale che viene considerata come termine di	Analisi non invasiva

	valutazione del viraggio del colore del materiale a seguito di alterazione.		confronto.	
Fotografia in luce radente, transluminescenza	Documentazione fotografica per la valutazione del grado di tensionamento del supporto tessile, per l'individuazione delle irregolarità tessiturali dovute alla messa in opera del manufatto (deformazione dell'armatura, aumento della distanza tra un filo e l'altro, ecc.).	Analisi di facile esecuzione, utilizzo di radiazioni non nocive all'uomo; può essere effettuata anche in situ, previo accertamento della possibilità di schermare le fonti di illuminazione naturale e artificiale esistenti nell'ambiente di conservazione	Per la transluminescenza il dipinto deve essere illuminato dal verso per cui è richiesta la sua movimentazione dall'eventuale parete su cui è collocato.	Analisi non invasiva
Microscopia a forza atomica (AFM)	Studio morfologico della superficie per la restituzione di un'immagine tridimensionale riferita alle caratteristiche e all'andamento della superficie (evidenza delle irregolarità, della non planarità del materiale)	Possibilità di utilizzare il microscopio nella modalità non contact mode per evitare che il contatto possa modificare le caratteristiche superficiali del materiale da indagare. Le scansioni vengono eseguite su numerose aree del campione, di dimensioni e in numero sufficiente per fornire risultati statisticamente significativi. Correlazione tra l'aspetto superficiale e i fattori di degrado che interessano il	L'analisi è effettuabile solo su aree localizzate del campione e non è possibile una mappatura totale, se non in tempi estremamente lunghi.	Analisi non invasiva

		materiale.		
Microscopia ottica e documentazione fotografica	Analisi in luce riflessa Vis o UV applicata su sezione lucida o sul bulk del campione per lo studio preliminare morfologico-strutturale del campione.	Analisi qualitativa e morfologica che sfrutta elevati ingrandimenti, osservazione preliminare alle successive indagini diagnostiche. Acquisizione di immagini tramite macchina fotografica anche digitale.	Elevati ingrandimenti non permettono di ottenere una buona messa a fuoco di superfici non planari, pertanto, qualora siano necessari elevati ingrandimenti, è consigliata l'osservazione di sezioni opportunamente tagliate con il microtomo	Analisi invasiva
Spettrofotometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR, Micro FT-IR)	Analisi e riconoscimento di sostanze organiche caratteristiche sia dei materiali tessili naturali, animali e vegetali, e sintetici (fibre cellulosiche, proteiche, poliammidiche, acriliche, poliestere, polipropileniche, poliviniliche), sia dei trattamenti per migliorare le proprietà fisico-meccaniche intrinseche (adesivi, cere, amidi, plastificanti) , mediante l'assorbimento caratteristico della radiazione IR da parte dei legami chimici presenti nei composti che costituiscono il campione.	Analisi qualitativa di campioni con buona versatilità grazie alle differenti modalità di misura (trasmissione, riflessione, ATR).	Non tutti i legami presentano la stessa sensibilità; a volte ci si trova in difficoltà nell'interpretazione degli spettri in presenza di sistemi complessi e miscele a causa della sovrapposizione di picchi. I segnali dell'acqua legati alla cellulosa influenzano la misura poiché nascondono bande tipiche di alcuni componenti dei materiali cellulosici.	Analisi non invasiva/invasiva/ talvolta distruttiva per il campione
Spettroscopia Raman (Micro Raman)	Analisi che fornisce spettri vibrazionali caratteristici della molecola, utile per la distinzione della cella cristallina e del tipo di legame. L'analisi permette il riconoscimento dei gruppi funzionali che si sono formati nel corso dell'invecchiamento al fine di pianificare interventi di conservazione del materiale.	Analisi qualitativa, non invasiva, complementare all'analisi FT-IR, utilizza diverse sorgenti di irradiazione, rapidità delle misure.	In presenza di alcuni composti si evidenziano a volte problemi legati a fenomeni di luminescenza del campione. I segnali dell'acqua legati alla cellulosa non influenzano la misura.	Analisi invasiva/ non invasiva

Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Osservazione morfologica delle fibre sia a fasci che singole, individuazione di attacco biologico, forme di degrado /alterazione, struttura dell'armatura. Caratterizzazione delle fibre tessili e delle loro modificazioni indotte da trattamenti tecnologici, da cause accidentali, da agenti naturali, chimici, fisici, meccanici. Caratterizzazione preliminare dello stato di degrado del substrato; valutazione dell'efficacia dell'intervento conservativo; esame del substrato restaurato al fine di verificare periodicamente lo stato di conservazione. Analisi elementare di eventuali sostanze inorganiche.	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale o su una sezione stratigrafica; utile per lo studio di materiali complessi; fornisce una visione del campione realistica, tridimensionale, ad elevati ingrandimenti ed in scala di grigi. La microanalisi permette di eseguire analisi elementare di singole particelle che costituiscono il campione.	Pre-trattamento del campione da analizzare mediante estrazione in acqua all'ebollizione e in etere al fine di eliminare tracce di sporco e di sotanze estranee. Scelta delle fibre da indagare e loro metallizzazione per rendere il materiale conduttivo. La microanalisi rileva gli elementi con $Z > 5$ (B). Poco adatta per l'analisi morfologica di componenti organici in quanto altera la loro struttura inoltre la microanalisi proprio per la natura chimica di questi analiti (C, O, N) non è in grado di riconoscere in quale legame sono coinvolti, tuttavia è in grado di rilevare elementi chimici responsabili di alcune forme di degrado (ossidi e inquinanti)	Analisi invasiva, micro-distruttiva
Misura del pH	Analisi della acidità o alcalinità del tessuto.	L'analisi è utile per riconoscere la tipologia di tessuto e per individuare se si sono innescati meccanismi di degradazione.	Il campione deve essere opportunamente trattato.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Saggi con colorazione specifica	Analisi che sfruttano l'interazione tra un reagente e il tessuto sviluppando una colorazione specifica che indica la presenza di un determinato composto (es. lignina, sericina)	Riconoscimento di composti caratteristici e identificazione della tipologia di tessuto che non necessitano l'utilizzo di una specifica strumentazione.	Necessita quantitativi abbastanza rilevante di campione poiché per ogni test serve un frammento.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Analisi mediante dinamometro	Studio della tenacità dei filati (rif. UNI1932).	L'analisi fornisce informazioni sulle proprietà meccaniche	Necessità di una elevate quantità di campione.	Analisi invasiva, distruttiva per il

		del tessuto e di come si modificano in seguito a processi naturali o artificiali, quali l'invecchiamento o il consolidamento.		campione
Grado di polimerizzazione medio viscosi metrico (DP) del materiale fibroso cellulosico	Analisi viscosimetrica per la determinazione dell'indice di depolimerizzazione del materiale cellulosico e per la valutazione dello stato di conservazione del tessuto. (rif. UNI 8282)	Dal DP è possibile ricavare il valore percentuale dei legami scissi e capire quindi il grado di invecchiamento del materiale fibroso.	Necessita di un campione opportunamente preparato.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Analisi mediante perdita in soda	Determinazione della quantità di catene polipeptidiche corte formatesi a seguito di degrado.	Utilizzata per l'analisi della seta	Necessità di una elevate quantità di campione.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Gas cromatografia Pirolisi, Gascromatografia e Spettrometria di massa	Analisi di sostanze organiche (cere, adesivi, gomme naturali, resine, polisaccaridi), utilizzate nella realizzazione dei tessuti e negli interventi di restauro, attraverso un sistema di ripartizione selettiva dei componenti costitutivi.	Analisi qualitativa e quantitativa di elevata sensibilità (ppm), identifica il tipo di sostanza organica, consente la separazione di miscele, anche complesse, di composti organici.	Il campione deve essere volatile, altrimenti è sottoposto ad un pretrattato per ottenere derivati volatili; il campione richiede un'accurata preparazione prima dell'analisi.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione

Metalli

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione delle caratteristiche macroscopiche: stato di conservazione, materiali, alterazioni e forme di degrado, interventi di restauro.	Conoscenza generale dell'opera, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Fotografia nel Visibile	Documentazione fotografica delle caratteristiche morfologiche, estetiche, materiche, conservative del manufatto.	L'immagine conserva i colori reali del manufatto.	La tecnica non evidenzia svantaggi particolari.	Analisi non invasiva
Colorimetria	Caratterizzazione e classificazione cromatica di un manufatto attraverso la misura delle coordinate colorimetriche; monitoraggio della variazione cromatica, talvolta non percepibile dall'occhio umano, attraverso la valutazione del viraggio del colore di un materiale a seguito di alterazione.	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare la variazione cromatica di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale che viene considerata come termine di confronto.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto a basso ingrandimento e documentazione fotografica delle sue caratteristiche estetiche, morfologiche e materiche. Utile strumento anche per l'individuazione dei punti di particolare interesse su cui eseguire il prelievo sia per l'esecuzione del campionamento.	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione osservata.	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi non invasiva

Ultrasuoni	Indagine acustica che consente l'ispezione interna di materiali o di oggetti: localizzazione dei difetti, valutazione della loro entità e profondità, verifica dell'efficacia dei trattamenti di consolidamento, misura degli spessori.	Strumentazione portatile, l'analisi può essere eseguita in situ.	Lacune e fessurazioni di dimensioni troppo esigue possono non essere rilevate.	Analisi non invasiva
Correnti indotte	Rilevamento e mappatura di discontinuità e di difetti presenti nei manufatti metallici (cricche, fratture, alterazioni nella struttura)	In presenza di manufatti aventi una geometria semplice è possibile risalire, a seconda delle variazioni della fase e dell'ampiezza subite dal segnale rilevato, al tipo di materiale ed alla difettistica superficiale e sub-superficiale presente in esso.	Notevole criticità della tecnica nei confronti delle condizioni di accoppiamento fra la sonda e la superficie da indagare: l'aumentare della distanza in aria, o la presenza di materiali non conduttori (prodotti di corrosione), riduce progressivamente le prestazioni del sistema fino a rendere difficile percepire la presenza della massa metallica.	Analisi non distruttiva
Endoscopia	Ispezione delle parti interne di un'opera allo scopo di verificarne lo stato di conservazione, le tracce di lavorazione, gli interventi di restauro, gli assemblaggi tra le varie parti di un manufatto.	Le piccole dimensioni delle sonde permettono di poter accedere all'interno di oggetti attraverso cavità preesistenti e fratture. L'utilizzo di video endoscopi permette di visionare e prendere le immagini durante l'esecuzione dell'analisi.	A causa di determinate condizioni interne all'oggetto, non individuabili dall'esterno, l'analisi potrebbe essere eseguibile solo parzialmente	Analisi non invasiva
Termografia IR	Evidenziazione di differenze strutturali non visibili ad occhio nudo dovute a particolarità interne alla materia o a materiali solo apparentemente omogenei (disomogeneità strutturali, individuazione di cavità, zone piene e di degrado, mappatura dei fronti	Strumentazione portatile. Fornisce informazioni immediate sulle caratteristiche strutturali del manufatto.	La tecnica non evidenzia svantaggi particolari.	Analisi non invasiva

	di umidità e localizzazione delle zone di dispersione o accumulo termico).			
Radiografia a RX	Documentazione per immagini 2D di strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa, quindi non direttamente osservabili, mediante il diverso assorbimento di RX da parte dei diversi materiali (elementi metallici con diversi valori di assorbimento, discontinuità del materiale, presenza di incisioni o altre tracce di lavorazione)	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. Attualmente è in utilizzo la radiografia digitale che evita i problemi derivanti dalle dimensioni delle lastre radiografiche e dal loro sviluppo.	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori. Nell'immagine bidimensionale non si riesce a discriminare la localizzazione degli elementi osservati nello spessore del manufatto.	Analisi non invasiva
Tomografia a RX	Documentazione per immagini 3D delle strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa e quindi non direttamente osservabili mediante il diverso assorbimento di RX da parte dei materiali (elementi metallici con diversi valori di assorbimento, discontinuità del materiale, presenza di incisioni o di altre tracce di lavorazione). L'acquisizione di immagini delle sezioni dell'oggetto ne permette la ricostruzione 3D.	Strumentazione portatile. Le energie utilizzate per l'analisi sono relativamente basse, come i tempi di esposizione. E' un sistema digitale che permette attraverso specifici software di creare una immagine 3D dell'oggetto che può poi essere sezionata per mostrare la struttura interna del manufatto. Nell'immagine 3D, di ogni elemento rilevato si può studiare la sua posizione spaziale all'interno del manufatto indagato.	Utilizzo di dispositivi per la generazione e l'emissione della radiazione X; problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Gammagrafia	Documentazione per immagini di strutture sottostanti la superficie del manufatto o interne ad essa e quindi non direttamente osservabili.	L'elevata penetrazione dei raggi γ permette di indagare gli strati che si trovano sotto materiali a bassa trasparenza costituenti corpi spessi come alcuni manufatti	Problemi legati sia al trasporto ed all'utilizzo delle sorgenti radio-isotopiche per la generazione dei Raggi γ sia alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva

		lapidei (es. statue, monumenti)		
Microscopia ottica mediante microscopio metallografico	Analisi metallografiche per lo studio delle caratteristiche strutturali e della costituzione dei materiali metallici. Individuazione dei trattamenti termici e meccanici subiti dal metallo a partire dallo studio della microstruttura attraverso attacco chimico selettivo per la fase da indagare. Valutazione delle forme di alterazione (patine, croste) derivate da corrosione o deposito di particellati e presenti sia nel campione prelevato sia all'interfaccia del manufatto con l'ambiente	Analisi qualitativa e morfologica che sfrutta elevati ingrandimenti, osservazione preliminare alle successive indagini diagnostiche. Acquisizione di immagini tramite macchina fotografica anche digitale.	La tecnica non evidenzia svantaggi particolari.	Analisi invasiva
Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Osservazioni morfologiche della superficie del campione metallico con individuazione della microstruttura e delle forme di alterazione. Caratterizzazione elementare dei componenti chimici dei materiali costituenti il manufatto e dei prodotti di alterazione/degrado e loro mappatura.	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale o su un sezione stratigrafica; visione ingrandita e realistica del campione, elevati ingrandimenti. La microanalisi permette di eseguire analisi elementare di singole particelle che costituiscono il campione metallico e i prodotti di corrosione. Non è necessaria la metallizzazione del campione, in quanto esso, essendo metallico, è già conduttivo.	La microanalisi rileva elementi con Z>5 (B).	Analisi invasiva

Cromatografia ionica	Determinazione degli anioni e cationi presenti, agenti inquinanti (nitrati, solfati, cloruri) in forma salina o dei prodotti di alterazione/corrosione.	Analisi qualitativa e quantitativa	Necessita la preparazione di una soluzione acquosa, per estrarre l'analita dal campione. L'identificazione avviene per confronto con standard adeguati trattati come il campione.	Analisi invasiva,distruttiva per il campione
Spettrometria di assorbimento atomico (AAS)	Analisi degli elementi chimici presenti in traccia (ppm-ppb) nei prodotti di corrosione	Analisi quali-quantitativa di elevata sensibilità. Tecnica idonea per l'analisi dei prodotti di corrosione dei metalli.	Necessita di un campione di ridotte dimensioni, ma opportunamente preparato.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Spettrometria di emissione	Analisi degli elementi chimici presenti in traccia nei metalli e nelle leghe metalliche.	Analisi quali-quantitativa di elevata sensibilità.	Necessita di un campione di ridotte dimensioni, ma opportunamente preparato (sostanze gassose o vaporizzate dalla loro soluzione acquosa). Tecnica non idonea per l'analisi dei prodotti di corrosione dei metalli.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione

Materiali a base vetrosa (vetro piano, anche decorato)

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione diretta delle caratteristiche del recto e del verso della tessitura del vetro e dello stato di conservazione del supporto e delle finiture; rilievo delle deformazioni della struttura (spanciamento, pannello fuori sede); tenuta della pellicola pittorica, lacune e rifacimenti, forme di degrado e alterazione, dello stucco tra piombo e vetro e del vetro; misurazioni delle luci	Conoscenza generale dell'opera e suo stato di conservazione, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Fotografia nel Visibile	Documentazione fotografica delle caratteristiche morfologiche, estetiche, materiche, conservative del manufatto, a luce trasmessa (illuminazione dal retro delle tessere vitree) e luce incidente (illuminazione frontale delle tessere vitree).	L'immagine in luce trasmessa conserva i colori reali del manufatto; l'immagine in luce diretta mostra lo stato di conservazione della superficie, i piombi, se presenti, le patine ed i difetti del vetro. E' necessaria come supporto per l'interpretazione delle immagini in UV	Risoluzione dell'immagine non sempre sufficiente per la comprensione e la classificazione del degrado	Analisi non invasiva
Fotografia della Fluorescenza UV	Documentazione fotografica del degrado, individuazione di sali solubili e altre forme di alterazione	Primaria individuazione delle aree alterate; utile indicazione per la scelta dei punti di prelievo.	L'interpretazione delle immagini dipende molto dalla risposta dei materiali alla sollecitazione con la radiazione UV.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto ad ingrandimenti da 10 fino a 100 X e documentazione fotografica dei difetti del materiale vetroso, dello stato di conservazione delle	Gli ingrandimenti sfruttati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione	Bassi ingrandimenti, poca stabilità della strumentazione (difficoltosa messa a fuoco a maggiori ingrandimenti) e difficoltà nell'ottenere una	Analisi non invasiva

	superfici (recto e verso), del supporto e delle finiture; osservazioni circa la tenuta della pellicola pittorica, lacune e rifacimenti, forme di degrado e alterazione dello stucco tra piombo e vetro, dei piombi e del vetro; l'individuazione dei punti di particolare interesse su cui eseguire il prelievo sia per l'esecuzione stessa del campionamento.	osservata.	illuminazione omogenea.	
Spettrofotometria di Fluorescenza a raggi X (XRF) (strumentazione portatile)	Caratterizzazione della composizione chimica in elementi e/o ossidi delle tessere vitree e dei prodotti di degrado delle superfici (recto e verso) purché di composizione inorganica.	Strumentazione portabile. Analisi qualitativa e semi-quantitativa che può essere eseguita in situ.	Analisi non selettiva a livello stratigrafico (un punto di analisi fornisce uno spettro costituito dai picchi degli elementi presenti in superficie e negli strati sottostanti del manufatto); rileva gli elementi con Z>5 (B). Problemi legati al trasporto della sorgente a RX e alla sicurezza degli operatori.	Analisi non invasiva
Analisi IBA (PIXE, PIGE)	Rilievo della chimica e geochimica del materiale (vetro, supporti, coloranti, finiture inserite a freddo e a caldo, eventuali prodotti di alterazione).	Analisi di oggetti di qualunque dimensione. Analisi qualitativa, quantitativa e multi-elementare di elementi in traccia, molto sensibile; elevata risoluzione; utilizzo di fasci esterni	Non sono necessari i prelievi. E' indispensabile un acceleratore di particelle; è necessario rimuovere l'oggetto dalla sua originaria collocazione	Analisi non invasiva
Fotogrammetria	Rilievo e documentazione dettagliata dell'oggetto; rappresenta la base di partenza per la corretta e coordinata gestione dei dati analitici invasivi e non invasivi condotti sull'oggetto; monitoraggio dell'evoluzione dello stato di	Indispensabile base conoscitiva su base geometrica e dello stato di conservazione, sull'oggetto nel suo insieme. Mappa di lavoro per l'integrazione delle osservazione a più scale di	Necessità di requisiti minimi di spazio per il rilievo e di stabilità delle apparecchiature; risulta talvolta difficoltoso quando l'oggetto è in situ	Analisi non invasiva

	conservazione nel tempo per confronto di rilievi ottenuti periodicamente.	osservazione e dei dati analitici via via raccolti sulle differenti porzioni materiche dell'oggetto		
Spettrofotometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR, Micro FT-IR)	Analisi per il riconoscimento di sostanze organiche (resine, leganti, adesivi) e di alcune inorganiche (carbonati, solfati, silicati) mediante l'assorbimento caratteristico della radiazione IR da parte dei legami presenti nei composti che costituiscono il campione.	Analisi qualitativa con buona versatilità grazie alle differenti modalità di misura (trasmissione, riflessione, ATR).	Non tutti i legami presentano la stessa sensibilità; difficoltà nell'interpretazione degli spettri in presenza di sistemi complessi e miscele a causa della sovrapposizione di picchi.	Analisi non invasiva/invasiva/ talvolta distruttiva per il campione
Spettroscopia Raman (Micro Raman)	Analisi che fornisce spettri vibrazionali caratteristici della molecola, utile per la distinzione della cella cristallina e del tipo di legame.	Analisi qualitativa, non invasiva, complementare all'analisi FT-IR, utilizza diverse sorgenti.	In presenza di alcuni composti si evidenziano a volte problemi legati a fenomeni di luminescenza del campione.	Analisi invasiva/ non invasiva
Stereomicroscopia ottica sul campione	Osservazione del campione a basso ingrandimento e documentazione fotografica del recto, verso e taglio. Descrizione macroscopica mineralogico-petrografica, studio morfologico e materico dell'eventuale degrado superficiale e profondo. Utile supporto per una preliminare analisi stratigrafica e dei materiali.	Gli ingrandimenti sfruttati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione osservata.	Bassi ingrandimenti, difficoltà nell'ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi invasiva
Microscopia ottica	Studio morfologico-strutturale di un campione tal quale, osservato in luce riflessa e in UV per la distinzione tra materiale e forme di alterazione, e/o di una sezione sottile osservata in luce trasmessa per il riconoscimento delle fasi mineralogiche.	Analisi qualitativa eseguita su sezione sottile. Possono essere acquisite immagini tramite macchina fotografica anche digitale.	Elevati ingrandimenti non permettono di ottenere una buona messa a fuoco di superfici non planari, pertanto è consigliata l'osservazione di sezioni sottili.	Analisi invasiva

Saggi microanalitici spot test	Determinazione qualitativa di specie chimiche (ioni o cationi) presenti in un campione in polvere attraverso specifiche reazioni chimiche che producono variazioni apprezzabili ai materiali (sviluppo di gas, formazione di composti colorati o di precipitati).	Analisi selettiva la cui sensibilità dipende dalle caratteristiche dell'analita. Fornisce una prima discriminazione tra i materiali utilizzati e indirizza la scelta sulle analisi da eseguire.	Non è possibile utilizzare il campione per un'ulteriore test/analisi.	Analisi invasiva, distruttiva per l'analita selezionato
Diffrazione a Raggi X	Analisi su polvere: riconoscimento delle fasi cristalline dei prodotti di degrado), indicazione della composizione cristallina e del materiale sottoposto ad analisi.	Analisi qualitativa e semi-quantitativa di campioni in polvere, in prevalenza di natura inorganica.	Sono analizzabili solo campioni con struttura cristallina. Le quantità necessarie di campione sono elevate, l'analisi di miscele complesse fornisce dati di difficile interpretazione, le interferenze sono dovute a sovrapposizione di picchi di diffrazione	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Cromatografia ionica	Determinazione di sostanze inorganiche tra cui gli agenti inquinanti (nitrati, solfati, cloruri).	Analisi qualitativa e quantitativa capace di identificare in modo inequivocabile il tipo di ione presente in soluzione. Metodo selettivo e di elevata sensibilità.	E' necessaria l'estrazione dell'analita dal campione; l'identificazione avviene per confronto con adeguati standard trattati come il campione.	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Spettroscopia di assorbimento ed emissione atomiche	Analisi degli elementi chimici in traccia (ppm-ppb) che costituiscono il materiale stesso o i prodotti di alterazione come i sali delle efflorescenze.	Analisi quali-quantitativa di elevata sensibilità	Essendo un'analisi elementare non fornisce indicazioni sulla natura del composto a cui appartiene l'elemento rilevato;il campione deve essere disciolto in soluzione acquosa; il pretrattamento del campione a volte può complicare l'analisi chimica del composto	Analisi invasiva, distruttiva per il campione
Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Analisi di materiali per lo più inorganici (pigmenti, coloranti, strati di preparazione, finiture di colore).	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale, su un sezione	Necessita la metallizzazione dei campioni per renderli conduttivi. Poco adatta per l'analisi di	Analisi invasiva e micrp-distruttiva

	Osservazioni morfologiche, caratterizzazione elementare dei componenti chimici e loro mappatura all'interno di stratigrafie e/o sezioni sottili.	stratigrafica o sottile; visione ingrandita e realistica del campione, elevati ingrandimenti. La microanalisi permette di eseguire analisi elementare di singole particelle che costituiscono il campione.	componenti organici in quanto produce perturbazioni strutturali su di essi e la microanalisi proprio per la natura di questi analiti (C, O, N) non riesce a riconoscere il legame in cui sono coinvolti.	

Carta

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Osservazione visiva macroscopica	Osservazione delle caratteristiche macroscopiche: stato di conservazione, alterazioni e forme di degrado, interventi di restauro.	Conoscenza generale dell'opera, è sufficiente l'osservazione ad occhio nudo, talvolta coadiuvata da lenti di ingrandimento.	Non si riescono ad apprezzare particolari e dettagli poiché ciò che è possibile vedere spesso è determinato dallo stato di conservazione del manufatto.	Analisi non invasiva
Stereomicroscopia ottica (strumentazione portatile)	Osservazione del manufatto a basso ingrandimento e documentazione fotografica delle sue caratteristiche estetiche, morfologiche e materiche. Utile per l'analisi delle fibre e per l'identificazione del tipo di polpa	Gli ingrandimenti usati permettono di avere una visione realistica, tridimensionale e a colori reali della porzione osservata.	Basso ingrandimento, difficoltà di ottenere un'illuminazione omogenea.	Analisi non invasiva

	utilizzata e dell'eventuale presenza di lignina (a volte si utilizza abbinata ad analisi microchimiche)			
Colorimetria	Caratterizzazione e classificazione cromatica di un manufatto attraverso la misura delle coordinate colorimetriche; monitoraggio della variazione cromatica, talvolta non percepibile dall'occhio umano, attraverso la valutazione del viraggio del colore di un materiale a seguito di alterazione.	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare la variazione cromatica di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale che viene considerata come termine di confronto.	Analisi non invasiva
Fluorescenza a raggi X (XRF)	Analisi elementare non distruttiva che permette la determinazione semi-quantitativa degli elementi presenti	Analisi semi-quantitativa che evidenzia la presenza di elementi in grado di indurre dei meccanismi di degradazione, quali i metalli pesanti. Utile nello studio di fenomeni legati alla presenza di elementi anche in tracce, quali ad esempio il foxing.	L'analisi rileva la presenza di elementi con numero atomico Z>11 (Na). Per l'analisi quantitativa servono campioni con matrice oscura ben nota e con spessore molto elevato.	Analisi non invasiva
Spettrofotometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR, Micro FT-IR)	Analisi dei gruppi funzionali caratteristici della cellulosa e ove avviene la sua degradazione	Analisi qualitativa di campioni con buona versatilità grazie alle differenti modalità di misura (trasmissione, riflessione, ATR).	Non tutti i gruppi funzionali presentano la stessa sensibilità; i picchi che si formano per degradazione della cellulosa non sono sempre sufficientemente intensi e identificabili con certezza..	Analisi non invasiva/micro invasiva/ talvolta distruttiva per il campione
Spettroscopia Raman	Analisi dei gruppi funzionali caratteristici della cellulosa, molto utile nel riconoscimento dei gruppi funzionali che si formano in seguito all'invecchiamento	Permette l'analisi di campioni di dimensioni microscopiche ed è un'analisi rapida.	In alcuni campioni si ha una banda allargata di fluorescenza che può mascherare o coprire i picchi caratteristici della molecola in esame	Analisi non invasiva o micro invasiva

Misura del pH	Analisi che permette di misurare direttamente (con un elettrodo a contatto) oppure indirettamente (sulla soluzione dell'estratto con un elettrodo ad immersione) il grado di acidità della carta.	La misura del pH è estremamente utile per capire la tipologia di polpa di cellulosa (presenza più o meno abbondante di additivi basici) e per individuare se si sono innescati meccanismi di degradazione.	L'analisi sull'estratto (ottenuto a caldo o a freddo a seconda della norma TAPPI utilizzata) è molto sensibile al pH dell'acqua utilizzata per l'estrazione, variabile per esempio in funzione al contenuto di anidride carbonica. L'analisi a contatto è meno precisa di quella sull'estratto.	Analisi non invasiva (a contatto) o invasiva (per estrazione)
Grado di polimerizzazione medio viscosimetrico (DP)	La misura della viscosità intrinseca permette di ricavare il grado di polimerizzazione della cellulosa e di conseguenza la lunghezza e l'integrità della macromolecola.	Dal DP è possibile ricavare il valore percentuale dei legami scissi e capire quindi quanto la carta è invecchiata (infatti se tale percentuale è > 0,5%, si ha la perdita completa delle proprietà meccaniche della carta)	Tale analisi richiede un quantitativo minimo di campione pari a 125-250 mg)	Analisi invasiva e distruttiva
Termogravimetria differenziale (DTG)	Analisi dell'andamento della perdita in peso di un campione, sottoposto ad un prestabilito programma di temperatura	Si ricavano gli intervalli di temperatura dove si verifica la maggior perdita di peso e quindi la temperatura massima di pirolisi da cui è possibile trarre informazioni sullo stato di conservazione della cellulosa. E’ molto precisa	La tecnica non presenta particolari svantaggi.	Analisi micro-invasiva e distruttiva (2 mg campione)
Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Osservazioni morfologiche della superficie del campione, caratterizzazione elementare dei componenti chimici e loro mappatura sullo strato superficiale del campione	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale utile per lo studio di materiali complessi; fornisce una visione del campione realistica, tridimensionale, ad elevati ingrandimenti ed in scala di grigi. La microanalisi permette	Necessita la metallizzazione del campione per renderlo conduttivo. La microanalisi rileva gli elementi con Z>5 (B).	Analisi invasiva e micro distruttiva

		di eseguire analisi elementare, con mappatura, del campione.		
Microscopia a forza atomica (AFM)	Studio della morfologia della superficie a livello nanometrico e delle sue modifiche a seguito di processi quali invecchiamento o foxing.	Permette la scansione di aree diverse del campione, ricavando la rugosità sia locale, sia superficiale media del campione, in modalità “non contact” così da evitare qualsiasi asportazione delle fibrille. Le scansioni vengono eseguite su numerose aree del campione, di dimensioni tali da essere significative e in numero sufficiente per fornire risultati statisticamente significativi.	L’analisi è effettuabile solo su aree localizzate del campione e non è possibile una mappatura totale, se non in tempio estremamente lunghi.	Analisi non invasiva
Metodo spettrofotometrico con blu di metilene	L'analisi permette di misurare la quantità di gruppi carbossilici scambiabili presenti nella carta, in seguito alla dissoluzione del campione in una soluzione di blu di metilene, misurando l'assorbimento a 620 nm del blu di metilene.	Tale analisi permette, con una semplice dissoluzione, di quantificare il numero di gruppi carbossilici che si formano in seguito ai meccanismi di degradazione della carta.	La quantità di campione necessaria per effettuare l'analisi è pari a circa 50-100 mg di carta	Analisi invasiva e distruttiva
Metodo spettrofotometrico con 2,3,5-trifenil-2H-tetrazolio cloruro (TTC)	L'analisi permette la misura della quantità totale di gruppi carbonilici, aldeidici e chetonici, presenti nella molecola. A tal fine bisogna prima effettuare un'idrolisi alcalina ed una ossidoriduzione, per cui questo metodo è abbastanza laborioso.	In assenza di norme standardizzate che permettano la misura della quantità totale di carbonili, tale metodo dà un'informazione molto utile e difficilmente ricavabile altrimenti.	L'analisi è molto sensibile al contenuto di acqua, per cui tutta la vetreria utilizzata deve essere perfettamente anidra.	Analisi invasiva e distruttiva
Misura della riserva alcalina con metodo titolometrico o con spettrometria ad assorbimento atomico (AAS)	L'analisi della carta con metodi titolometrico permette di ricavare informazioni sulla quantità di carbonato di calcio presente. Quando si utilizza l'AAS, oltre al	L'analisi fornisce informazioni importanti sul contenuto di elementi basici che potrebbero rallentare i processi di degradazione dovuti alla	L’analisi permette di ricavare gli elementi presenti ma non dà indicazioni sui legami in cui sono coinvolti, né del loro stato di ossidazione. Necessita la	Analisi invasiva e distruttiva

	calcio, si determina anche il contenuto di magnesio e di zinco.	deacidificazione della carta.	preparazione del campione.	
Determinazione del numero di rame (metodo titolometrico)	L'analisi permette di dare una misura complessiva di tutti i gruppi funzionali presenti nella cellulosa (pseudo-aldeidi, aldeidi, chetoni e altri).	L'analisi fornisce informazioni orientative sulla quantità di gruppi funzionali presenti nella molecola.	Tale analisi è poco selettiva e non permette di identificare la tipologia di gruppo funzionale presente.	Analisi invasiva e distruttiva
Analisi meccaniche (resistenza a trazione, lacerazione, doppia piega, ecc...)	Tali analisi permettono di valutare le proprietà meccaniche della carta e come tali proprietà si modificano in seguito ad invecchiamento e/o a trattamenti	L'impiego di tali analisi risulta utile nello studio dell'efficacia dei trattamenti a cui può essere sottoposta la cellulosa (ad esempio il consolidamento)	Le proprietà meccaniche si modificano in tempi molto più lunghi delle caratteristiche chimiche, per cui sono poco indicate per lo studio dell'invecchiamento.	Analisi invasive e distruttive

Polimeri

Quando si parla di materiali polimerici, bisogna pensare che essi hanno un duplice impiego nel campo dei Beni Culturali, infatti possono essere utilizzati da una parte nella realizzazione di opere d'arte moderna e contemporanea, e d'altra parte come prodotti per il restauro con funzioni molto varie (consolidamento, protezione, ecc..). Nella tabella che segue sono elencate le analisi necessarie per la caratterizzazione dei polimeri tal quali, si ricorda però che il loro impiego nel restauro richiede delle caratterizzazioni ulteriori finalizzate a capire il comportamento dei prodotti polimerici applicati sul substrato da restaurare e le eventuali interferenze che si possono verificare.

TECNICA	SCOPO	VANTAGGI	SVANTAGGI	TIPOLOGIA
Microscopia ottica	L'osservazione di un polimero in microscopia ottica permette di ricavare il suo indice di rifrazione, che determina proprietà quali la riflessione e la trasmissione.	Le proprietà ottiche del polimero determinano spesso il suo impiego (ad esempio la trasparenza è indispensabile per un adesivo per vetri)	L'indice di rifrazione può cambiare nel tempo, in seguito alla perdita del solvente, degli additivi plastificanti o ad un cambiamento di umidità.	Analisi non invasiva/invasiva
Colorimetria	L'analisi permette di determinare il colore assoluto e/o la differenza di colore di campioni polimerici attraverso i parametri L*a*b* dello spazio di colore CIELab. La determinazione viene eseguita mediante spettrofotometro. La prova può essere particolarmente utile per valutare le variazioni di colore prodotte sul campione da processi di invecchiamento accelerato per esposizione alla luce e/o ad ambienti simulanti condizioni varie.	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare la variazione cromatica di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale non invecchiato che viene considerata come termine di confronto.	Analisi non invasiva
Gloss	L'analisi permette di quantificare il grado di lucidità/opacità di un polimero, che si può modificare in seguito ad invecchiamento.	Strumentazione portatile che permette di effettuare misure in situ, analisi di facile esecuzione.	Per studiare le variazioni di gloss di un materiale bisogna riferirsi ad una misura eseguita su quello stesso materiale non invecchiato che viene considerata come termine di confronto.	Analisi non invasiva
Spettrofotometria di assorbimento (UV-visibile)	L'applicazione più comune degli spettrofotometri è la misurazione dell'assorbimento luminoso, ma essi	Utile per studiare l'gli equilibri in soluzione; si presta bene per un'analisi quantitativa. E'	Non sempre è possibile dare una spiegazione chimica dei cambiamenti spettrali osservati.	Analisi invasiva

	possono essere progettati anche per misurare la riflettanza diffusa o speculare. Gli assorbimenti di lunghezze d'onda che cadono nell'ambito dell'UV/VIS danno luogo a variazioni di energia elettronica	un metodo sensibile e non distruttivo che permette di verificare se un polimero si è degradato in base al fatto che si modificano le sue curve di assorbimento.		
Spettroscopia FT-IR e micro FT-IR	Gli assorbimenti nella regione infrarossa sono legati a variazione dell'energia vibrazionale delle molecole. Tali effetti, che stanno alla base di una misura spettrofotometrica, vengono comunemente sfruttati in chimica per determinazioni qualitative, quantitative ed inerenti allo studio della struttura e dei legami chimici.	L'utilizzo di questa tecnica porta ad identificare correttamente il tipo di polimero.	Vista l'analogia degli spettri FTIR di polimeri strutturalmente simili, l'esatta identificazione del polimero dipende molto anche dall'esperienza dell'operatore.	Analisi non invasiva/invasiva e a volte distruttiva
Spettroscopia Raman (Micro Raman)	Analisi che fornisce spettri vibrazionali caratteristici della molecola, utile per la distinzione della cella cristallina e del tipo di legame.	Analisi qualitativa, non invasiva, complementare all'analisi FT-IR, utilizza diverse sorgenti di irradiazione, rapidità delle misure.	In presenza di alcuni composti si evidenziano a volte problemi legati a fenomeni di luminescenza del campione. I segnali dell'acqua legati alla cellulosa non influenzano la misura.	Analisi invasiva/ non invasiva
Spettroscopia di fotoluminescenza	Analisi utile per l'identificazione dei polimeri e per il loro invecchiamento, in funzione dei cambiamenti delle lunghezze delle catene.	La sua elevata sensibilità permette di evidenziare la degradazione dei polimeri già in stadi molto iniziali.	L atecnica non presenta particolari svantaggi.	Analisi invasiva e distruttiva
Spettroscopia di risonanza magnetica nucleare (NMR)	Diversi tipi di nuclei possono essere osservati con la spettroscopia NMR: sono ^{1}H (protone), ^{13}C (carbonio 13), ^{15}N (azoto 15), ^{19}F (fluoro 19), e molti altri. ^{1}H, è quello utilizzato maggiormente.	Dalla posizione dei picchi sulla scala (chemical shift) e dalla molteplicità del picco stesso si possono estrapolare importanti informazioni strutturali: si può cioè intuire che tipo di atomo di idrogeno (o meglio che gruppo di atomi di idrogeno) è presente nella	Difficoltà di interpretazione degli spettri	Analisi invasiva e distruttiva

		molecola e quali sono le caratteristiche degli atomi a lui vicini.		
Microscopia ottica (OM), in luce polarizzata, con controllo della temperatura (da ambiente a 600°C)	Tale osservazione permette l'analisi morfologica di materiali e lo studio delle transizioni di fase.	L'osservazione al microscopio permette di evidenziare trasformazioni anche minime del polimero.	L'analisi è molto legata alla sensibilità dell'operatore.	Analisi invasiva e distruttiva
Analisi gruppi terminali	Conta i gruppi terminali e determina così il numero totale di molecole, da cui deriva il peso molecolare medio numerico	Abbastanza precisa per molecole più piccole.	In generale bassa precisione.	Analisi invasiva e distruttiva
Crioscopia, ebullioscopia	Determinazione dei pesi molecolari in base alle proprietà colligative delle loro soluzioni diluite.	Semplicità del metodo e della strumentazione necessaria.	Scarsa precisione	Analisi invasiva e distruttiva
Osmometria	Determinazione dei pesi molecolari in base alle proprietà colligative delle loro soluzioni diluite.	Adeguata precisione	La tecnica non presenta particolari svantaggi.	Analisi invasiva e distruttiva
Cromatografia di esclusione sterica (SEC)	L'analisi permette di determinare il peso molecolare del polimero	Con i dati ottenuti dalla SEC si può avere un'approssimazione del peso molecolare in quanto si conosce la relazione esatta tra il peso molecolare ed il volume idrodinamico per il polistirene e si utilizza il polistirene come riferimento standard.	Il rapporto tra il volume idrodinamico ed il peso molecolare non è lo stesso per tutti i polimeri quindi si ottengono solo delle misurazioni approssimative.	Analisi invasiva e distruttiva
Cromatografia in fase liquida (Gel Permeation Chromatography)	L'analisi permette la determinazione della distribuzione dei pesi molecolari	Analisi che si basa su un principio piuttosto semplice di "setaccio molecolare" che permette una separazione fisica con bande abbastanza strette dei polimeri in base al	Servono curve di taratura con standard di polimeri a peso molecolare noto e poi l'analisi si fa per confronto. Se le differenze di PM sono <10% si può avere difficoltà nella separazione dei picchi.	Analisi invasiva e distruttiva

		peso molecolare		
Light scattering	L'analisi permette la determinazione del peso molecolare medio ponderale	L'analisi fornisce informazioni su forma, dimensioni, PM e curva di distribuzione di particelle colloidali in base a misure di torbidità. Basta un micro campione (2-3 mg)	Per PM elevati servono diverse analisi effettuate con differenti concentrazioni della soluzione e con differenti angoli di incidenza della luce.	Analisi invasiva e distruttiva
Misura della viscosità intrinseca	L'analisi permette la determinazione del peso molecolare medio viscosimetrico	L'analisi fornisce informazioni su forma, solvatazione e PM dei polimeri.	Bisogna conoscere i valori delle costanti Mark-Houwink per la combinazione polimero-solvente per ottenere una misurazione accurata del peso molecolare. Quindi non si può ottenere una misurazione corretta di un polimero nuovo. Non si può fare con polimeri insolubili.	Analisi invasiva e distruttiva
Calorimetria differenziale a scansione (DSC)	L'analisi permette di ricavare il calore di fusione, il calore di reazione, il calore specifico, la temperatura di transizione vetrosa e la velocità di cristallizzazione del polimero.	L'analisi fornisce molte informazioni sul comportamento termico del polimero	Per ottenere una corretta Tg bisogna porre attenzione a prendere il punto medio dell'inclinazione, perché il cambiamento non avviene improvvisamente ma si verifica in un certo intervallo di temperatura.	Analisi invasiva e distruttiva
Analisi termica differenziale (DTA)	L'analisi permette di ricavare il calore di fusione, il calore di reazione, il calore specifico, la temperatura di transizione vetrosa, la velocità di cristallizzazione del polimero e in generale le transizioni di fase dei polimeri.	L'analisi permette di raggiungere temperature più elevate della DSC (ca. 1600 °C). Servono piccole quantità di campione. Il campione non deve essere pretrattato.	L'analisi è meno precisa della DSC e fornisce informazioni qualitative ma non quantitative. Bassa selettività in presenza di miscele troppo complesse.	Analisi invasiva e distruttiva
Termogravimetria (TGA)	L'analisi permette di ricavare la purezza, l'identità del materiale, la quantità di solvente trattenuto, il tasso di reazione e la stabilità termica.	I termogravigrammi forniscono informazioni sui meccanismi e sulle cinetiche di decomposizione delle molecole, tanto che possono essere utilizzati per il	Le informazioni ottenibili con il metodo termogravimetrico sono limitate rispetto ad altri metodi termici quali la DSC e la DTA	Analisi invasiva e distruttiva

		riconoscimento delle sostanze.		
Analisi termomeccanica (TMA)	L'analisi permette di ricavare le variazione di dimensione del campione in funzione del tempo, della temperatura e della forza applicata. Si ottengono il coefficiente di espansione termica, il modulo elastico, la variazione di volume specifico e la temperatura di rammolimento	Completa caratterizzazione termomeccanica, utile per sistemi polimerici di diversa natura ed in particolare per i biopolimeri.	La tecnica non presenta particolari svantaggi.	Analisi invasiva e distruttiva
Analisi dinamico-meccanica (DMA)	L'analisi permette di ricavare il modulo elastico e la temperatura di transizione vetrosa	Utile per stuudiare il comportamento viscoelastico dei polimeri. Fornisce informazioni sulla composizione e sul grado di cross-linking.	Richiede campioni di notevoli dimensioni	Analisi invasiva e distruttiva
Test di solubilità	Il parametro di solubilità viene usualmente determinato sciogliendo il polimero in un solvente e titolando con un non-solvente fino all'intorbidimento. Si applicano poi le leggi delle miscele. In generale, un polimero sarà solubile in un liquido se i loro parametri di solubilità sono simili.	I dati di solubilità forniscono informazioni sulla natura chimica del polimero e sulla possibilità di risolubilizzarlo e quindi rimuoverlo in caso di necessità. Ad esempio la solubilità è influenzata, oltre che dalla temperatura e dal peso molecolare, anche dal grado di ramificazione e dalla cristallinità.	Richiede notevoli quantitativi di materiale per testare diversi solventi	Analisi invasiva e distruttiva
Test di diffusione e permeabilità	Fra i test più frequentemente utilizzati ci sono quello finalizzato a misurare la permeabilità al vapore, che si determina misurando la quantità di vapore che attraversa in un intervallo di tempo definito un film di spessore e area unitaria e la permeabilità ai	I risultati di questi test forniscono informazioni sulle condizioni termoigrometriche ottimali per quello specifico polimero.	L'analisi fornisce informazioni sul comportamento del polimero ma è solo indicativa per quanto concerne la sua identificazione.	Analisi invasiva e distruttiva

	liquidi, In particolare l'assorbimento d'acqua è misurato immergendo campioni di polimero in acqua e determinandone l'aumento in peso dopo 24 ore			
Test di resistenza agli agenti chimici e atmosferici	L'analisi permette di prevedere quali fattori determinano un invecchiamento del polimero con conseguente decadimento delle sue proprietà.	I risultati di questi test forniscono informazioni sulle condizioni microclimatiche ottimali per quello specifico polimero.	Richiede notevoli quantitativi di materiale per testare diversi agenti	Analisi invasiva e distruttiva
Gascromatografo/spettro-metro di massa	L'analisi permette la determinazione del rilascio di sostanze volatili	Analisi molto sensibile che permette di conoscere sia la composizione del campione, sia l'identità chimica dei singolo componenti.	Individua solo i componenti volatili ed a peso molecolare non elevato.	Analisi invasiva e distruttiva
Spettroscopia dielettrica (DETA)	L'analisi permette la determinazione delle proprietà dielettriche di materiali in un ampio intervallo di temperature (-150°C/+300°C) e frequenze (20Hz/100kHz).	L'analisi dà un'idea del grado di modificazione strutturale raggiunto dal polimero ad una certa temperatura.	La tecnica non presenta particolari svantaggi.	Analisi invasiva e distruttiva
Diffrattometria a raggi X ad alto angolo	L'analisi permette la determinazione della fase cristallina nei materiali polimerici.	L'analisi fornisce informazioni sull'impacchettamento delle catene polimeriche e sulle diverse morfologie d'organizzazione dei cristallini del polimero, nonché sulle transizioni di fase.	La tecnica è applicabile solo alle fasi cristalline.	Analisi invasiva e distruttiva
Prove meccaniche in trazione/compressione (curve sforzo-deformazione)	Tali prove permettono la valutazione del modulo elastico, del carico e della deformazione allo snervamento, del carico e della deformazione alla rottura.	L'analisi valuta la risposta del campione a sollecitazioni meccaniche di origine dinamica e fornisce il comportamento viscoelastico del polimero.	L'analisi richiede campioni di dimensioni notevoli e su ogni campione è possibile effettuare una sola prova di misura.	Analisi invasiva e distruttiva

Misure dell'angolo di contatto	Determinazione della tensione superficiale di un film di polimero	L'analisi fornisce informazioni sul comportamento idrofilo od idrofobo del polimero.	L'analisi fornisce indicazioni sul comportamento del polimero ma è solo indicativa per quanto concerne la sua identificazione.	Analisi non invasiva/ invasiva ed a volte distruttiva
Microscopia elettronica a scansione e Microanalisi EDS	Osservazioni morfologiche della superficie del campione. Caratterizzazione elementare dei componenti chimici dei materiali costituenti il polimero e loro mappatura.	Analisi qualitativa e semi-quantitativa su un campione solido tal quale; visione ingrandita e realistica del campione, elevati ingrandimenti.	E' necessaria la metallizzazione del campione, in quanto esso non è conduttivo.	Analisi invasiva e micro-distruttiva

Bibliografia

- Raccomandazione Normal – 16/84 (Caratterizzazione di materili lapidei in opera e del loro stato di conservazione: sequenza analitica)
- Raccomandazione Normal – 42/93, Criteri generali per l'applicazione delle PnD.
- UNI 10945-2001, Beni Culturali, Caratterizzazione degli strati pittorici. Generalità sulle tecniche analitiche impiegate.
- Volpin S., Appolonia L., Le analisi di laboratorio applicate ai beni artistici policromi, Il prato, Padova, 2002.
- Matteini M., Moles A., Scienza e restauro. Metodi di indagine, Nardini Editore, Firenze, 2003.

2.2 LINEE GUIDA PER LA CORRELAZIONE DELLO STATO DI DEGRADO CON LE CONDIZIONI AMBIENTALI INTERNE

INTRODUZIONE: UNA NORMATIVA PER LA STANDARDIZZAZIONE

La gestione dei Beni Culturali, in particolare quelli conservati in ambienti indoor, dovrebbe essere sempre coadiuvata da un idoneo piano di prevenzione dei rischi ai quali i beni possono essere sottoposti: la progettazione di un programma di conservazione che preveda tutte le possibili situazioni di pericolo e consideri tutti i fattori che possono generare o accelerare processi di degrado deve diventare elemento prioritario nella gestione del nostro Patrimonio Artistico.
In Italia, in particolare negli ultimi anni, si è ritenuto indispensabile procedere alla standardizzazione di quei parametri che, direttamente o anche indirettamente, possono nuocere alla conservazione dei Beni Culturali: questa standardizzazione deve coinvolgere specifiche e multidisciplinari professionalità e la normativa di riferimento deve essere in grado di coinvolgerle e regolarle giuridicamente.
Nel comparto dei Beni Culturali, ed in particolare per quanto riguarda l'ambiente di conservazione, il processo di standardizzazione non può limitarsi alla redazione di rigide regole oggettivamente valide ma deve essere in grado di adattare il concetto di standard a differenti criteri conservativi che tengano conto delle opere, dei loro materiali costitutivi, delle alterazioni che hanno subito ecc... È indubbio, infatti, che in ambito museale creare uno standard non ha lo stesso significato che siamo abituati a riscontrare in altri settori: ad esempio, non è sempre possibile associare ad un antico manufatto dei validi ed universali parametri ambientali di riferimento e un protocollo di misura. Ciò premesso, e sottolineando la difficoltà che esiste attualmente nel reperire tale tipo di documentazione, è possibile diversificare gli standard esistenti a livello nazionale ed internazionale in:

- Legislativi;
- Normativi;
- Etici o deontologici;
- Tecnici;
- Procedurali e linee guida.

Gli obiettivi principali sono:

- definire il luogo di conservazione, attraverso rilievi dei parametri architettonici;
- creare uniformità, facendo convergere le differenti norme dei diversi Stati in un'opera unitaria di standardizzazione;
- fornire un sistema di intervento analitico standard, facilmente accessibile e trasparente, ai curatori e conservatori del Bene;
- offrire un protocollo ufficialmente riconosciuto;
- fornire indicazioni/specifiche per le indagini scientifiche che siano efficaci ed al contempo realizzabili;
- fornire indicazioni (ad es. per la redazione di un piano d'emergenza) per affrontare situazioni di particolare rischio (ad es. in caso di guerra o calamità naturali).
- I parametri di controllo ambientali, che rappresentano i fondamenti di una corretta conservazione di un'opera d'arte, deve avere la finalità di:
- identificare i parametri di rischio;
- fornire metodi di valutazione;
- offrire criteri di scelta;
- suggerire valori ottimali per i diversi materiali;
- dare indicazioni sulle tipologie di danno che possono verificarsi;

- dare disposizioni sulle modalità di esposizione e sui materiali utilizzati;
- regolamentare le procedure di monitoraggio ambientale;
- fornire indicazioni sulle soluzioni derivanti dal monitoraggio;
- creare archivi di dati per ottenere maggiori risultati rispetto al rischio danno nel tempo.

CODICI ETICI E DEONTOLOGICI

I codici etici e deontologici indicano "gli standard minimi ai quali possono ragionevolmente attenersi, nella condotta e nell'assolvimento delle loro funzioni, i professionisti museali" e svolgono un ruolo quasi giuridico laddove la legislazione vigente sia lacunosa o inesistente in materia.
Di seguito, vengono citati alcuni tra i codici più importanti:

a. *Code of Ethics for Museums* dell'ICOM (International Council of Museums)

   L'ICOM Code of Professional Ethics fu adottato all'unanimità in occasione del 15° meeting della General Assembly dell'ICOM in Buenos Aires, nel 1986. Fu poi emendato dalla medesima Assemblea in Barcellona nel 2001, e rivisto al 21° meeting in Seoul nel 2004. Da segnalare come nelle collezioni museali nel codice, adattabili come indicazioni anche al caso della Villa Reale di Monza, è specificato che:

   - tutti gli oggetti accolti in via temporanea o permanente siano provvisti di una certificazione che consenta di conoscerne la provenienza e ne faciliti l'identificazione;
   - ogni oggetto dovrebbe essere accompagnato da idonea documentazione contenente, tra l'altro, l'analisi della sua composizione, il rilievo dello stato di conservazione e la descrizione di ogni deterioramento;
   - si crei o mantenga un ambiente atto a proteggere le collezioni, siano esse in deposito, in esposizione o in corso di trasporto. Tutto ciò tenendo anche conto delle eventuali richieste avanzate dalle comunità da cui l'oggetto proviene;
   - sia riconosciuta e rispettata l'integrità e l'autenticità culturale e fisica di ciascun esemplare o collezione e se ne garantisca una corretta conservazione avvalendosi, qualora lo si ritenesse necessario, anche di professionisti ed esperti anche esterni al museo.

b. Code of Ethics for Museums dell'AAM (American Association of Museums)

   Il codice dell'American Association of Museums prevede che:
   - le collezioni custodite nei musei siano tenute legalmente, registrate e documentate e naturalmente siano protette e preservate;
   - l'acquisizione, la disposizione e la concessione in prestito delle collezioni sia condotta nel rispetto di determinate regole;
   - ci si doti di un appropriato programma di cura, mantenimento, utilizzazione ed esposizione delle collezioni.

   L'AAM è l'Associazione che si occupa negli Stati Uniti dell'Accreditation dei musei, ha un programma di certificazione di qualità sviluppato e gestito dagli operatori professionali del settore.

c. Code of Ethics and Guidelines for Practice dell'AIC (The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works).

   Alcune indicazioni riguardo:

- i principi etici da assumere per un'appropriata condotta professionale dei responsabili della conservazione;
- come e in quali casi eseguire esami di tipo scientifico sugli oggetti;
- la conservazione preventiva;
- i trattamenti ai materiali;
- la documentazione da allegare agli oggetti;
- le situazioni d'emergenza.

d. Code Of Ethics And Code Of Practice dell'Australian Institute for Conservation of Cultural Material.
In questo documento sono riportati:
- i principi di comportamento per tutti coloro che sono coinvolti nella conservazione dei beni culturali;
- linee guida sulla protezione e conservazione degli oggetti;
- regole da seguire quando si debbano effettuare indagini scientifiche sui beni conservati;
- raccomandazioni per ottenere appropriate condizioni di conservazione, esposizione, manipolazione e movimentazione.

e. Code of Ethics and Rules of Practice dell'United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (UKIC).
Anche questo codice prevede regole di comportamento cui dovrebbero attenersi le diverse professionalità coinvolte nel settore della conservazione. Per quanto attiene la cura delle collezioni è previsto che:
- si garantiscano appropriate condizioni ambientali ed altri requisiti per l'immagazzinamento e l'esibizione e siano incoraggiate procedure appropriate par la manipolazione, l'imballaggio ed il trasporto dei beni;
- siano seguiti standard e protocolli per le investigazioni di tipo scientifico sugli oggetti;
- sia fatta, prima di ogni trattamento a scopo conservativo/restaurativo, un'adeguata valutazione della necessità ed idoneità dell'intervento;
- la scelta di materiali e metodi per i diversi trattamenti sia fatta sulla base delle migliori conoscenze disponibili e solo dopo aver escluso la possibilità di reazioni dannose dovute ad esempio ad incompatibilità fra i materiali;
- gli interventi di tipo restaurativo devono essere reversibili e non modificare le caratteristiche fisiche o estetiche dei manufatti.

STANDARD LEGISLATIVI

In Italia è necessario citare il Decreto Ministeriale 10 maggio 2001 "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei", pubblicato sul supplemento ordinario alla G.U. n. 244, 19 ottobre 2001, che attiene alla regolamentazione di gran parte degli aspetti relativi alla conservazione. In generale, stabilisce l'adozione di un'idonea politica di prevenzione, assicurando in tutti gli ambienti che ospitano le collezioni idonee condizioni ambientali e adeguata manutenzione, agli oggetti che costituiscono le collezioni specifiche misure di protezione dai rischi, regolare verifica degli standard di conservazione, tempestivi interventi atti ad assicurarne l'integrità e idonee misure di sicurezza. Per quanto riguarda nello specifico il monitoraggio delle condizioni ambientali, questo viene considerato elemento imprescindibile ai fini della conservazione preventiva; in particolare, il Decreto prevede che *"data l'importanza dei fattori ambientali ai fini della*

conservazione dei manufatti, il museo deve procedere al periodico rilevamento delle condizioni termoigrometriche, luminose e di qualità dell'aria degli ambienti in cui si trovano i manufatti stessi, dotandosi di strumentazioni di misura fisse o mobili oppure affidando il servizio a terzi responsabili. Il responsabile della conservazione deve inoltre redigere, ricorrendo a competenze professionali specifiche, un rapporto tecnico finalizzato ad evidenziare l'influenza dell'ambiente sullo stato di conservazione dei manufatti e contenente indicazioni circa i provvedimenti necessari al raggiungimento delle condizioni ottimali per la conservazione".
Il D.M. affronta anche il problema della presenza di visitatori che, se in numero elevato possono alterare la stabilità delle condizioni termoigrometriche, prescrivendo che in caso di particolari affollamenti i parametri ambientali vengano registrati in continuo. Così come previsto anche dalla norma UNI 10829, il D.M. fa riferimento ad una "scheda tecnica ambientale", contenente informazioni sulle condizioni ambientali rilevate e sulle misure da adottare per il raggiungimento delle condizioni ritenute ottimali per la conservazione.
Per quanto riguarda gli standard internazionali è necessario citare la Legge francese n° 2002-5 del 4 gennaio 2002 relativa ai "Musées de France" (NOR: MCCX0000178L) e del relativo decreto di attuazione n° 2002-628 del 25 aprile 2002. Tra i 30 articoli della legge si fa riferimento a:
- come far parte dei Musées de France;
- la *mission* dei Musei di Francia;
- le qualifiche richieste per esercitare la responsabilità delle attività scientifiche e di restauro;
- le disposizioni su prestiti e depositi.

LA NORMATIVA

Le norme UNI e NorMal

La norma **10856** del 1997 definisce i parametri microclimatici (grandezze e valori limite) per gli ambienti di conservazione dei documenti grafici (costituiti essenzialmente da materiale cartaceo e membranaceo) e le caratteristiche dei loro alloggiamenti in edifici di nuova costruzione o preesistenti. La norma da anche indicazioni informative sulle strutture murarie, sugli impianti antincendio e sulle cautele da adottarsi durante le misurazioni delle grandezze ambientali.
La norma **10829** del 1999, elaborata dal Comitato Termotecnico Italiano presenta una metodologia di misurazione delle grandezze termoigrometriche e illuminotecniche ai fini della conservazione di beni di interesse storico-artistico; fornisce indicazioni sull'elaborazione delle misure per una valutazione finalizzata al contenimento dei processi di degrado.
La norma **10969** del 2002 ha lo scopo di fornire linee guida per la scelta e il controllo del microclima finalizzato alla conservazione dei Beni Culturali in ambienti interni, quali musei, gallerie, archivi, biblioteche, chiese e palazzi storici.
Le norme **11120** e **11131** sono dedicate alla misurazione dei due parametri termoigrometrici di interesse nella conservazione, rispettivamente alla temperatura, dell'aria e della superficie dei manufatti e all'umidità dell'aria.
L'Ente Nazionale Italiano di Unificazione, unico tra gli Enti Normatori Nazionali, ha emanato una serie di norme riportate in Tabella 1.
La Commissione NorMaL ha pubblicato i documenti riportati in Tabella 2. Da segnalare per il caso della Villa Reale le Normal 5 che propongono metodi di misura della concentrazione di alcuni inquinanti, dei parametri termoigrometrici indoor e outdoor ed di alcuni parametri meteorologici.

Tabella 2.2.1. Normativa UNI

numero	anno	titolo
condizioni microclimatiche		
10586	1997	Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti.
10829	1999	Beni di interesse storico artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi
10969	2002	Beni culturali - Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni
11120	2004	Beni culturali - Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti
11131	2005	Beni culturali - Misurazione in campo dell'umidità dell'aria
ceramica		
10379	1998	Beni culturali - Tecnologia ceramica - Termini e definizioni
11084	2003	Beni culturali - Materiali ceramici - Caratterizzazione
malte		
10924	2001	Beni culturali - Malte per elementi costruttivi e decorativi - Classificazione e terminologia
11088	2003	Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Caratterizzazione chimica di una malta - Determinazione del contenuto di aggregato siliceo e di alcune specie solubili

numero	anno	titolo
11089	2003	Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Stima della composizione di alcune tipologie di malte
11139	2004	Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di calce libera e di magnesia libera
11140	2004	Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di anidride carbonica
manufatti lignei		
11118	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Criteri per l'identificazione delle specie legnose
11119	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera
11130	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Terminologia del degradamento del legno
11138	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi
11141	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Linee guida per la datazione dendrocronologica del legno

numero	anno	titolo
11089	2003	Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Stima della composizione di alcune tipologie di malte
11139	2004	Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di calce libera e di magnesia libera
11140	2004	Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di anidride carbonica
manufatti lignei		
11118	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Criteri per l'identificazione delle specie legnose
11119	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera
11130	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Terminologia del degradamento del legno
11138	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi
11141	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Linee guida per la datazione dendrocronologica del legno

Tabella 2.2.2. Documenti Normal

numero	anno	titolo
condizioni microclimatiche		
5	81	Misura dei Parametri Ambientali
5	82	Misura dei Parametri Ambientali
5	83	Misura dei Parametri Ambientali
5	86	Misura dei Parametri Ambientali
5	87	Misura dei Parametri Ambientali
39	93	Rilevamento della Carica Microbica dell'Aria
malte		
23	86	Terminologia Tecnica: Definizione e Descrizione delle Malte
23	87	Terminologia Tecnica: Definizione e Descrizione delle Malte *(Sostituita da UNI 10924)*
26	87	Caratterizzazione delle Malte da Restauro
27	88	Caratterizzazione di una: Malta
29	88	Misura dell'Indice di Asciugamento (Drying Index)
30	89	Metodi di Controllo del Biodeterioramento
31	89	Determinazione della Calce e della Magnesia Residue
materiali lapidei		
1	80	Alterazioni Macroscopiche dei Materiali Lapidei: Lessico
1	88	Alterazioni Macroscopiche dei Materiali Lapidei: Lessico
3	80	Materiali Lapidei: Campionamento. *(Ristampata nel 1988)*
4	80	Distribuzione del Volume dei Pori in Funzione del loro Diametro.
6	81	Caratterizzazione di Materiali Litici di Cava: Schema di Scheda.
7	81	Assorbimento d'Acqua per Immersione Totale - Capacità di Imbibizione
8	81	Esame delle Caratteristiche Morfologiche al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM)
9	82	Microflora Autotrofa ed Eterotrofa: Tecniche di Isolamento in Coltura
9	88	Microflora Autotrofa ed Eterotrofa: Tecniche di Isolamento in Coltura
10	82	Descrizione Petrografica dei Materiali Lapidei Naturali.
11	82	Assorbimento d'Acqua per Capillarità - Coefficiente di Assorbimento Capillare

numero	anno	titolo
11	85	Assorbimento d'Acqua per Capillarità - Coefficiente di Assorbimento Capillare (*Sostituita da UNI 1085)*
12	83	Aggregati Artificiali di Clasti e Matrice Legante non Argillosa: Schema di Descrizione
13	83	Dosaggio dei Sali Solubili. Sostituita da UNI 11087
14	83	Sezioni Sottili e Lucide di Materiali Lapidei: Tecnica di Allestimento
15	84	Manufatti e Aggregati a Matrice Argillosa: Schema di Descrizione. *(Sostituita da UNI 11084)*
16	84	Caratterizzazione di Materiali Lapidei in Opera e del loro Stato di Conservazione: Sequenza Analitica
17	84	Elementi Metrologici e Caratteristiche Dimensionali: Determinazione Grafica
18	84	Rilevamento della Funzionalità degli Impianti Tecnici: Schema di Scheda
19	85	Microflora Autotrofa ed Eterotrofa: Tecniche di Indagine Visiva *(Sostituita da UNI 10923)*
20	85	Interventi Conservativi: Progettazione, Esecuzione e Valutazione Preventiva. *(Ristampata nel 1996)*
21	85	Permeabilità al Vapor d'Acqua
22	86	Misura della Velocità di Propagazione del Suono
24	86	Metodologia di Rilevamento e di Analisi della Vegetazione
25	87	Microflora Autotrofa ed Eterotrofa: Tecniche di Isolamento e di Mantenimento in Coltura Pura
40	93	Misura Ponderale di Umidità in Murature. (*Sostituita da UNI 11085)*
41	93	Misura Ponderale di Umidità in Superfici Murarie Dipinte. (*Sostituita da UNI 11085)*
varie		
32	89	Determinazione Gas-Volumetrica della CO2
33	89	Misura dell'Angolo di Contatto
34	91	Analisi di Materiali "Argillosi" mediante XR
35	91	Caratterizzazione di Biocidi: Schema di Scheda
36	92	Glossario per l'Edilizia Storica nei Trattati dal XV al XIX Secolo
37	92	Trattamenti Biocidi: Schema di Scheda per Archiviazione Dati
38	93	Valutazione Sperimentale dell'Efficacia dei Biocidi
42	93	Criteri Generali per l'applicazione delle PnD
43	93	Misure colorimetriche di superfici opache
44	93	Assorbimento d'Acqua a Bassa Pressione

A livello internazionale la Normativa UNI rispetto al problema della conservazione sembra mancare: l'ISO (International Standardization Organization) non cita norme per questo settore, se non standard specifici su materiali fotografici, ed una norma che indica i requisiti generali di un luogo adibito alla conservazione a lungo termine di materiali di archivio e di biblioteca. Quest'ultima norma fornisce indicazioni relative all'illuminazione, alla ventilazione e alla qualità dell'aria e, per quanto riguarda i valori termoigrometrici, riporta in un'appendice informativa i dati climatici consigliati per i diversi materiali, poiché, come viene specificato, non esistono valori standard universalmente accettati per una conservazione a lungo termine.
Ad ogni modo si citano i riferimenti normativi ISO in Tabella 3.

Tabella 2.2.3. Norme ISO

numero	anno	titolo
18902	2001	Imaging materials - Processed photographic films, plates and papers - Filing enclosures and storage containers
18911	2000	Imaging materials. Processed safety photographic films. Storage practices
18918	2000	Imaging materials - Processed photographic plates - Storage practices
18920	2000	Imaging materials. Processed safety photographic reflection prints. Storage practices
18923	2000	Imaging materials -- Polyester-base magnetic tape -- Storage practices
18925	2002	Imaging materials - Optical disc media - Storage practices
18927	2002	Imaging materials - Recordable compact disc systems - Method for estimating the life expectancy based on the effects of temperature and relative humidity
18928	2002	Imaging materials - Unprocessed photographic films and papers - Storage practices
18931	2001	ISO/TR Imaging materials - Recommendations for humidity measurement and control
11799	2003	Storage requirements for archive and library materials

Normativa Europea

CEN/TC 346 Conservazione dei Beni Culturali

Il comitato tecnico europeo CEN/TC 346 N.2 “Conservation of Cultural Property” ha il compito di produrre norme tecniche, linee guida e norme sperimentali sulla terminologia e sui metodi di prova e di analisi impiegati per la caratterizzazione tecnico-scientifica dei materiali e dei diversi processi di deterioramento dei Beni Culturali. Il comitato si occupa inoltre dello studio dei metodi di prova per la valutazione dei requisiti e delle caratteristiche dei prodotti e delle tecnologie utilizzati negli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Il CEN/TC 346 è suddiviso in 5 gruppi:

1. *Gruppo di Lavoro WG1 Linee*, Guida e Terminologia, che ha la responsabilità di produrre linee guida che definiscano la pianificazione degli interventi conservativi e di studiare norme sulla terminologia ed il lessico del degrado dei beni mobili ed immobili;
2. *Gruppo di Lavoro WG2*, Materiali costituenti i manufatti, che si occupa della pubblicazione di norme tecniche sulla caratterizzazione dei materiali costituenti i Beni Culturali e sui relativi metodi di prova ed analisi, inclusa la valutazione dello stato di conservazione;
3. *Gruppo di Lavoro WG3*, Interventi conservativi, che ha il compito di redigere documenti tecnici sulla valutazione delle prestazioni dei prodotti e dell’adeguatezza delle metodologie utilizzate nel restauro e nella manutenzione dei Beni Culturali;
4. *Gruppo di Lavoro WG4*, Ambiente, che è incaricato di produrre linee guida e norme relative ai controlli delle variabili ambientali e alla misurazione delle condizioni ambientali, nonché alle interazioni ambiente/manufatto;
5. *Gruppo di Lavoro WG5*, Imballaggio e trasporto, che si occupa di norme che stabiliscano i requisiti per i contenitori per l’esposizione, l’imballaggio ed il trasporto dei manufatti.

Tabella 2.2.4. Normativa europea

ente	numero	anno	titolo
ANSI/NISO	Z39.79	2001	Environmental Conditions for Exhibiting Library and Archival Materials
ANSI	IT9.2	1991	Imaging media-Photographic Processed Films, Plates, and Papers - Filing Enclosures and Storage Containers.
NISO	TR01	1995	Environmental Guidelines for the Storage of Paper Records
BS	5454	2000	Recommendations for the Storage and Exhibition of Archival Documents
BS	4971	2002	Repair and allied processes for the conservation of documents
BS	1153	1992	Recommendations for processing and storage of silver-gelatine-type microfilm
AFNOR5	CG46-CN10Z40L	2002	Prescriptions de conservation des documents graphiques et photographiques dans le cadre d'une exhibition
NF ISO	11799	2004	Information et documentation - Prescriptions pour le stockage des documents d'archives et de bibliothèques
GOST6	7.49	2002	Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Консервация документов. Термины и определения. Standards relating to information, libraries and publishing. Preservation of documents: terms and definitions.
CAN/CGSB	9.70	2000	Permanence of paper for records, books and other documents. Canadian General Standards Board (CGSB)

Documenti procedurali

I documenti nazionali più importanti sono dell'Istituto Centrale per il Restauro, che nel 1997 ha pubblicato "La carta del rischio del Patrimonio Culturale", sulla necessità di attivare il restauro preventivo, inteso come "l'insieme di tutte le azioni mirate a garantire la conservazione del bene culturale", soprattutto in riferimento alla pericolosità del territorio sul quale i beni si trovano. In questo senso, il concetto di restauro preventivo è molto vicino a quello della manutenzione preventiva ed implica evidentemente interventi di tipo multidisciplinare, tesi a definire lo stato di conservazione di un bene e ad intervenire per evitare il degrado.

A livello internazionale i documenti procedurali reperiti sono molti e in questo caso ne sono stati elencati solo alcuni, costituiti per lo più da raccomandazioni o manuali di buona pratica per la conservazione e sono rivolti alle diverse professionalità museali; sono utili anche a privati e a tutti coloro che in qualche maniera sono interessati a preservare particolari oggetti dal deterioramento, in quanto sono per lo più indicazioni generiche e suggerimenti facilmente applicabili.

Francia. Direction de Musées de France Museofiches: si tratta di linee guida, disponibili anche in rete, che riguardano in particolare le misure da prendere per l'ottenimento di un microclima adatto alla conservazione, i materiali adatti agli allestimenti e gli aspetti relativi alla sicurezza.

Gran Bretagna. MLA The Museums, Libraries and Archives Council

La MLA fornisce suggerimenti e consigli per la conservazione e la sicurezza delle raccolte. La sezione "conservation" è suddivisa per tipo di collezione (ad esempio strumenti musicali o orologi antichi) e per tipo di materiale (ceramica, vetro, metalli). Ha pubblicato "*Resource. Benchmarks in collection care for museums, archives and libraries: a self assessment checklist*", una raccolta consistente in una vasta gamma di standard, linee guida ed istruzioni utili ad accertare gli standard di qualità delle misure preventive adottate ai fini della conservazione e cura delle collezioni, focalizzando l'attenzione su diverse macro aree: aspetti legali, sicurezza, edificio, depositi, cura e manipolazione degli oggetti, monitoraggio e controllo ambientale, copie sostitutive degli oggetti più a rischio e piani d'emergenza.

U.S.A. Northeast Document Conservation Center (NEDCC).

Ha pubblicato *"Assessing preservation needs: a self-survey guide"*, il cui scopo è aiutare le piccole e medie istituzioni, dotate di risorse economiche limitate e con poca esperienza in conservazione preventiva, a creare un programma in grado di assicurare le migliori condizioni di conservazione possibili. L'NEDCC mette anche a disposizione in rete dei "leaflet" ossia degli opuscoli che danno indicazioni su strategie di conservazione preventiva, parametri microclimatici e illuminotecnici, procedure in caso di emergenza e suggerimenti sulle procedure di manipolazione e imballaggio degli oggetti.

U.S.A. Syracuse University Library. Department of Special Collections.
Conservation Laboratory.

Ha pubblicato *"Environmental Guidelines"*, linee guida che comprendono anche una tabella sintetica dei valori ritenuti ottimali per la conservazioni di materiali cartacei, tessili, film, negativi, e dipinti ed un elenco di risorse bibliografiche consigliate per approfondire e risolvere problematiche specifiche.

Indicazioni internazionali per archivi e biblioteche

International Council on Archives.

Moving archival records: guidelines for preservation. Comma: international journal on archives.

International Federation of Library Associations and Institutions (IFLA).

Principles for the care and handling of library materials. Disponibile anche in una versione italiana del 2004: Principi dell'IFLA per la cura e il trattamento dei materiali di biblioteca.

Guidelines for exhibition loans. IFLA Rare Books & Manuscripts Section.

Disponibili anche nell'edizione italiana: Linee guida IFLA sui prestiti per mostre.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)

Procedures and Conservation Standards for Museum Collections in Transit and on Exhibition; Impact of environmental pollution on the preservation of archives and records: a RAMP study; Memory of the World Programme. General guidelines to safeguard documentary heritage; Memory of the World Programme. Preserving documentary heritage: a tutorial; Study on integrated pest management for libraries and archives; Disaster planning: preparedness and recovery for libraries and archives: a RAMP study with guidelines; Emergency programme for the protection of vital records in the event of armed conflict.

Australia. National Archives of Australia (NAA).

Standard for the physical storage of Commonwealth records. Storing to the standard: guidelines for implementing the standard for the physical storage of Commonwealth records.

Canada. Canadian Council of Archives (CAA).

Basic conservation of archival materials. Salvage operations for water-damaged archival collections: a second glance.

Francia. Ministère de la Culture et de la Communication, Centre de Documentation de la Direction du livre et de la Lecture.
Protection et mise en valeur du patrimoine des bibliothèques de France: recommandations techniques.
Francia. Ministère de la Culture et de la Communication, Centre de Documentation de la Direction du livre et de la Lecture. *Contamination des collections et des locaux des bibliothèques par des moisissures: méthodes de détéction et d'évaluation.*
Gran Bretagna. Museums & Galleries Commission (MGC). *Standards in the Museum Care of Photographic Collections.*
Gran Bretagna. National Preservation Office.
- Basic Preservation Guidelines for Library and Archive Collections;
- Guidance for exhibiting archive and library materials;
- The application and use of standards in the care and management of archives and libraries;
- Good handling principles and practice for library and archive materials;
- Photocopying of library and archive materials;
- Managing the preservation of library and archive collections in historic buildings;
- A national preservation strategy for library and archive collections in the United Kingdom and Ireland: principles and prospects;
- Carrying out a library security survey and drafting a security policy;
- Security matters: designing out crime;
- Security matters: how to deal with criminal and anti-social behaviour;
- Packing and moving library collections.

U.S.A. American Library Association (ALA).
Guidelines for the security of rare books, manuscripts, and other special collections.
U.S.A. Association of College & Research Libraries (ACRL).
Guidelines for borrowing and lending special collections materials for exhibition.
U.S.A. American Institute for Conservation of Historical and Artistic
Works (AIC). *Caring for your books*. Si tratta anche in questo caso di consigli pratici per la cura delle collezioni librarie; fa parte della serie "Caring for your treasures", disponibile in rete come la maggior parte dei documenti dell'AIC.
U.S.A. Image Permanence Institute (IPI). Storage *Guide for Acetate Film*. Fornisce dati sulle condizioni ambientali di conservazione per pellicole fotografiche e sul tempo in cui si suppone che queste restino chimicamente e fisicamente stabili; riporta, inoltre, informazioni su come si potrebbe stimare il danno che subirebbero i materiali al variare di tali parametri.
U.S.A. National Archives & Records Administration (NARA). *At-a-glance guide to document handling and holdings maintenance.* È una check list di ciò che è corretto fare nella manipolazione e conservazione dei documenti d'archivio.
Di seguito vengono riportate alcune tabelle con i parametri ambientali più idonei per la conservazione del Patrimonio artistico, anche in relazione ai materiali presenti all'interno delle sale della Villa Reale di Monza. I Parametri sono indicativi e ovviamente, come evidenziato nelle linee guida, le condizioni di conservazione più idonee devono comunque tenere conto della storia del Bene Culturale, del suo stato conservativo ed eventualmente delle fasi di alterazione e degrado che ha subito.

Tabella 2.2.5. Parametri per il controllo del degrado biologico (MBBCC 2001)

Manufatti organici	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
Dipinti su tela	40-55	±6	19-24	±1,5
Dipinti su tavola	50-60	±2	19-24	±1,5
Legno	50-60	±2	19-24	±1,5
Legno archeologico	50-60	±2	19-24	±1,5
Legno bagnato			<4	
Carta	40-55	±6	18-22	±1,5
Pastelli, acquerelli	<65		<10	
Libri e manoscritti	45-55	±5	<21	±3
Materiale grafico	45-55	±5	<21	±3
Cuoio, pelli e pergamene	40-55	±5	4-10	±1,5
Tessuti di natura cellulosica	30-50	±6	19-24	±1,5
Tessuti di natura proteica	>50-55		19-24	±1,5
Collezioni etnografiche	20-35	±5	15-23	±2
Materiali stabili	35-65		-30	

Tabella 2.2.6. Parametri microclimatici ottimali per armature in ferro ed armi

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	<40			
UNI, 1999	<50			
AAM[a]	<30			
Bachmann[a]	<45			
British Museum[a]	50-55[b]			
British Museum[a]	50-55[c]			
Cavallini, Massa[a]	40-45			
Coccitto[a]	<60			
De Guichen[a]	0-45			
Gambalunga[a]	0-45			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	<30			
ICCROM[a]	<45			
Musée de France[a]	50-65		20	
ROM[a]	35-50	± 6	21-23,5	
Staniforth[a]	40-45	± 5		
Stolow[a]	20-60			
Thomson[a]	40-45			
U.K. Institute for Conservation[a]	50-55		15-25[d]	

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Nel caso di presenza contemporanea di materiali organici
[c] Anche se il valore ideale sarebbe il 40%
[d] Si consiglia di rendere minime le variazioni diurne

Tabella 2.2.7. Parametri microclimatici ottimali per il bronzo

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	<55			
UNI, 1999	<50			
AAM[a]	<30			
U.K. Institute for conservation[a]	50-55		15-25[b]	
Bachmann[a]	<45			
British Museum[a]	50-55[c]			
Cavallini, Massa[a]	40-45			
Coccitto[a]	<60			
De Guichen[a]	0-45			
Gambalunga[a]	0-45			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	<30			
Hill[a]	50-55			
ICCROM[a]	<45			
Musée de France[a]	50-65		20	
Staniforth[a]	40-45	± 5		
Stolow[a]	20-40[d]			
Thomson[a]	40-45			
Turner[a]	35-45	± 5		

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Minime variazioni diurne
[c] Nel caso di presenza contemporanea di materiali organici
[d] Monete

Tabella 2.2.8. Parametri microclimatici ottimali per la carta

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	50-60		19-24	
UNI, 1999	40-55	±6	18-22	±1,5
AAM[a]	45-60[b]			
AAM[a]	40-50[c]	±5		
AAM[a]	50-60[d]	±5		
ASHRAE[a]	40-50	±5	21-22	
Bachmann[a]	55-65			
Baumont-Laurie[a]	35-50	±6	19-24	
Cavallini, Massa[a]	45-50			
Coccitto[a]	45-60[e]			
De Guichen[a]	50-65			
Gambalunga[a]	50-65			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	45-60[f]			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	40-50[g]	±5		
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	50-60[h]	±5		
ICC/CCI[a]	45-55	±5	15-20[i] 20-25[l]	
ICCROM[a]	50-65			
IFROA[a]	45-60[m]			
IFROA[a]	50-60[n]	±5		
Musée de France[a]	<60		20	
ROM[a]	45-55	± 6	21-23,5	
Stolow[a]	40-50			
Thomson[a]	45-50			

a Da (Aghemo et al., 1997)
[b] 45% sarebbe il valore ideale
[c] 45% è un valore critico per la "carta tesa"
[d] 55% costante per le veline
[e] 45-60% per carta montata su telaio
[f] % ideale
[g] Carta tesa
[h] Veline
[i] Condizioni invernali
[l] Condizioni estive
[m] 1 Carta tesa
[n] Veline

Tabella 2.2.9. Parametri microclimatici ottimali per collezioni mineralogiche, marmi e pietre

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	45-60		≤30	
UNI, 1999	20-60	± 10	15-25	
Bachmann[a]	<45			
Cavallini, Massa[a]	40-45		20-23	
Coccitto[a]	20-40[b]			
De Guichen[a]	0-45			
Gambalunga[a]	0-45			
ICCROM[a]	0-45			
ROM[a]	25-50	± 10	21-23,5	
Stolow[a]	20-60			
Thomson[a]	65-70[c]		10-25	

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Materiali archeologici non igroscopici-materiali inerti
[c] Materiali archeologici non igroscopici

Tabella 2.2.10. Parametri microclimatici ottimali per il legno

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	40-65		19-24	
UNI, 1999	45-60	±4	19-24	±1,5
AAM[a]	45-60			
Bachmann[a]	55-60			
Baumont-Laurie[a]	45-55[b]	±2	19-24	
Cavallini, Massa[a]	40-45			
Coccitto[a]	40-65			
De Guichen[a]	50-65			
Gambalunga[a]	50-65			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	45-60			
Hill[a]	50-60	±5	18	
ICCROM[a]	50-65			
IFROA[a]	45-60			
Johnson-Horgan[a]	45-60			
Musée de France[a]	50-60		20	
ROM[a]	35-50[c]	±6	21-23,5	
Stolow[a]	40-60		20	
Thomson[a]	50-60	±5		
Thomson[a]	50-60[d]		15-25	±5

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Sculture in legno rivestite di gesso
[c] Valori invernale minimo ed estivo massimo consigliati
[d] Materiali archeologici più sensibili

Tabella 2.2.11. Parametri microclimatici ottimali per libri e manoscritti

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	50-60		19-24	
UNI, 1999	50-60	±5	13-18	±1,5
AAM[a]	50-60	±5		
ASHRAE[a]	30-40	±5	12,8-18,3	
Bachmann[a]	55-65			
Baumont-Laurie[a]	35-50	±6	19-24	
Cavallini, Massa[a]	45-50			
De Guichen[a]	50-65			
Gambalunga[a]	50-65			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	50-60	±5		
ICCROM[a]	50-65			
IFROA[a]	50-60	±5		
Musée de France[a]	<60		20	
ROM[a]	35-50[b]	±6	21-23,5	
Stolow[a]	55-60		20	
Thomson[a]	55-60		13-18	

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Valori invernale minimo ed estivo massimo

Tabella 2.2.12. Parametri microclimatici ottimali per mobili con intarsi e lacche

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	50-60		19-24	
UNI, 1999	50-60	±4	19-24	±1,5
Baumont-Laurie[a]	45-55[b]	±2	19-24	
Cavallini, Massa[a]	50-65			
Johnson-Horgan[a]	45-60			
ROM[a]	35-50[c]	±6	21-23,5	
Stolow[a]	40-60		20	
Thomson[a]	50-60	± 5		

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Per lacche giapponesi e coreane e mobili intarsiati o lacche
[c] Valori invernale minimo ed estivo massimo

Tabella 2.2.13. Parametri microclimatici ottimali per l'oro

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	<45			
UNI, 1999	NR[b]		NR[b]	
Baumont-Laurie[a]	<45[c]		t_a[d]	
Hill[a]	50-55			
ROM[a]	25-50[e]	± 10	21-23,5	

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] NR = Non Rilevante
[c] Preferibilmente < del 20%
[d] Temperatura ambiente
[e] Sono i valori invernale minimo ed estivo massimo consigliati

Tabella 2.2.14. Parametri microclimatici ottimali per stampe

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	50-60		19-24	
UNI, 1999	45-60	±2	19-24	±1,5
AAM[a]	45-60[b]			
Bachmann[a]	55-65			
Baumont-Laurie[a]	35-50	±6	19-24	
Cavallini, Massa[a]	45-50			
De Guichen[a]	50-65			
Gambalunga[a]	50-65			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	45-60[c]			
ICC/CCI[a]	45-55	±5	15-20[d] 20-25[e]	
ICCROM[a]	50-65			
Johnson-Horgan[a]	45-60[f]			
Musée de France[a]	<60		20	
ROM[a]	45-55	± 6	21-23,5	
Stolow[a]	40-50		20	
Thomson[a]	50-60			
Thomson[a]	45-50			

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] 45% sarebbe il valore ideale
[c] 45% ideale
[d] Condizioni invernali
[e] Condizioni estive
[f] 45% ideale

Tabella 2.2.15. Parametri microclimatici ottimali per pitture su tela

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	35-60		19-24	
UNI, 1999	40-55	±6	19-24	±1,5
Bachmann[a]	55-65			
Baumont-Laurie[a]	35-50	±6	19-24	
Brawne[a]	48-58	±7	20	±2
Caneva-Nugari-Salvadori[a]	55-65		16-18	
Coccitto[a]	45-60			
De Guichen[a]	50-65			
Gambalunga[a]	50-65			
ICC/CCI[a]	47-53[b]	±2		
ICCROM[a]	50-65			
Johnson-Horgan[a]	45-60[c]			
Massa-Caneva[a]	55-65		16-18	
ROM[a]	35-50[d]	± 6	21-23,5	
Stolow[a]	40-55		20	
Thomson[a]	50-60[e]	±10	20	
Thomson[a]	50-60	± 5		

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Più realistico 58% in estate e 38% in inverno
[c] 45% ideale
[d] Sono i valori invernale minimo ed estivo massimo consigliati
[e] Pitture da cavalletto

Tabella 2.2.16. Parametri microclimatici ottimali per tessuti, tappeti, arazzi

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	40-60			
UNI, 1999	30-50	±6	19-24	±1,5
AAM[a]	45-60[b]			
Bachmann[a]	55-65			
Baumont-Laurie[a]	35-50	±6	19-24	
British Museum[a]	55-60			
Cavallini, Massa[a]	45-50		2-19	
Coccitto[a]	40-60			
De Guichen[a]	50-65			
Gambalunga[a]	50-65			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	45-60			
Hill[a]	50-60	± 5	18	
ICC/CCI[a]	45-55	± 5	15-20[c] 20-25[d]	
ICCROM[a]	50-65			
IFROA[a]	45-60			
Johnson-Horgan[a]	45-60			
Musée de France[a]	45-55	± 5	20	
ROM[a]	35-50[e]	± 6	21-23,5	
Stolow[a]	35-50[f]			
Stolow[a]	40-60			
Thomson[a]	45-50			

[a] Da (Aghemo et al., 1997)
[b] Per fibre naturali, sisal e juta
[c] Condizioni invernali
[d] Condizioni estive
[e] Sono i valori invernale minimo ed estivo massimo consigliati
[f] Per costumi, abiti, paramenti religiosi, tappeti, tappezzerie in stoffa, arazzi

Tabella 2.2.17. Parametri microclimatici ottimali per vetri e vetrate

Riferimento bibliografico	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$ (%)	t (°C)	Δt_{max} (°C)
M.BB.CC., 2001	25-60			
AAM[a]	45-60			
Bachmann[a]	<45			
Cavallini, Massa[a]	50-55			
De Guichen[a]	42-45			
Haiad, Druzik, Ayres, Lau[a]	45-60			
Hill[a]	50-55	± 2	18	
ICCROM[a]	<45			
IFROA[a]	45-60			
ROM[a]	25-50	± 10	21-23,5	
Stolow[a]	40-50			
Stolow[a]	40-60		20	
Thomson[a]	45-50			

[a] Da (Aghemo et al., 1997)

È ormai prassi definire anche per i materiali e/o i manufatti di interesse storico-artistico le condizioni di miglior conservazione, ovvero corretti intervalli di valori di temperatura e umidità relativa.

Il raggiungimento e la persistenza di valori di temperatura e umidità relativa diversi da quelli che rientrano nell'intervallo di conservazione (come evidenziato dalle tabelle) per il particolare materiale o per il singolo oggetto producono danni sul lungo periodo, ma non va dimenticato che brusche variazioni o fluttuazioni di breve periodo, dell'ordine dei giorni se non delle ore, possono indurre alterazioni spesso irreversibili e che il rischio maggiore per la conservazione deriva proprio dai gradienti spaziali e temporali di tali parametri. Infatti, tenendo presente che qualsiasi oggetto si adatta nel tempo all'ambiente circostante entrando con esso in equilibrio, è soprattutto l'entità e la velocità dello spostamento da tale equilibrio ad accentuare processi di deterioramento in atto (UNI, 1999). È importante tener presente alcuni principi fondamentali che mettono in relazione il degrado con i parametri termoigrometrici:

1. le basse temperature dell'aria di per se stesse non sono dannose per gli oggetti museali, mentre le alte possono esserlo in quanto favoriscono i processi degenerativi di carattere chimico;
2. la fluttuazione nel tempo della temperatura dell'aria a contatto con l'oggetto induce in quest'ultimo uno stress termico, provocando dilatazioni; chiaramente, l'entità del danno aumenta se l'oggetto è costituito da materiali diversi;
3. l'umidità relativa influenza le variazioni di dimensione e di forma degli oggetti ed i processi chimici e biologici. In particolare:
    - tutti i materiali organici in grado di assorbire acqua, quali il legno, l'avorio, il cuoio, la carta e i collanti si gonfiano quando l'umidità relativa cresce e si restringono quando essa diminuisce, con conseguenti variazioni di peso, deformazioni, rotture di fibre, crepe e fessurazioni;
    - valori dell'umidità relativa maggiori del 45% favoriscono diverse reazioni chimiche, tra cui la corrosione dei metalli, lo scolorimento delle tinture su cotoni, lini, lane, sete e l'indebolimento delle fibre organiche (tessili e carta), soprattutto se in presenza di luce;
    - valori di umidità relativa superiori al 65%, con valori di temperatura superiori a 20°C, favoriscono lo svilupparsi di muffe ed accelerano i cicli vitali di numerosi e dannosi insetti.

2.4 APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO INDIVIDUATI

MONITORAGGIO MICROCLIMATICO INTERNO FINALIZZATO ALLA DETERMINAZIONE DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI DI ESERCIZIO

Introduzione

Nel presente documento si riporta uno studio preliminare delle condizioni microclimatiche all'interno di due sale dell'ala Sud della Villa Reale di Monza: *Sala delle Udienze e Sala dell'Armeria del Re.*

Ai fini della conservazione dei beni culturali è fondamentale conoscere le cause di un eventuale degrado di un'opera, consentendo così sia un corretto intervento di restauro, che tenga conto della storia conservativa dell'opera, sia un'appropriata strategia di tutela dell'opera stessa nel corso del tempo. È necessario tenere presente che non esistono delle cause dirette di degrado, ma che le alterazioni sono da attribuire piuttosto ad una serie di concause che interagiscono e si intersecano, generando un macro-insieme di elementi che deve essere analizzato in ogni sua componente.

Le cause di degrado, sia intrinseche che estrinseche, agiscono a differenti velocità a seconda delle condizioni ambientali che intervengono, determinando la cinetica dell'alterazione. Queste condizioni ambientali sono chiaramente legate a fattori quali l'inquinamento atmosferico o fattori legati all'illuminazione di ambienti *indoor* o, ad esempio, ad impianti di riscaldamento.

La frequenza con cui questi processi si ripetono è alla base dello studio del degrado dell'opera. In questo senso, diventa importante lo studio sia dei cicli stagionali, sia pure lenti e meno invasivi, sia dei cicli diurni, molto più rapidi e incisivi. Le variazioni termiche, nello specifico, portano la superficie delle opere ad essere soggette a continue variazioni, con gradienti tra l'esterno e l'interno, alterando le caratteristiche chimico-fisiche degli strati superficiali.

Lo studio delle condizioni microclimatiche, e in particolare delle loro variazioni nel tempo, consente quindi di comprendere le possibili cause del degrado delle opere d'arte conservate in ambienti *indoor*, rivelandosi un utile strumento diagnostico per l'intervento di restauro, e nel contempo consente di predisporre le migliori condizioni per una corretta conservazione delle opere nel tempo. A tale scopo, le misure effettuate nelle sale della Villa Reale di Monza hanno la finalità di porre le basi di una prima valutazione del microclima degli ambienti in esame.

Progettazione

Il tradizionale studio delle condizioni microclimatiche si rivolge alla misurazione di Temperatura e Umidità Relativa in un punto specifico dell'ambiente come rilevazione rappresentativa della situazione microclimatica.

Gli obiettivi specifici di questa analisi microclimatica sono stati quelli di determinare gli andamenti di Temperatura e Umidità Relativa all'interno delle sale della Villa, quali la Sala delle Udienze e la Sala dell'Armeria. In queste due sale sono state collocate dalla direzione della villa due data logger (uno per sala) dal mese di dicembre del 2010, posti ad altezza di circa un metro e mezzo dal pavimento, che hanno fornito informazioni puntuali sui parametri termoigrometrici degli ambienti in esame. Le differenze dei parametri misurati nel corso del tempo dovrebbero consentire successivamente di misurare le variazione tra l'ambiente e i manufatti, considerando che questi gradienti sono la principale causa di degrado delle opere d'arte, con conseguente formazione di flussi di calore e di vapore tra manufatto e ambiente esterno. Sono state inoltre posizionate ulteriori sonde nella Sala delle Udienze nel tentativo di determinare gli andamenti e i flussi dei parametri termoigrometrici, con un'elaborazione di mappe in sezione orizzontale e verticale. Le modalità operative di

una campagna microclimatica dovrebbero consistere nell'effettuare periodi di misura significativi per ogni stagione, tenendo conto che i dati devono essere correlati con i periodi di rilevamento e, nelle 24h, in relazione all'ora in cui si effettua la misura. In questo studio si sono presi in considerazione alcuni mesi rilevati dalle due sonde già posizionate nelle due sale, con rilevazioni che iniziano nel mese di dicembre, e il periodo Estivo relativo a cinque sonde installate nella Sala delle Udienze. Il range temporale qui riportato è di circa trenta giorni. Gli andamenti sono stati determinati attraverso l'attivazione di diverse sonde all'interno dell'ambiente da monitorare, posizionandole in punti strategici, e determinando la Temperatura e l'Umidità Relativa ad intervalli di tempo definiti Dai dati rilevati è stato possibile seguire gli andamenti dei parametri di Temperatura e Umidità Relativa sia nell'arco delle 24h (come misure puntuali e come medie delle misure su tutto il periodo in esame) che in tutto il periodo di rilevazione, con le medie calcolate giorno per giorno. In base all'elaborazione di queste misure, è stato possibile ottenere dei tracciati delle sale che visualizzano l'andamento dei parametri in esame. È necessario precisare che, in considerazione del basso numero di sonde presenti all'interno di volumetrie così ampie e in relazione al breve periodo di misura, i risultati ottenuti possono essere considerati puramente indicativi dei fenomeni microclimatici nelle sale della Villa Reale.

Strumentazione

Le misure sono state effettuate utilizzando due tipologie di strumenti: da un lato le sonde definite "datalogger1" per le misure degli andamenti termoigrometrici nella Sala delle Udienze, dall'altro le "datalogger2" già presenti all'interno delle sale, che hanno effettuato misure puntuali. Per le misure prolungate nel tempo sono state utilizzate le sonde definite "datalogger1" Easylog EL-USB-2, dotate di memoria interna, ed è stato impostato il valore di 5 minuti come intervallo di campionamento. Esse sono dotate di termoresistori al platino (Pt100) per la misura della Temperatura e sensore capacitivo Hygromer per la misura dell'umidità.

Caratteristiche tecniche

		Easylog
Range di misura	Umidità Relativa	0 – 100% UR
	Temperatura	–40+85°C
accuratezza	Umidità Relativa	± 1,5 %
	Temperatura	± 0,1 °C

Le sonde di tipo datalogger2 sono quelle già acquisite dalla Direzione del Consorzio e presenti nelle sale, come apparati di ricezione interconnessi con il sistema wireless di rilevamento della Villa.

Posizionamento sonde e metodologia di rilevamento

Le sonde datalogger1 sono state posizionate all'interno della Sala delle Udienze nel tentativo di monitorare gli andamenti termoigrometrici all'interno dell'ambiente che risulta tra i più esposti (Sud-Nord-Est) e quindi più idoneo ad uno studio microclimatico. Quattro sonde sono state posizionate ai quattro angoli della sala (h circa sei metri) per ottenere i dati necessari allo sviluppo di mappe su sezioni orizzontali degli andamenti termoigrometrici. Un'altra sonda è stata posizionata nell'angolo Nord Est ad un'altezza di circa 1,5 metri per ottenere informazioni sugli andamenti verticali. Le sonde hanno iniziato a registrare il giorno 10/07/2011 e sono state rimosse il giorno 28/08/2011. All'interno della Sala delle Udienze era già presente una sonda datalogger2

immediatamente adiacente all'ingresso dall'Ala Sud, posizionata sul cornicione di un camino ad un'altezza di circa 1,5 metri. La Sala dell'Armeria presenta una sola sonda datalogger2 posizionata a circa 1,5 metri di altezza dal pavimento. Le sonde datalogger2 erano state posizionate dalla Direzione della Villa fin dal dicembre 2010 e ai fini di questa prima campagna analitica, in considerazione della vasta mole di dati presenti, si è ritenuto opportuno elaborare solo i risultati ottenuti da alcuni mesi campione, rappresentativi dei cambi di stagione e quindi dei maggiori gradienti termoigrometrici: Dicembre 2010, Marzo 2011, Giugno 2011 e Luglio 2011.

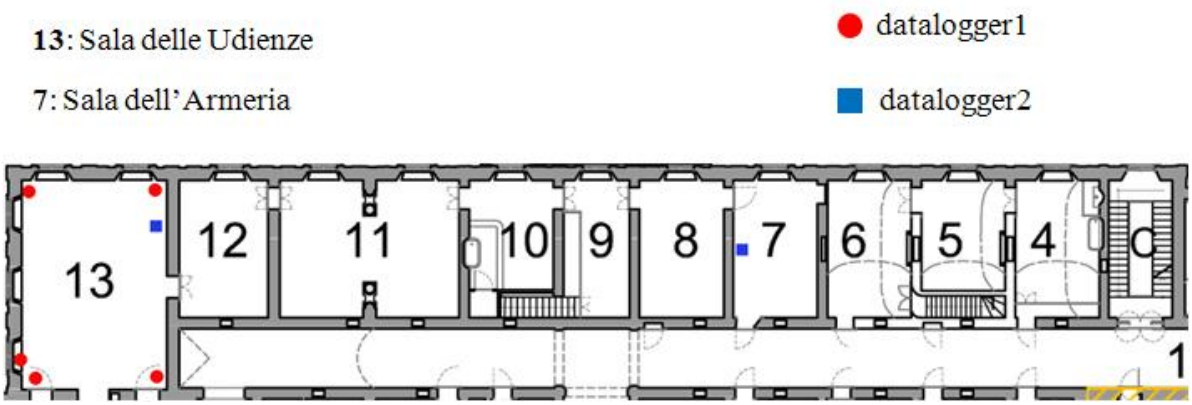


Fig. 2.4.1. Pianta dell'Ala Sud della Villa Reale con evidenziate le posizioni delle sonde

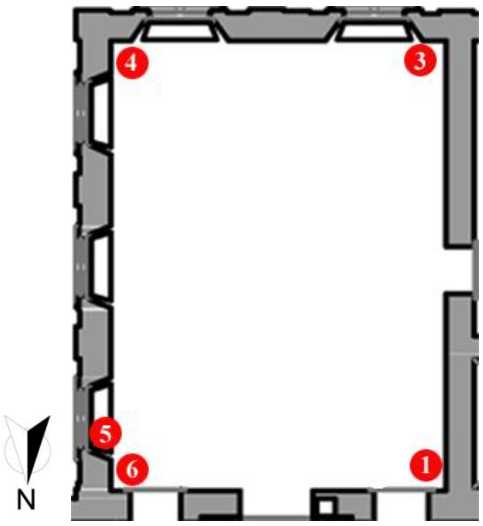


Fig. 2.4.2. Pianta della Sala delle Udienze con le sonde datalogger1 posizionate

Risultati microclimatici sonde "datalogger 2"

I grafici riportati di seguito si riferiscono agli andamenti dei parametri della Temperatura e dell'Umidità Relativa registrati mediante apposite sonde, opportunamente posizionate all'interno della Sala delle Udienze e della Sala dell'Armeria del Re. I risultati presentati sono stati ottenuti attraverso l'elaborazione dei dati, che fanno parte del database di acquisizione della strumentazione e sono rappresentativi di determinati periodi dell'anno, quali:

16-31 Dicembre 2010 - periodo in cui le Sale hanno assunto l'attuale funzione;

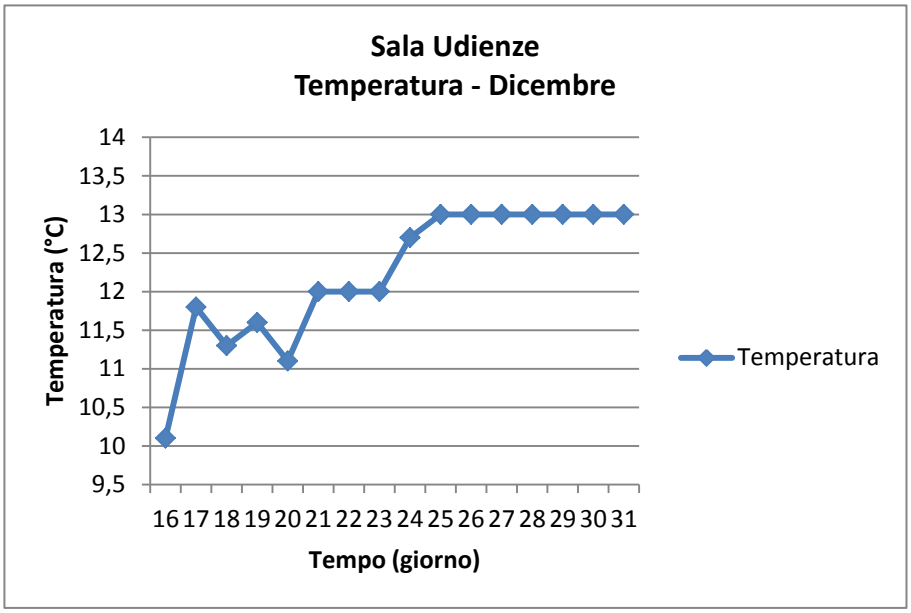
1-31 Marzo 2011 - periodo rappresentativo della stagione primaverile;

1-30 Giugno 2011 - periodo rappresentativo della stagione estiva

23-31 Luglio 2011 - periodo rappresentativo della stagione estiva, la mancanza di alcuni giorni di misura è imputabile a problemi tecnici che non hanno permesso la misurazione.

I grafici hanno lo scopo di mostrare l'andamento dei parametri termoigrometrici nel corso dei mesi scelti, pertanto per ogni giorno di misura è stata calcolata la media tra i valori acquisiti.

Dicembre



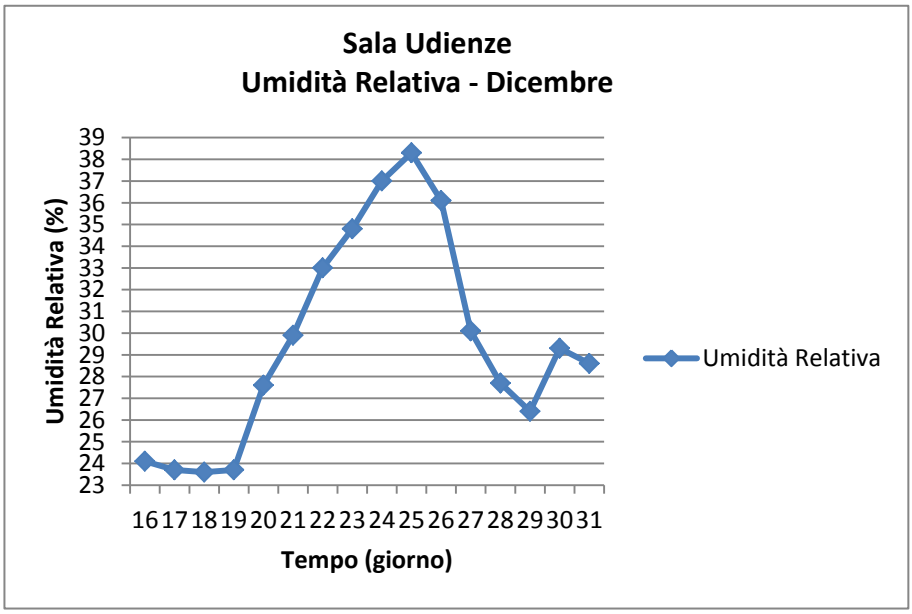
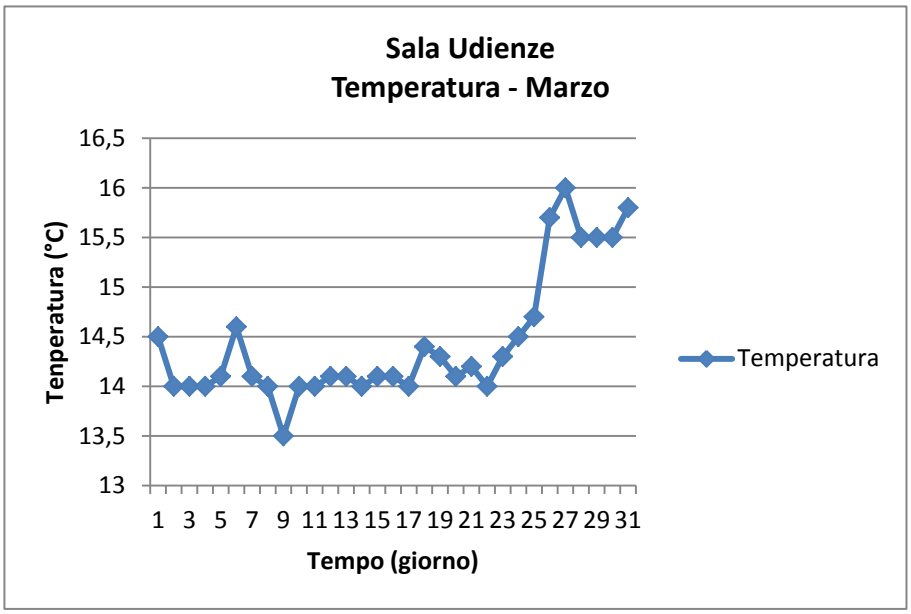


Fig. 2.4.3. Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Udienze mese di dicembre

Il grafico relativo alla Temperatura mostra un andamento crescente, seppur incostante, nei primi giorni per poi assumere valori costanti dal 25 Dicembre in poi. Di notevole importanza per lo studio microclimatico risultano essere i valori assunti dalla Temperatura in questo periodo, essi sono piuttosto bassi, infatti il range in cui si attestano è tra i 10 e i 13 °C. Il grafico riferito all'Umidità Relativa mostra notevoli variazioni igrometriche che si registrano tra un giorno e l'altro. In riferimento agli andamenti della Temperatura appare che il comportamento dell'UR non sia tanto legato o determinato da questo parametro, ma sia fortemente influenzato da cause Esterne, per esempio acqua piovana, che agiscono in modo diretto in questa sala.

L’evidente abbattimento dei valori dal 26 Dicembre potrebbe essere imputabile alla stabilizzazione del condizionamento della stanza.

Marzo



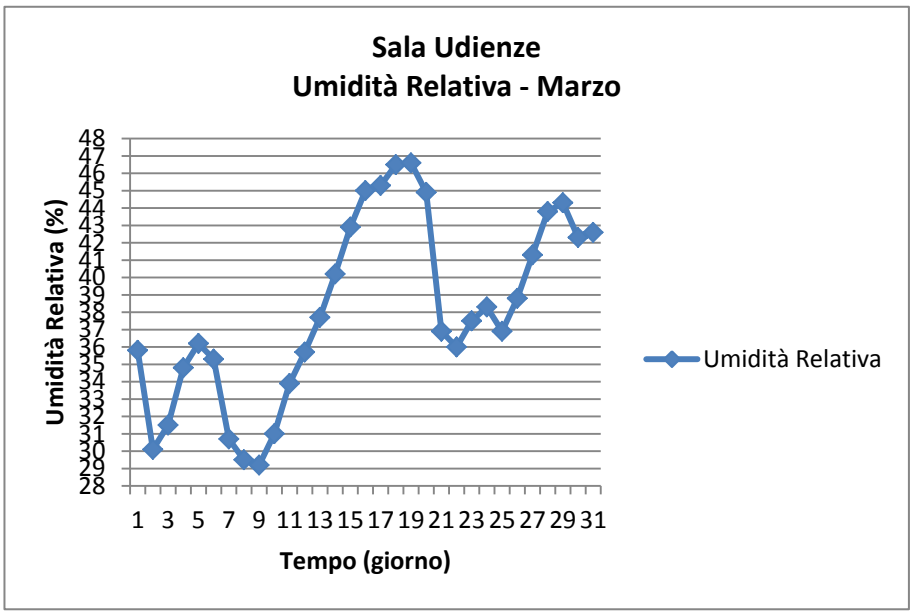
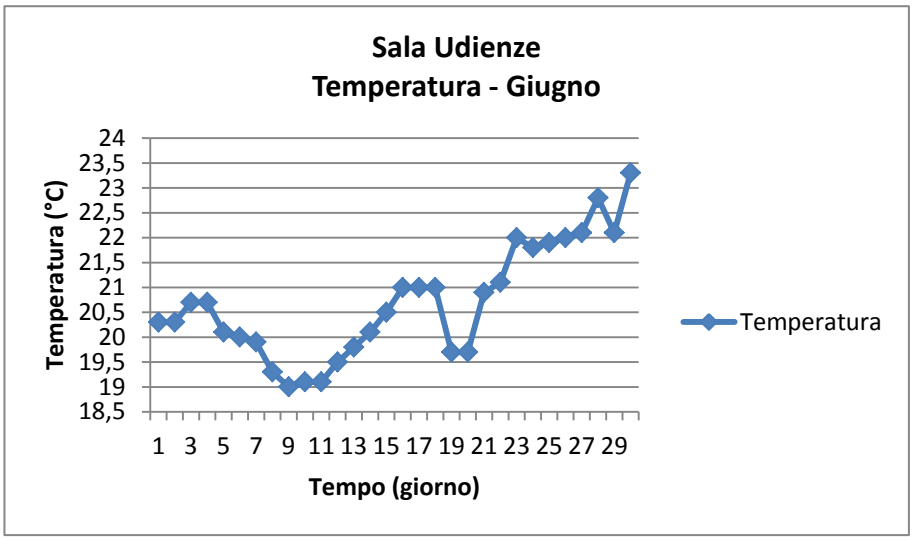


Fig. 2.4.4 Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Udienze mese di marzo

Il grafico relativo alla Temperatura mostra un leggero aumento dei valori se paragonati con quelli del mese di Dicembre. In questo caso si verifica un’oscillazione intorno ai 14 °C caratterizzata da alcuni valori di poco superiori o inferiori. Negli ultimi giorni del mese si evidenzia un crescente innalzamento sino a raggiungere i 15,5-16 °C. Il grafico dell’UR mostra molte oscillazioni nell’andamento e rilevanti variazioni dei valori (da un minimo di 29% ad un massimo di 46%), che permettono di individuare una crescita notevole nel periodo centrale del mese e negli ultimi giorni dello stesso. Anche in questo caso non sembra esserci corrispondenza tra i valori di Temperatura e quelli di umidità, in particolare le variazioni igrometriche sono tali da poter ipotizzare l’influenza di fattori esterni.

Giugno



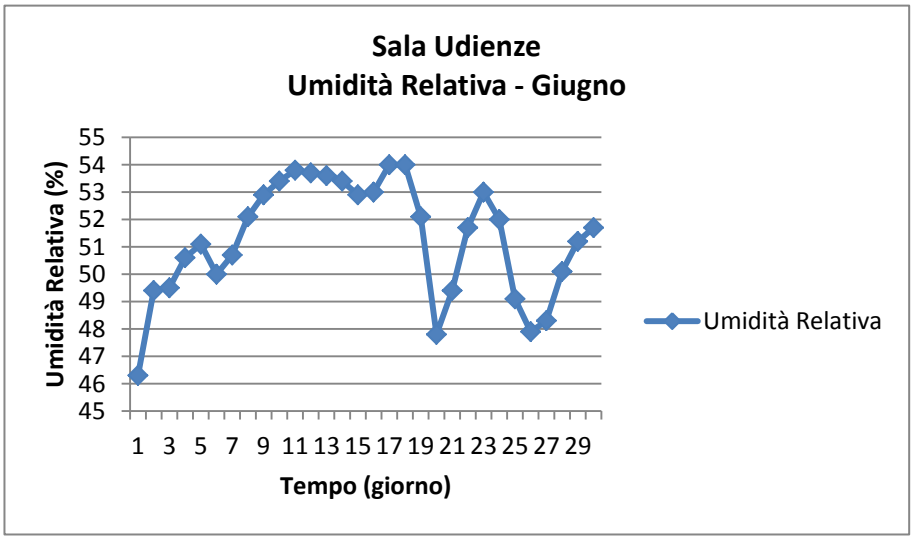
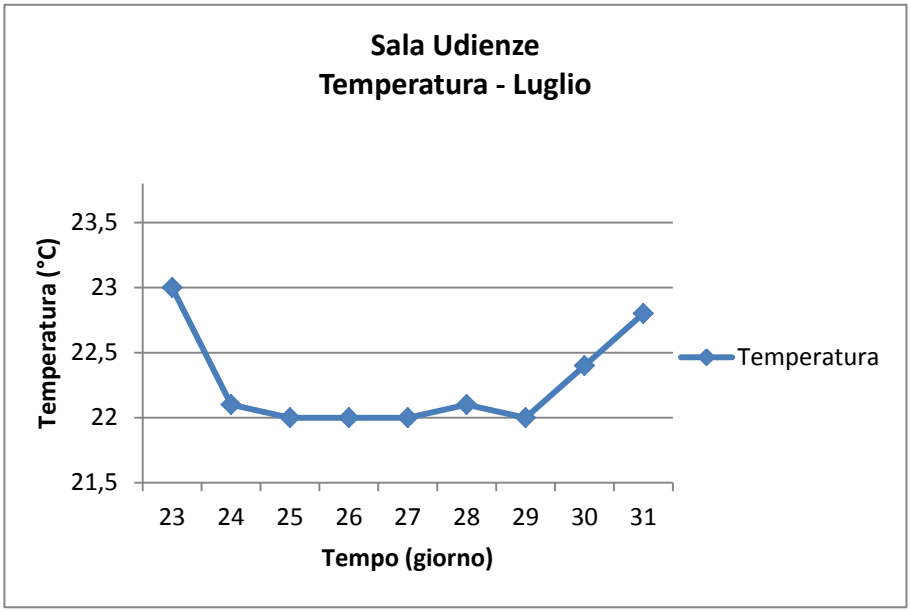


Fig. 2.4.5. Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Udienze mese di giugno

Il grafico della Temperatura mostra che le condizioni microclimatiche sono state caratterizzate da una continua fluttuazione dei valori, che ha determinato escursioni termiche in alcuni casi piuttosto elevate e repentine. Il grafico riferito all'andamento dell'Umidità Relativa mette in evidenza una condizione piuttosto incostante caratterizzata da picchi di valori massimi e minimi, che registrano un range piuttosto ampio tra il 46 e il 54%. Solo in alcuni giorni al mese si riscontra un certo legame tra l'andamento delle condizioni di Temperatura e quelle dell'Umidità Relativa. In altri giorni non è possibile individuare questa correlazione.

Luglio



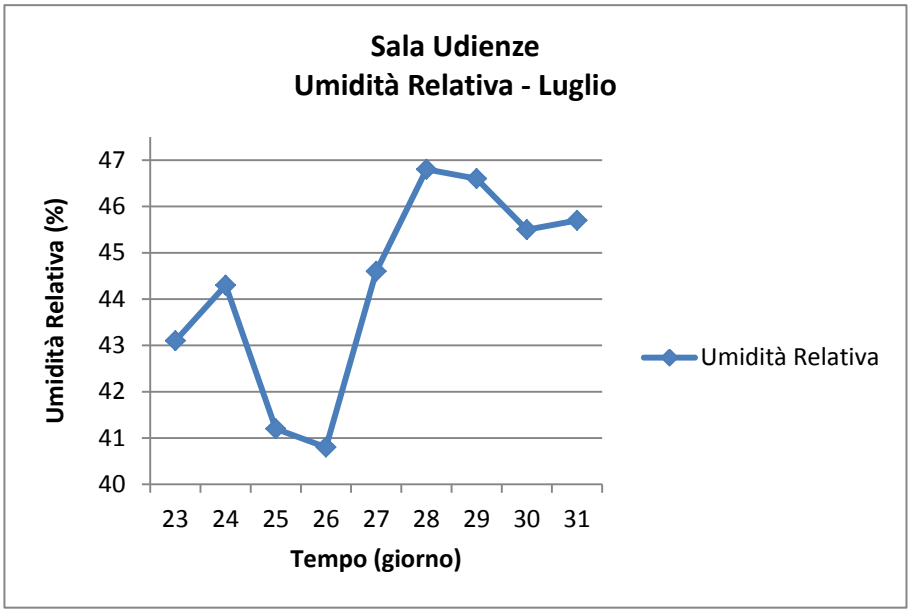
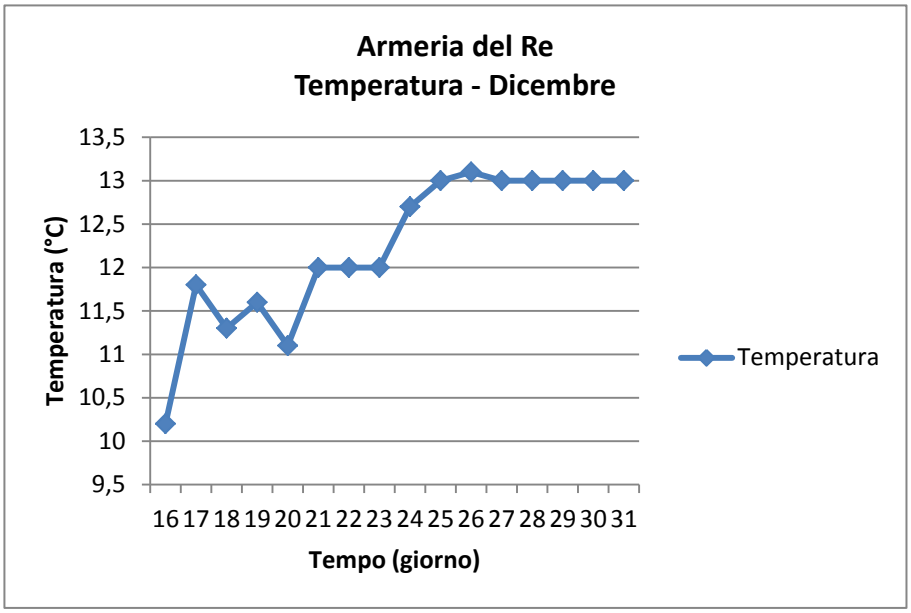


Fig. 2.4.6 Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Udienze mese di luglio

Il grafico relativo alla Temperatura evidenzia un comportamento costante di tale parametro, che si attEsta intorno ai 22 °C, con leggere fluttuazioni crescenti in corrispondenza dei giorni 23, 30 e 31 Luglio. Il grafico relativo all'Umidità Relativa mostra notevoli variazioni di questo parametro all'interno del periodo considerato, non correlabili al fattore della Temperatura.

Dicembre



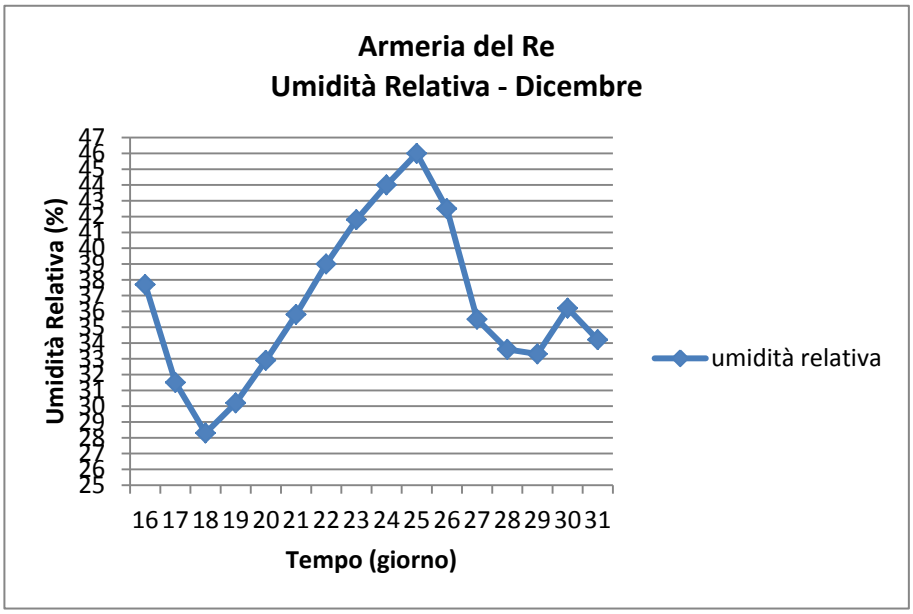
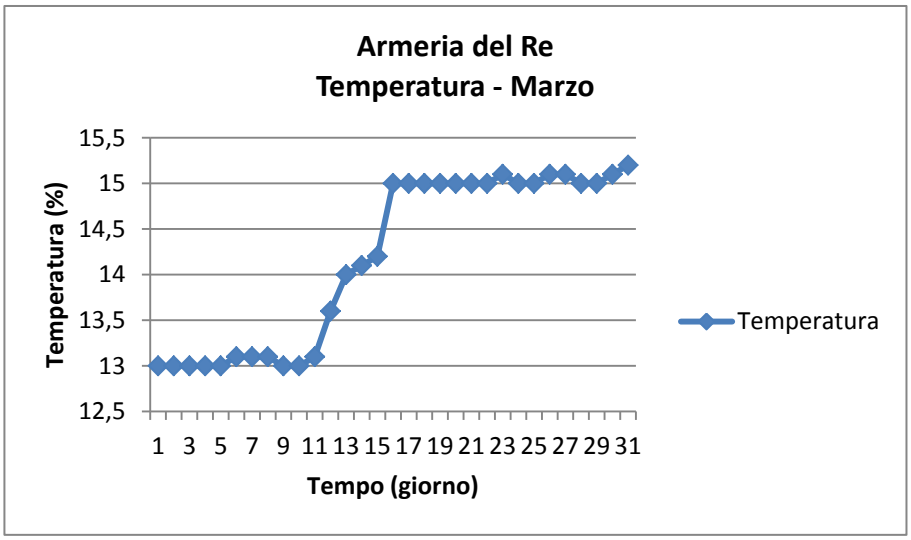


Fig. 2.4.7. Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Armeria mese di dicembre

Il grafico relativo alla Temperatura mostra un andamento crescente, seppur incostante, nei primi giorni per poi assumere valori costanti dal 25 Dicembre in poi. Di notevole importanza per lo studio microclimatico risultano essere i valori assunti dalla Temperatura in questo periodo, essi sono piuttosto bassi, infatti il range in cui si attestano è tra i 10 e i 13 °C. Il grafico riferito all'Umidità Relativa mostra notevoli variazioni igrometriche che si registrano tra un giorno e l'altro. In riferimento agli andamenti della Temperatura appare che il comportamento dell'UR non sia tanto legato o determinato da questo parametro, ma sia fortemente influenzato da cause esterne, per esempio acqua piovana, che agiscono in modo diretto in questa sala.

L’evidente abbattimento dei valori dal 26 Dicembre potrebbe essere imputabile alla stabilizzazione del condizionamento della stanza.

Marzo



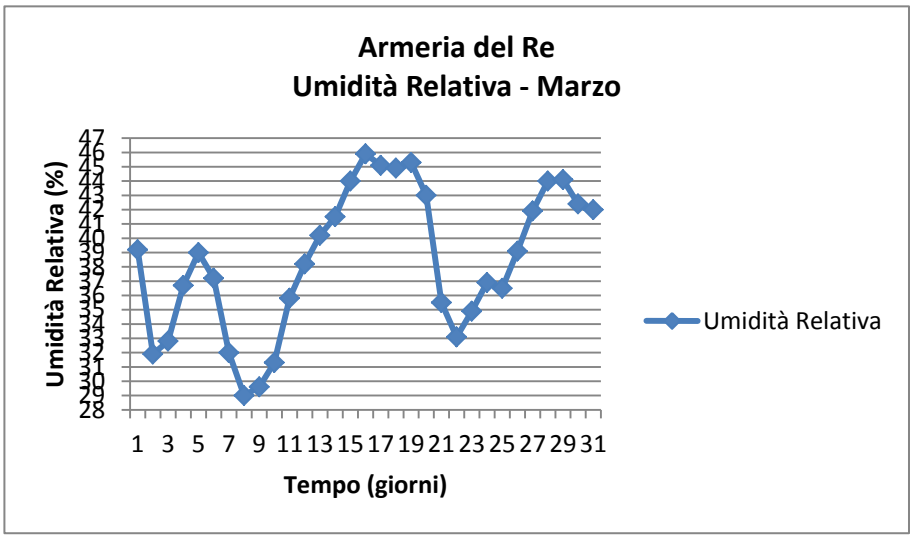
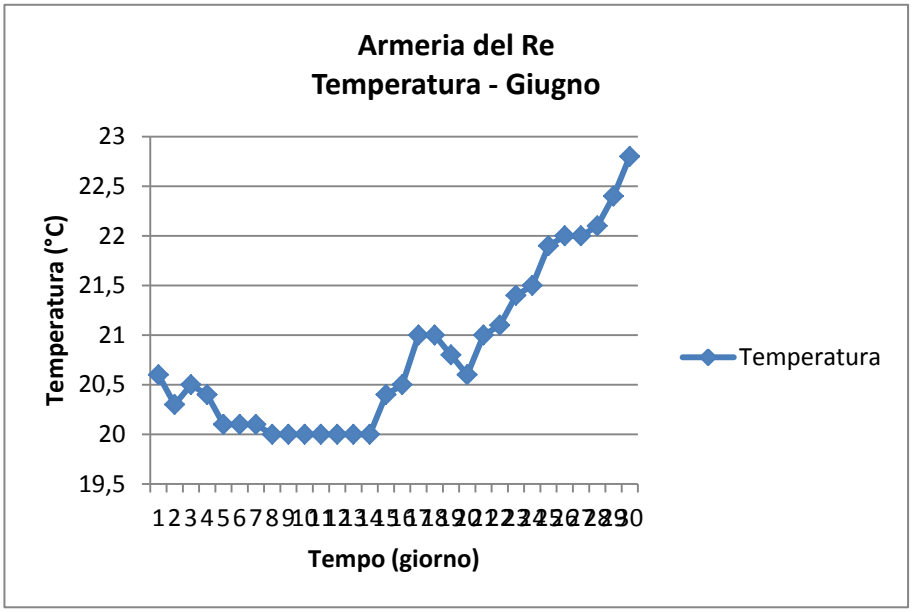


Fig. 2.4.8. Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Armeria mese di marzo

Il grafico relativo alla Temperatura mostra due andamenti costanti che si verificano all’inizio ed alla fine del mese, i cui valori si attestano rispettivamente intorno ai 13°C ed ai 15 °C, intervallati da un periodo in cui si registra un aumento costante della Temperatura che porta al raggiungimento del valore massimo (15 °C). Il grafico dell’Umidità Relativa mostra forti fluttuazioni dei valori ed escursioni igrometriche di notevole intensità, dal 29% al 46%. In questo caso l’andamento di questo parametro non risulta essere correlabile con il comportamento della Temperatura e questo potrebbe indicare la presenza di una probabile altra fonte di alterazione.

Giugno



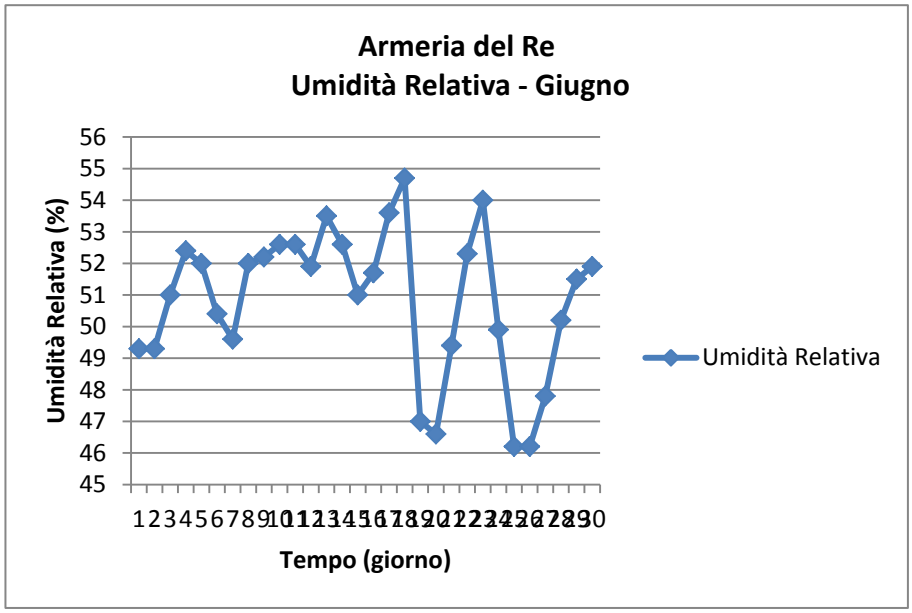


Fig. 2.4.9. Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Armeria mese di giugno

Il grafico dellla Temperatura mostra un primo periodo in cui il valore è piuttosto costante, intorno ai 20 °C; nella seconda metà del mese si registra un aumento delle condizioni di temperature sino ad raggiungere valori piuttosto elevati, intorno ai 22,5 °C Il grafico dell'Umidità Relativa evidenzia una situazione di consistenti fluttuazioni; le variazioni igrometriche, in alcuni periodi, risultano essere repentini e ravvicinate nel tempo.

Luglio

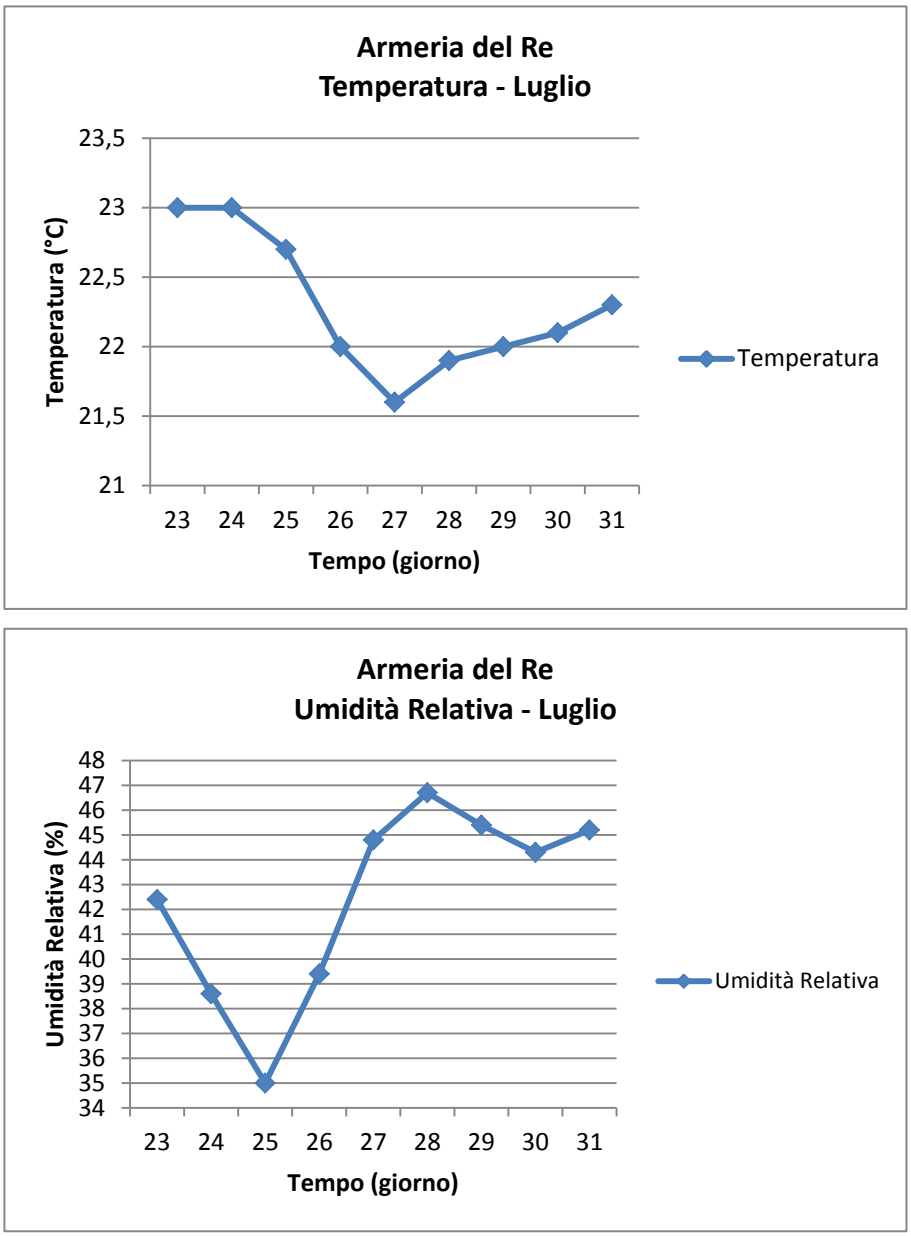


Fig. 2.4.10. Variazioni di Temperatura ed Umidità Relativa – Sala Armeria mese di giugno

Il grafico della Temperatura mostra un andamento decrescente nei primi giorni misurati, che da 23 °C giunge sino a 21,5 °C, ed un andamento crescente nel restante periodo di controllo, che va da 21,5 °C a 22,5 °C. Questa variazione risulta essere abbastanza moderata nel tempo. Il grafico dell'Umidità Relativa mette in evidenza le numerose fluttuazioni, talvolta anche repentine che si verificano tra il 23 ed il 27 Luglio. Questo tipo di andamento, messo a confronto con quello della Temperatura, sembra essere legato ad esso, infatti ad una diminuzione di Temperatura si verifica un aumento dell'Umidità Relativa e viceversa.

Risultati microclimatici sonde “datalogger 1”

I dati delle sonde posizionate nella Sala delle Udienze hanno fornito interessanti informazioni sui gradienti di Temperatura ed Umidità Relativa all’interno dell’ambiente, anche se è necessario ricordare che i dati ottenuti siano preliminari e relativi ad una porzione di tempo non significativa. L’elaborazione dei risultati ha consentito di sviluppare gli andamenti termoigrometrici sia su sezione orizzontale che verticale. La prima elaborazione (Fig. 11) è stata effettuata con le medie di Temperatura e Umidità Relativa di tutto il periodo di rilevamento ed ovviamente, essendo una media, non tiene conto dei picchi e dei gradienti più significativi; però consente di studiare i flussi interni alla sala e di comprendere alcune variabili legate ai fattori di conservazione. La Temperatura mostra un andamento molto omogeneo, con poche escursioni, e con gradienti minimi. La mappa della media delle temperature registrare evidenzia come tra l’area più fredda (Nord-Ovest) e l’area più calda (Sud- Est) ci siano differenze termiche di pochi gradi decimali Celsius. Anche la media dei valori di Umidità Relativa indica un comportamento estremamente omogeneo all’interno della sala, con un andamento opposto a quello della Temperatura, ove nell’angolo Nord-Ovest si registra la percentuale più alta di umidità, anche se è sempre da considerare che i gradienti sono estremamente piccoli.

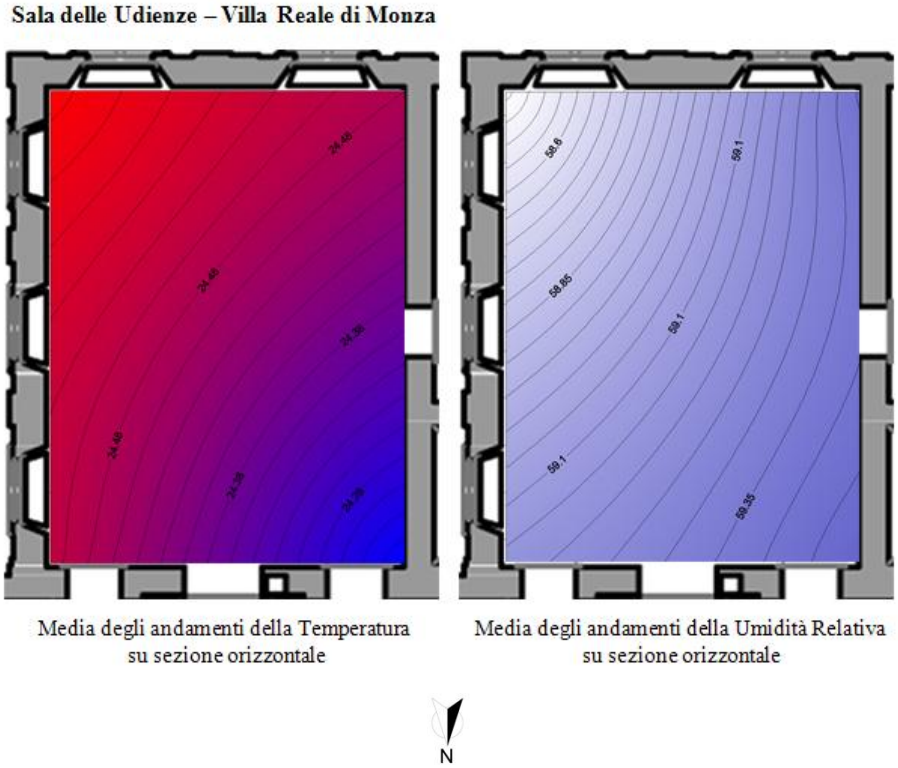


Fig. 2.4.11. Media degli andamenti termoigrometrici

In relazione alla valutazione dei gradienti termoigrometrici, all’interno del periodo temporale di analisi sono stati selezionati due giorni ritenuti significativi: il giorno 21/07/2011, mediamente il giorno più freddo di tutto il periodo analizzato, e il giorno 27/08/2011, che presenta un aumento significativo delle temperature medie. All’interno di questi due giorni sono state selezionate rispettivamente le ore più fredde (ore 5.00) e le più calde (ore 14.00) e i dati sono stati elaborati in sezione orizzontale.

Nel caso del giorno 21 luglio è possibile notare come gli andamenti sia della Temperatura che dell'Umidità Relativa siano estremamente omogenei, con variazioni dell'ordine decimale. In questo caso le temperature più alte vengono registrate verso la parete Sud, mentre il punto di maggior concentrazione dell'Umidità Relativa continua ad essere l'angolo della parete a Nord-Ovest.

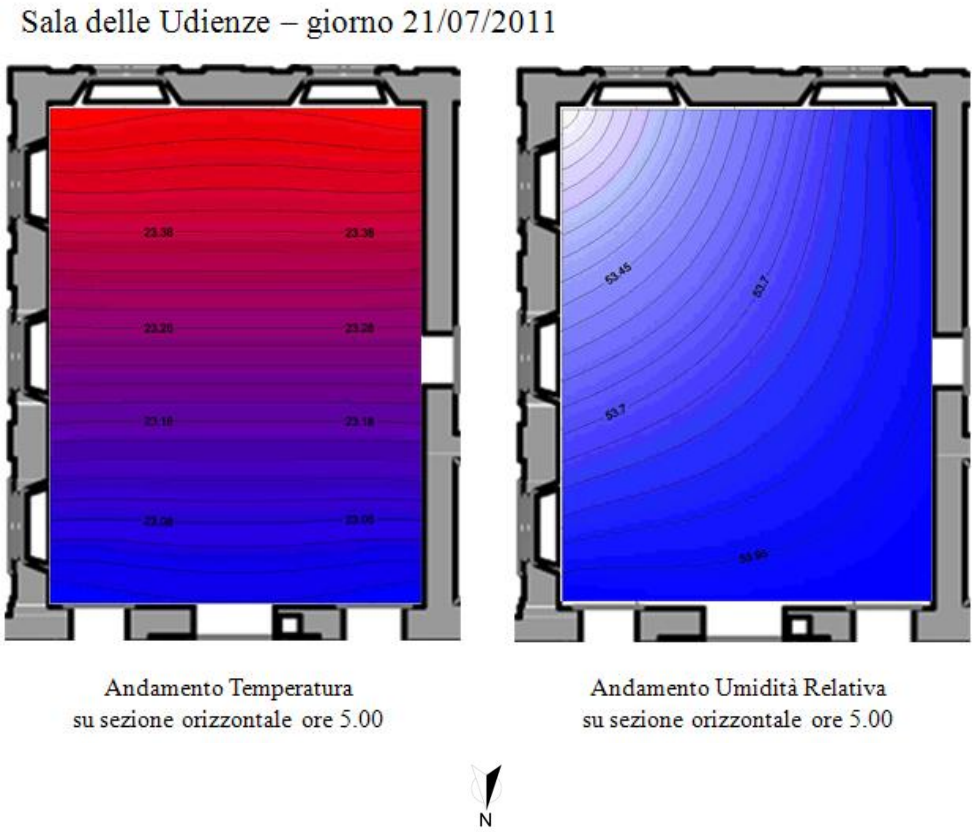


Fig. 2.4.12. Andamenti termoigrometrici ore 5.00

L’analisi dei risultati ottenuti il giorno 27 agosto alle ore 14.00 mostrano un andamento sempre estremamente stabile della Temperatura, con variazioni non significative relative ad un leggero aumento verso la parete Est della sala. È interessante notare come in questo caso non ci sia una correlazione diretta tra gli andamenti della Temperatura e quelli dell’Umidità Relativa, dove i gradienti risultano significativi in particolare tra le aree di Sud-Est e Nord-Ovest. Questo comportamento farebbe pensare ad un apporto di acqua all’interno della sala indipendente dai normali fenomeni di interscambio Temperatura-Umidità, quali ad esempio risalite capillari o fenomeni di infiltrazioni dirette.

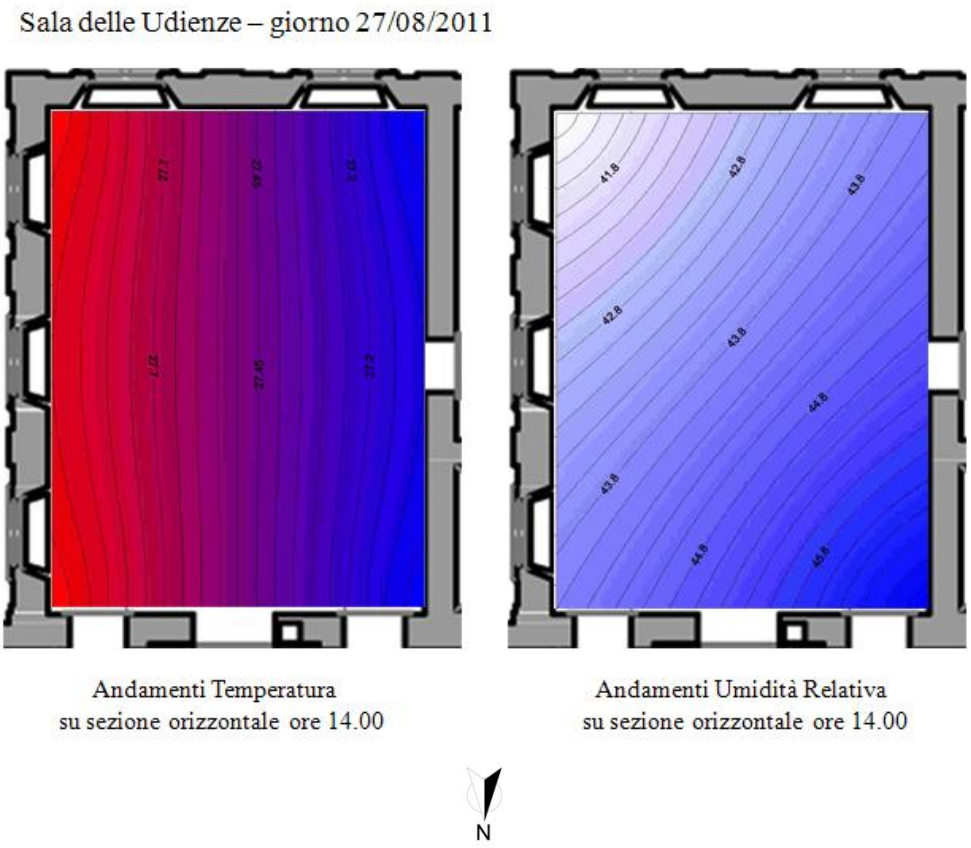


Fig. 2.4.13. Andamenti termoigrometrici ore 5.00

In relazione alle sonde poste in verticale sulla parete Nord Ovest della sala possiamo considerare tre altezze di collocamento: 1,5 m – 3,5 m - 6 m. Anche in questo caso i valori di Temperatura mostrano comportamenti omogenei senza gradienti significativi mentre i valori dell'Umidità Relativa risultano estremamente variabili, con differenze percentuali significative. In Fig. 14 sono mostrati gli andamenti in sezione verticale della Temperatura (Fig. 14 A) e dell'Umidità Relativa (Fig.14 B). Risulta evidente come la parte bassa della parete sia quella con temperature più alte, in grado potenzialmente di generare moti convettivi verso l'alto. L'umidità al contrario mostra un andamento opposto, con gradienti intorno al 10% e conseguenti flussi contrari a quelli termici. Anche in questo caso sembra esserci conferma di un apporto di acqua indipendente dalla regolazione microclimatica tra Temperatura e Umidità.

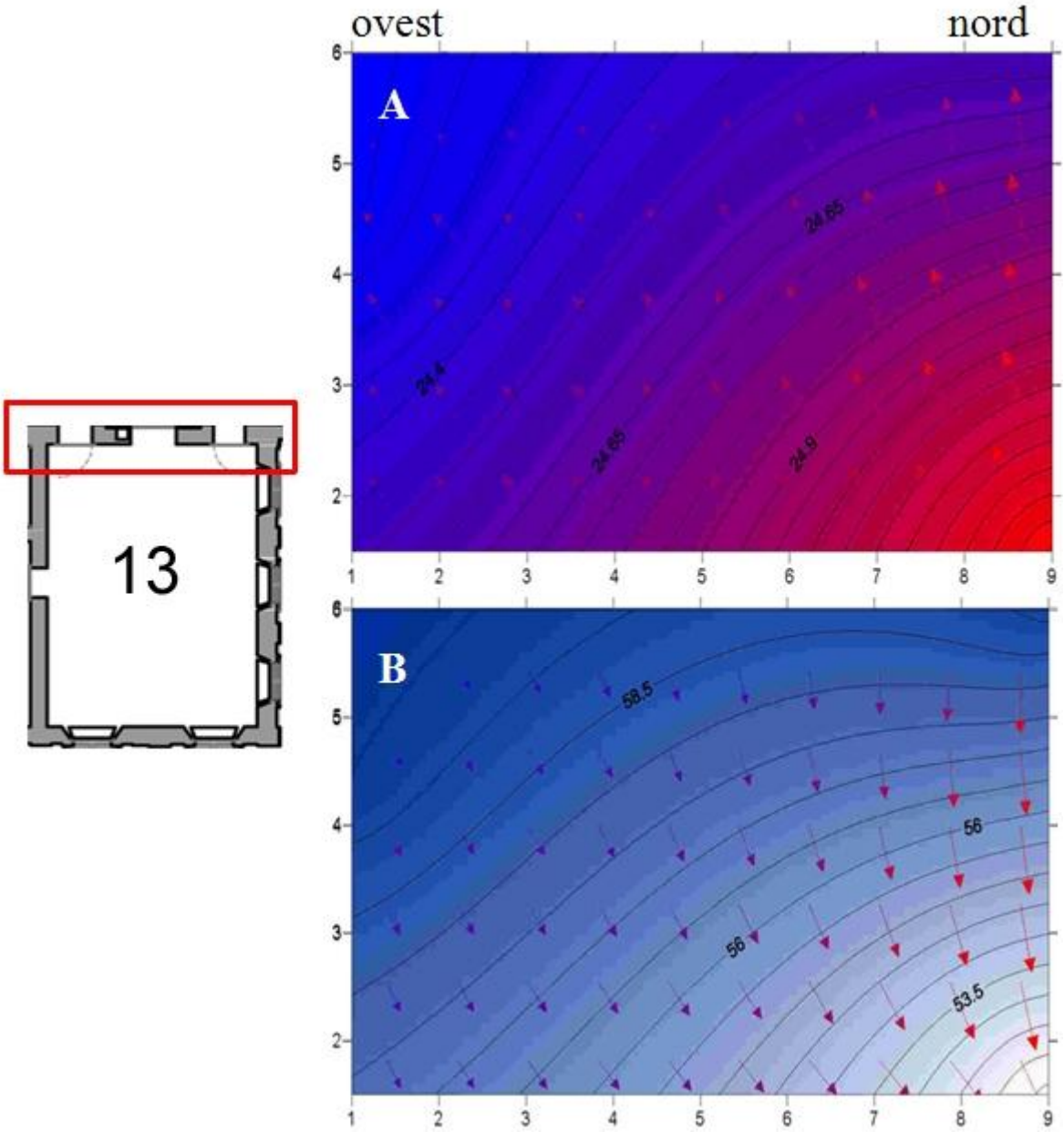


Fig. 2.4.14. Andamenti termoigrometrici in sezione verticale

AZIONI DI DIAGNOSTICA NON INVASIVA E MICRO-INVASIVA FINALIZZATE ALLA CARATTERIZZAZIONE MATERICA DEL MANUFATTO; DETERMINAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE; CORRELAZIONE DELLO STATO DI DEGRADO CON LE CONDIZIONI AMBIENTALI RILEVATE

PREMESSA

Il carattere preliminare delle indagini diagnostiche condotte in questa fase del progetto ha comportato lo studio di manufatti di materiali diversi aventi forme di degrado eterogenee. In considerazione di questo si è ritenuto più corretto discutere lo stato di conservazione dei manufatti e le possibili ipotesi di correlazioni fra il degrado rilevato e le condizioni microclimatiche ed ambientali in modo puntuale per ogni tipologia di campione.

Il primo piano nobile dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza è stato sottoposto a restauro negli anni '90. Nel corso dei 20 anni trascorsi dal restauro ad oggi, su alcuni materiali ed in alcune aree localizzate, si sono innescati dei nuovi fenomeni di degrado imputabili o ad un restauro non perfettamente eseguito od al verificarsi di situazioni microclimatiche indoor non ottimali per i substrati materici conservati negli ambienti della Villa o ad alcuni dissesti localizzati (quali ad esempio la rottura di tubature dell'acqua, oppure fratture dovute ad urto, o altro).

Lo studio del degrado è stato quindi focalizzato sui materiali presenti nel primo piano nobile della Villa Reale di Monza sui quali sono evidenti nuove alterazioni. Nel dettaglio i materiali presi in esame sono stati: tessuti, materiali lapidei naturali ed artificiali (quali intonaci e dorature) ed il legno. Lo studio è stato articolato in 2 fasi: una prima fase di analisi non invasive seguita da una seconda fase di analisi invasive su micro-campioni. Tali campioni sono stati prelevati nei punti in cui il prelievo non comprometteva lo stato attuale del manufatto, visto il suo stato di degrado, né dal punto di vista estetico né dal punto di vista di un peggioramento del suo stato di conservazione presente e futuro.

La relazione è stata articolata in due blocchi: il primo relativo ai tessuti ed ai materiali lapidei naturali ed artificiali ed il secondo relativo al legno.

Studio dei tessuti e dei materiali lapidei naturali ed artificiali

La Fig. 1 riporta la schematizzazione di tutti i punti analizzati, localizzati sulla planimetria del primo piano nobile dell'Ala Sud. La Fig. 2 riporta invece delle immagini delle aree analizzate, associandole sempre alla planimetria del piano in questione.

La fase delle analisi non invasive ha previsto la caratterizzazione di 3 diversi manufatti, due tappezzerie (quella rossa della stanza del Gran Scudiere – stanza 17 nella planimetria di Fig. 1 – e quella azzurra della camera da letto di Re Umberto I – stanza 11 nella planimetria di Fig. 1) ed il pavimento lapideo del corridoio (18 nella planimetria di Fig. 1).

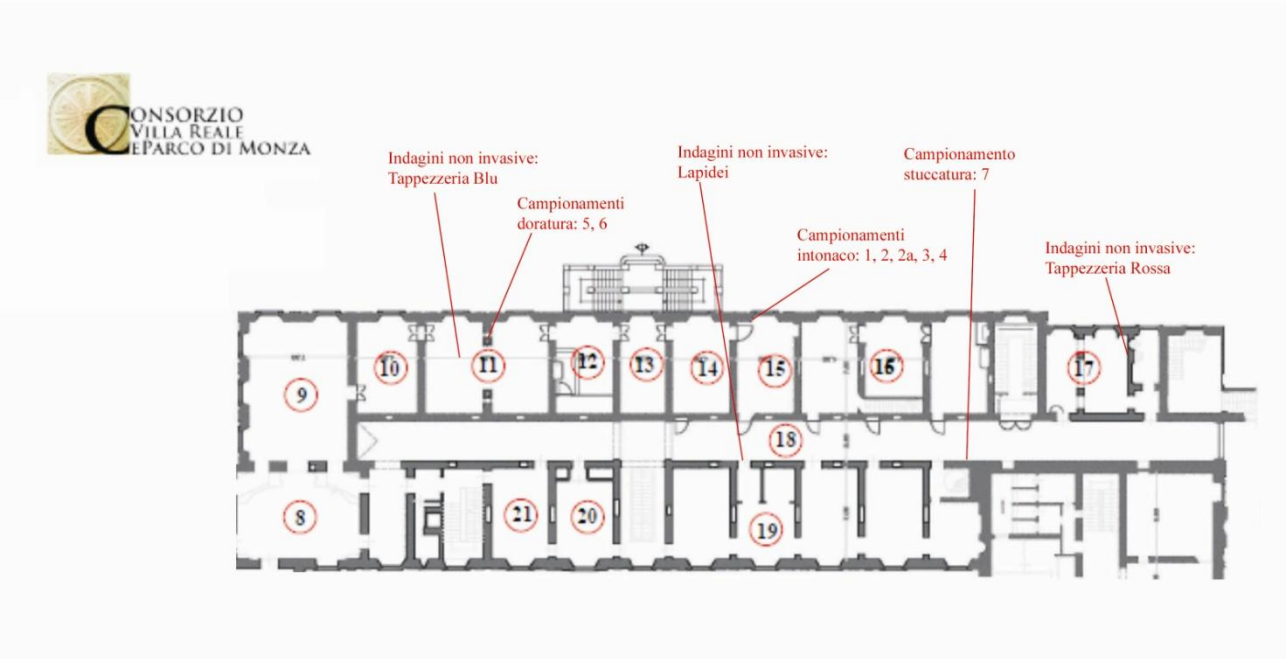


Fig. 1. Planimetria del primo piano nobile della Villa Reale di Monza con la localizzazione delle analisi

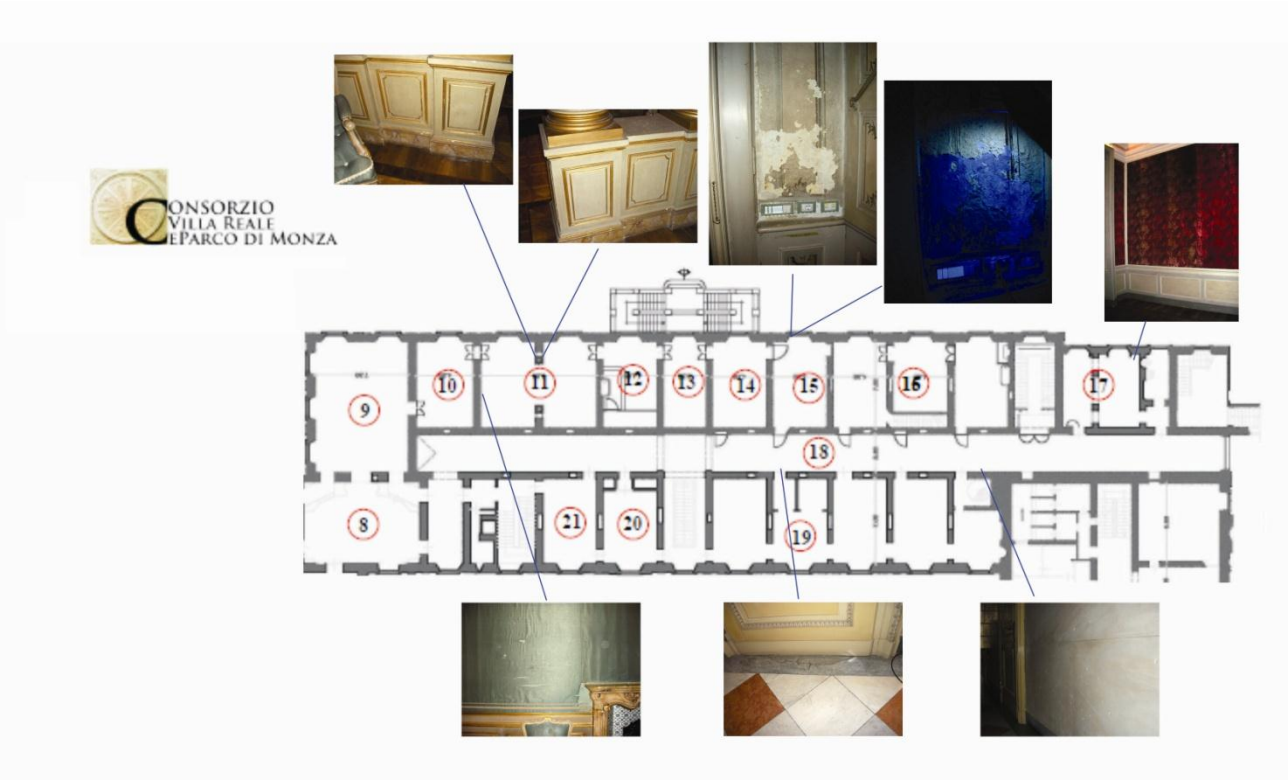


Fig. 2. Planimetria del primo piano nobile della Villa Reale di Monza con le immagini delle aree di analisi

Le analisi non invasive sono state effettuate mediante:

- l'osservazione e la ripresa fotografica con un microscopio digitale portatile (Dino-Lite mod. AM413TL, avente una risoluzione di 1080x1024, va da ca.10 a ca.100 ingrandimenti ed ha 8 led di luce bianca);
- la misure delle coordinate colorimetriche, misurate con lo spettrofotometro portatile della Minolta (modello CM-S100w Spectra Magic NX, Konica Minolta, dotato di lampada illuminante allo Xeno con campo spettrale compreso tra 360 e 740 nm e risoluzione 10 nm), secondo la Raccomandazione Normal 43/93 "Misure colorimetriche di superfici opache".

La fase delle analisi invasive ha previsto il prelievo di 8 campioni, di cui 4 appartenenti ad un intonaco decorato che si trova nella nicchia sinistra della finestra dell'Armeria del Re (stanza 15 nella planimetria di Fig. 1), 2 relativi ad una cornice di decorazione dorata che si trova sul muretto divisorio della camera da letto di Re Umberto I (stanza 11 nella planimetria di Fig. 1) e 2 appartenenti alla parete in marmorino del corridoio (stanza 18 nella planimetria di Fig. 1).

Sia gli affreschi sia le dorature sono sistemi complessi, risultanti dalla miscelazione di un pigmento ed uno o più leganti. La natura organica od inorganica di leganti e pigmenti richiede necessariamente una scelta analitica ben definita. La caratterizzazione materica dei prelievi ha richiesto quindi una strategia multianalitica condotta a differenti scale di osservazione. La metodologia multianalitica è stata mirata allo studio tessiturale e composizionale dei materiali in opera sulle strutture murarie. E' stata scelta una precisa sequenza operativa nell'acquisizione dei differenti dati tecnici, utilizzando tecniche di microscopia (ottica ed elettronica) e metodologie di indagine

microanalitiche, con l'accortezza di salvaguardare comunque una porzione testimone del campione per eventuali analisi aggiuntive.

Il primo approccio d'indagine è stato condotto utilizzando il microscopio ottico con visione stereoscopica. Tale indagine permette di definire le sequenze microstratigrafiche di ciascun prelievo e di individuare fra i vari campioni alcune correlazioni tra i differenti strati tecnici. Lo studio ha permesso di formulare differenti ipotesi di lavoro, da verificare attraverso le successive indagini di caratterizzazione materica. Studi micromorfologici e delle microstrutture sono stati condotti sui frammenti inglobati in resina epossidica, successivamente lucidati con paste abrasive (fino ad una granulometria di 0.25 micron). Tale procedura di preparazione dei campioni ha permesso di raccogliere i dettagli tessiturali di ciascun microframmento.

Gli strumenti utilizzati sono:

- Microscopio ottico a visione stereoscopica Olympus equipaggiato con fibre ottiche, per decifrare la microstruttura.
- Spettroscopio all'infrarosso Micro-FT-IR Nicolet iN10, con piano motorizzato, analisi in trasmissione, riflessione e modalità micro-ATR. L'analisi dei campioni mediante spettrometria micro-FTIR è stata effettuata con la tecnica micro-ATR direttamente sulle 6 sezioni stratigrafiche inglobate in resina epossidica, per identificare la natura dei composti chimici presenti.
- Microscopio elettronico a scansione Tescan della serie Mira XMU, equipaggiato con l'emettitore di tipo Schottky Field Emission, operante sia in alto vuoto che in basso vuoto, con camera grande. Il microscopio è dotato di sistema di microanalisi integrato EDS-WDS e di un sistema per analisi cristallografica EBSD. L'analisi dei campioni mediante SEM-EDS è stata effettuata direttamente sulle 6 sezioni stratigrafiche inglobate in resina epossidica, per individuare gli elementi chimici presenti e riconoscere le microstrutture.

Sia nell'analisi Micro-FTIR che nell'analisi SEM-EDS ogni strato è stato caratterizzato individualmente: i risultati ottenuti sono sempre descritti a partire dallo strato più interno analizzato fino a quello più superficiale.

Fase 1 - Analisi non invasive

Tappezzeria rossa della Stanza del Gran Scudiere

La tappezzeria rossa della Stanza del Gran Scudiere presenta diverse forme di alterazione, quali lacune, aree con evidente consumo del materiale e perdita della parte superiore del tessuto, alterazioni cromatiche (macchie e strisce di colore diverso rispetto al tessuto in buono stato di conservazione). Questi fenomeni sono più evidenti sulla parete della stanza esposta ad Ovest (vedi Fig. 3) e quindi potrebbero essere imputabili alle condizioni termoigrometriche specifiche di questa parete. Alcune di queste alterazioni erano già presenti al momento del restauro, come evidenziato dalla presenza di interventi di rammendo, mentre altre si sono probabilmente verificate negli ultimi anni dopo il restauro; queste ultime alterazioni possono essere la conseguenza di condizioni microclimatiche dell'ambiente indoor non sempre ottimali per la conservazione dei tessuti, in questo caso specifico un parametro responsabile del degrado potrebbe essere l'umidità della parete.

Fig. 3. Tappezzeria rossa sulla parete Ovest

Le analisi non invasive sono state condotte a confronto su un'area sana della tappezzeria e sull'area più degradata, già sottoposta a restauro, scelta in quanto indicativa di una delle situazione di massimo deterioramento possibile su questo tipo di tappezzeria. In particolare sono stati confrontati 2 dettagli dello stesso fiore, che si ripete nella decorazione (vedi figure 4 e 5).

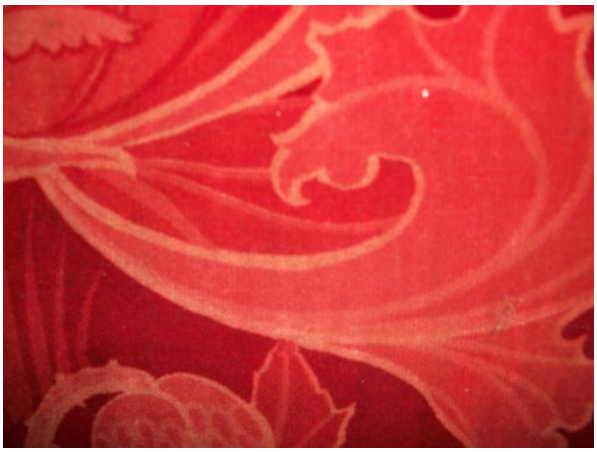


Fig. 4. Particolare della tappezzeria sana

Fig. 5. Particolare della tappezzeria degradata

L'osservazione con il microscopio portatile evidenzia, nell'area degradata, la perdita della parte superiore del tessuto, per cui risulta molto più evidente la struttura dell'armatura sottostante; dall'immagine dell'area degradata si vede molto bene anche l'intelaiatura aggiunta in fase di restauro (vedi figure 6 e 7).

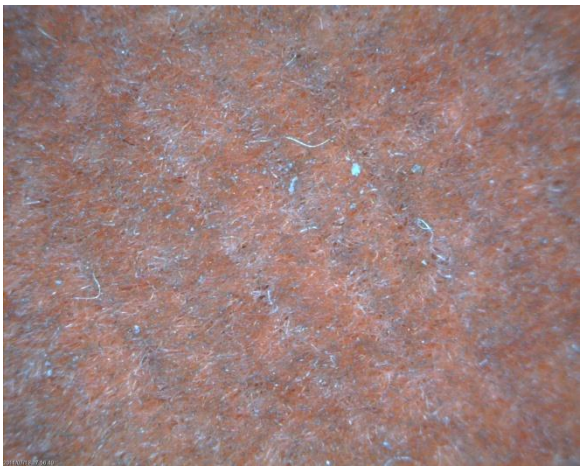


Fig. 6 – Particolare al microscopio della tappezzeria sana

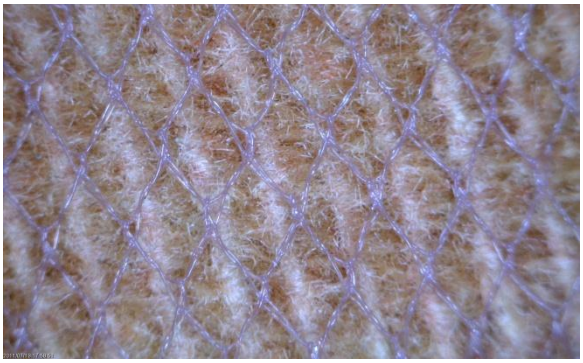


Fig. 7. Particolare al microscopio della tappezzeria degradata

L'analisi colorimetrica è stata effettuata in 2 punti di entrambe le zone. La tabella 1 riporta le coordinate cromatiche medie ottenute sia sulla zona sana di riferimento, sia sulla zona degradata, inoltre sono riportate in tabella le differenze cromatiche fra i dati ottenuti nelle 2 zone, sia in termini di singole coordinate (ΔL*, Δa* e Δb*), sia in termini di colore totale (ΔE*).

Tabella 1. Misure colorimetriche sulla tappezzeria rossa

Campione		L*	a*	b*	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*
Sano	SCI	28,45	32,34	18,37	-	-	-	-
	SCE	28,42	32,33	18,39	-	-	-	-
Degradato	SCI	44,60	13,07	23,05	16,15	- 19,27	4,68	25,57
	SCE	44,62	13,04	23,04	16,20	- 19,29	4,65	25,62

I dati riportati in tabella evidenziano delle differenze cromatiche molto elevate e chiaramente visibili già ad occhio nudo sia in termini di schiarimento (aumento del valore di L*>16), sia in termini di viraggio del colore dal rosso al verde (diminuzione di a*>19), sia di colore totale (ΔE*>25). Su questo substrato non risulta influente sui valori della misura la componente speculare, infatti i dati SCI e SCE, ottenuti rispettivamente con la componente speculare inclusa od esclusa, risultano praticamente uguali.

Tappezzeria azzurra della camera da letto del Re Umberto I

La tappezzeria azzurra della camera da letto del Re Umberto I, montata su pannelli di legno, si presenta piuttosto disuniforme, soprattutto dal punto di vista dell'adesione al supporto ligneo e delle caratteristiche cromatiche, con diverse macchie di colore in corrispondenza delle quali il manufatto risulta, ad una osservazione macroscopica, ingiallito o di colore leggermente più scuro (vedi Fig. 8).

Fig. 8. Tappezzeria azzurra sulla parete Nord

Le variazioni cromatiche della tappezzeria possono essere imputabili o alle condizioni microclimatiche della stanza, in particolare ad alcuni parametri microclimatici specifici quali la luce per quanto riguarda l'ingiallimento (che sembra infatti più evidente sulle pareti maggiormente soggette all'irraggiamento solare che penetra dalle persiane), o al deterioramento legato all'uso, in particolare per quanto riguarda le stato di conservazione dell'area degradata vicino al camino, e quindi verosimilmente già presente al momento del restauro.

L'analisi della tappezzeria è stata condotto su 4 zone diverse:

1 – una zona dietro il pannello mobile che nasconde la cassaforte che, essendo rimasta sempre protetta, è stata presa come zona di riferimento, in quanto in questa area la tappezzeria risulta molto poco alterata rispetto alle condizioni originali (vedi Fig. 9);

2 – una zona di fronte alle finestre, dove l'ingiallimento risulta molto evidente (vedi Fig. 10);

3 – una zona di fianco al letto che presenta anch'essa un ingiallimento evidente (vedi Fig. 11);

4 – una zona di fianco al camino che appare leggermente ingiallita ed in cui è evidente un degrado del tessuto (vedi Fig. 12).

Fig. 9. Zona sotto il pannello mobile

Fig. 10. Zona di fronte alla finestra

Fig. 11. Zona di fianco al letto

Fig. 12. Zona di fianco al camino

L’osservazione delle 4 zone con il microscopio digitale permette di rilevare che solo nella zona 4 è evidente un’alterazione delle fibre tessili rispetto alla situazione di partenza del manufatto (vedi la Fig. 13 a confronto con la Fig. 15), con una perdita di parte delle fibre (evidente soprattutto nei particolari in rilievo) e una frammentazione di quelle della trama di base con una conseguente perdita delle proprietà meccaniche del tessuto.

Le zone 2 e 3, che risultano ingiallite già ad una osservazione macroscopica, non evidenziano invece all’osservazione con il microscopio un’alterazione delle fibre (vedi la Fig. 13 a confronto con la Fig. 15, relativa alla zona 2, per la zona 3 i risultati ottenuti sono del tutto analoghi)

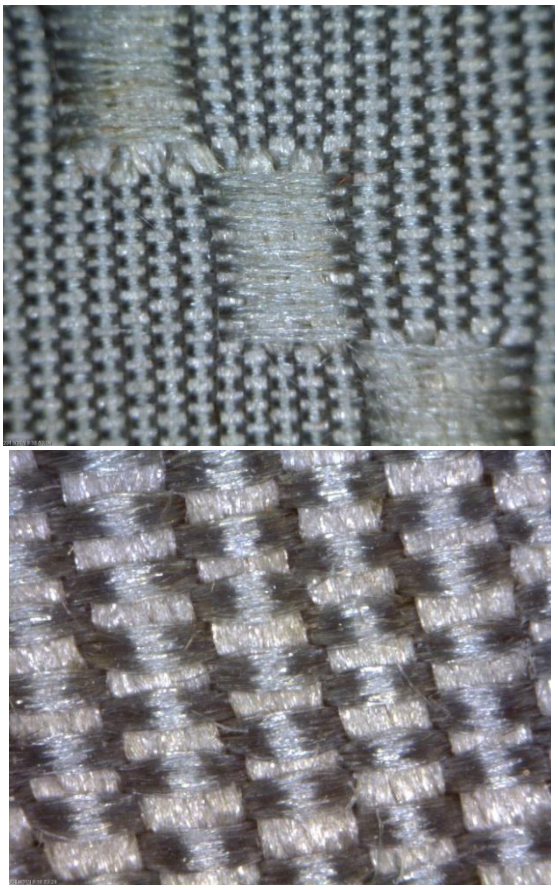


Fig. 13. Particolare al microscopio della tappezzeria della zona 1
(a sin. a basso ingrandimento, a dx. ad elevato ingrandimento)

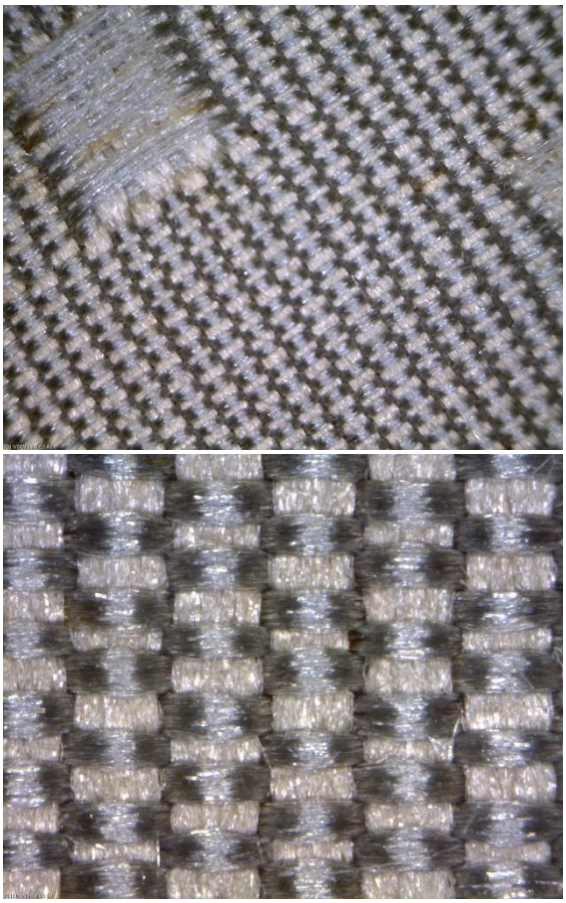


Fig. 14. Particolare al microscopio della tappezzeria ingiallita della zona 2 (a sin. a basso ingrandimento, a dx. ad elevato ingrandimento)

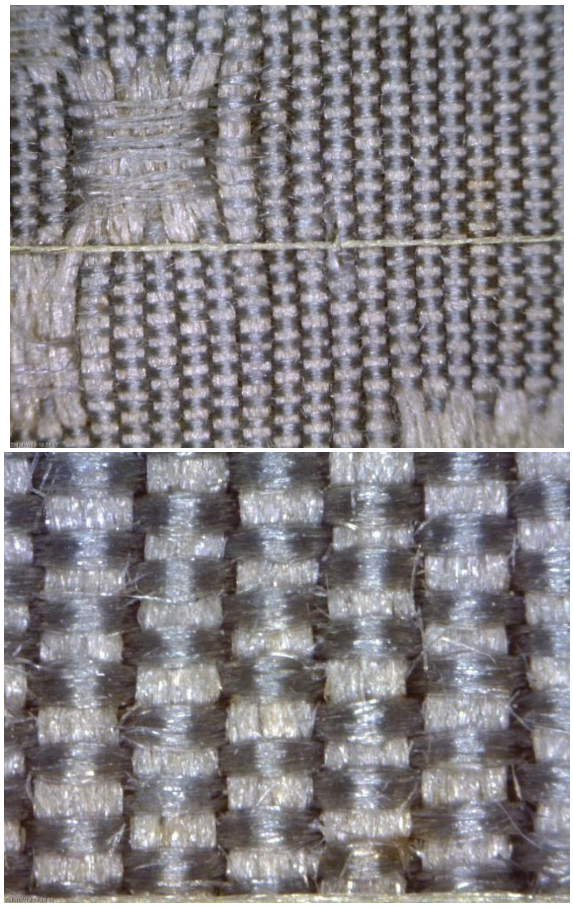


Fig. 15. Particolare al microscopio della tappezzeria degradata della zona 4

(a sin. a basso ingrandimento, a dx. ad elevato ingrandimento)

La caratterizzazione colorimetrica ha previsto due punti di analisi nelle zone 1 e 2, in quanto sono abbastanza Estese e non appaiono completamente omogenee dal punto di vista cromatico, ed un solo punto di analisi nelle zone 3 e 4, di dimensioni più ridotte.

I risultati ottenuti con lo spettrofotometro sono riportati nella Tabella 2. Per le aree 1 e 2 sono riportati in tabella solo i valori medi fra i 2 punti analizzati, in quanto le misure non sono risultate così discordanti da farli valutare separatamente. Per la zona 1, presa come riferimento, vengono riportate in tabella solo le coordinate colorimetriche ottenute, mentre per le zone 2, 3 e 4 vengono riportate sia le coordinate colorimetriche ottenute, sia le differenze rispetto alle coordinate della zona 1.

Tabella 2. Misure colorimetriche sulla tappezzeria azzurra

Zona		L*	a*	b*	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*
1	SCI	51,78	- 8,95	4,09	-	-	-	-
	SCE	51,66	- 8,95	4,11	-	-	-	-
2	SCI	59,21	- 6,82	10,95	7,43	2,13	6,86	10,33
	SCE	59,03	- 6,84	10,97	7,37	2,11	6,86	10,29
3	SCI	58,04	- 5,34	11,24	6,26	3,61	7,15	10,17
	SCE	58,02	- 5,34	11,28	6,36	3,61	7,17	10,24
4	SCI	51,42	- 6,42	10,17	- 0,36	2,53	6,08	6,60
	SCE	51,42	- 6,42	10,19	- 0,24	2,53	6,08	6,59

I dati riportati in tabella evidenziano, per le 2 zone che appaiono ingiallite ad una osservazione macroscopica, delle differenze cromatiche sensibili (ΔE*>10), imputabili ad uno schiarimento del tessuto (aumento del valore di L* maggiore di 7 nella zona 2 e maggiore di 6 nella zona 3) e ad un aumento della componente gialla rispetto a quella blu (aumento del valore di b* di poco inferiore a 7 nella zona 2 e maggiore di 7 nella zona 3). La zona 4 presenta un'alterazione cromatica totale meno marcata (ΔE*>6,5), imputabile però in questo caso quasi esclusivamente ad un incremento della componente gialla (Δb*>6).

Anche su questo substrato non risulta influente sui valori della misura la componente speculare, infatti i dati SCI e SCE, ottenuti rispettivamente con la componente speculare inclusa od esclusa, risultano praticamente uguali.

Materiali lapidei del pavimento del corridoio

Il pavimento del corridoio è in materiale lapideo naturale e presenta una decorazione a rombi che sfrutta le differenze cromatiche di 3 differenti materiali: il rosso ammonitico veronese, il bianco carrara e il grigio bardiglio. Tali materiali presentano in alcuni punti delle fratturazioni molto evidenti (vedi Fig. 16).

Fig. 16. Particolare del corridoio in materiale lapideo

Si è ritenuto utile caratterizzare tali materiali attraverso l'osservazione allo stereo microscopio abbinando a questa la misura delle coordinate colorimetriche, anche in funzione di una eventuale sostituzione delle parti fratturate.

Per il riconoscimento dei litotipi è stata sufficiente l'osservazione macroscopia poiché la loro tessitura è leggibile a tale scala di osservazione.

Le osservazioni allo stereomicroscopio portatile, riportate nelle figure 17, 18 e 19, evidenziano alcuni difetti dei materiali, molti dei quali originari della stessa roccia, che possono rappresentare dei punti di debolezza del materiale.

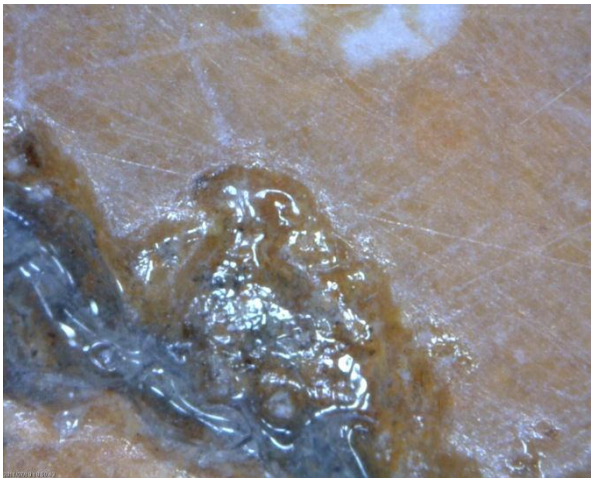


Fig. 17. Particolare allo stereomicroscopio del Rosso di Verona. Dettaglio di un intervento su frattura

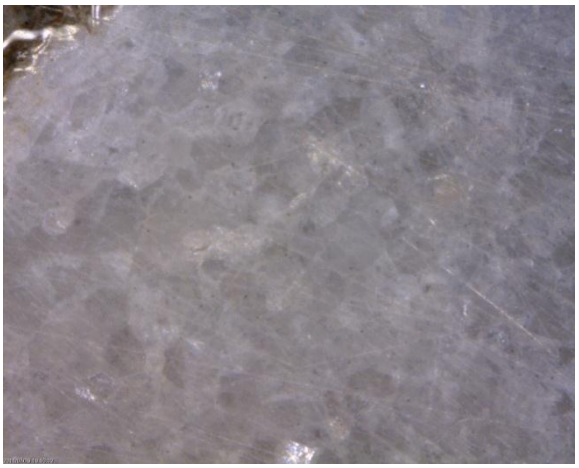


Fig. 18. Particolare al microscopio del grigio Marmo Bardiglio. Sono visibili i cristalli a grana media di calcite, e la tessitura granoblastica

Fig. 19. Particolare al microscopio del bianco Bianco di Carrara. L'immagine mostra suture stilolitiche, riferibili alla tessitura originaria del materiale.

Tali superfici rappresentano delle discontinuità tessiturali e dei punti di debolezza del materiale naturale

I 3 materiali lapidei sono stati anche analizzati con lo spettrofotometro e le coordinate cromatiche ottenute sono riportate in tabella 3.

Tabella 3. Misure colorimetriche sui materiali lapidei

Materiale lapideo		**L***	**a***	**b***
Rosso	SCI	53,24	18,25	21,41
	SCE	51,16	19,23	23,25
Grigio	SCI	58,44	- 0,89	- 1,09
	SCE	55,85	- 0,99	- 1,11
Bianco	SCI	74,18	- 0,35	5,25
	SCE	72,69	- 0,38	5,44

Nell'Allegato 1 vengono fornite le schede tecniche dei tre materiali lapidei naturali identificati.

Fase 2 - Analisi invasive

Intonaco decorato nella nicchia della finestra dell'Armeria del Re

Per caratterizzare le situazioni di degrado dell'intonaco decorato che si trova nella nicchia della finestra dell'Armeria del Re sono stati prelevati 4 campioni. Come evidenziato dalla Fig. 20, l'intonaco è in uno stato di degrado avanzato, con evidenti distacchi, dovuti ad una perdita d'acqua all'interno della muratura a causa di una tubatura danneggiata. L'osservazione della parte danneggiata con lampada di Wood evidenzia sia la presenza di rifacimenti a secco nella parte inferiore della decorazione sia la presenza di componenti organiche anche nello strato preparatorio che, in alcuni punti di distacco rilevante, è venuto alla luce. Queste 2 situazioni sono rappresentate dalle parti di colore viola più intenso della Fig. 21.

Fig. 20. Intonaco decorato (luce normale)

Fig. 21. Intonaco decorato (lampada di Wood)

Nei punti di maggior degrado l'aspetto superficiale decoeso e con un deposito bianco pulverulento fa ipotizzare la presenza di efflorescenze saline, di cui può essere interessante studiare la natura chimica.

I quattro campioni prelevati sono costituiti da:

1 – Intonachino affiorante in un punto di distacco della decorazione pittorica, viola alla luce della lampada di Wood, e che presenta pulverulenza superficiale;

2 – Scaglia già distaccata, che costituisce la parte più Esterna della stratigrafia dell'intonaco;

3 – Frammento prelevato al di sotto di una delle scaglie in fase di distacco, che presenta la stratigrafia della parte più profonda dell'intonaco;

4 – Efflorescenze saline con aspetto pulverulento prelevate in un punto dove la decorazione pittorica si è staccata.

Analisi campione 1

Le immagini relative al prelievo del campione illustrano in generale e nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi figure 22 e 23)..

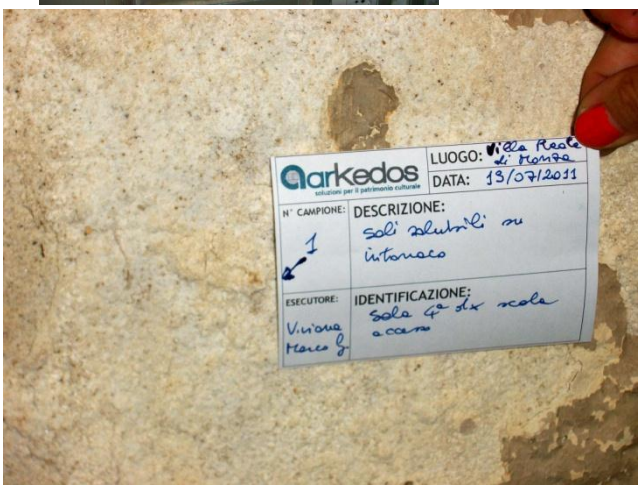
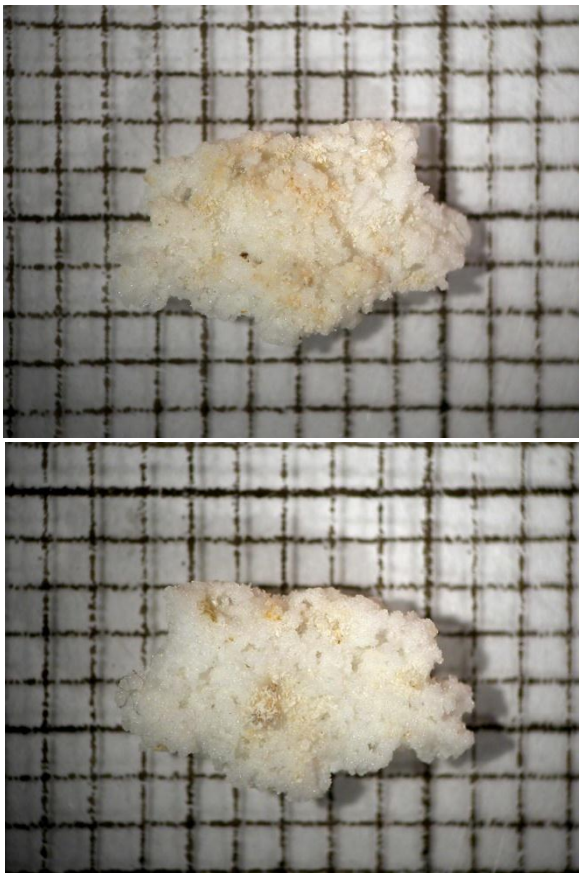


Fig. 22. Foto generale del campionamento **Fig. 23.** Foto del dettaglio del campionamento

<u>Stereomicroscopio</u>

Il frammento, prelevato in un punto della superficie da cui si è staccato l'intonaco decorato, si presenta poco coeso su entrambe le facce e omogeneamente di colore bianco sporco (vedi Fig. 24).



Fronte Retro

Fig. 24. Fotografia dei due lati del campione

Il campione è stato inglobato in resina epossidica, ma la sua scarsa coesione non permette la levigatura del campione.

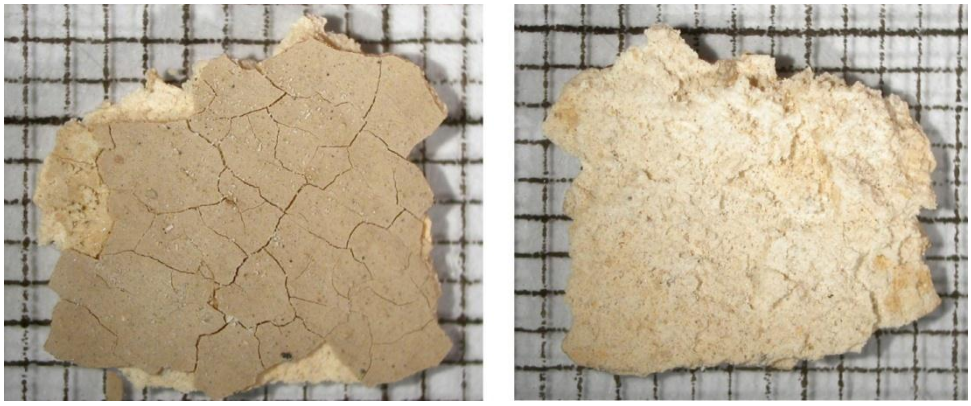
Analisi campione 2

L'immagine relativa al prelievo del campione illustra nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi Fig. 25).

Fig. 25. Foto del dettaglio del campionamento

Stereomicroscopio

Il campione rappresenta la porzione superficiale di un intonachino (Fig. 26). Lo strato inferiore, di colore bianco, ha aspetto pulverulento e si mostra poco coeso; lo strato di colore giallino-beige ha invece un comportamento rigido e un aspetto coeso, ma è percorso da una fitta rete di microfratture probabilmente sorte a causa di una variazione di volume dello strato sottostante.



Fronte Retro

Fig. 26. Il campione 2 visto allo stereomicroscopio

Stratigrafia e SEM-EDS

Fig. 27. Immagine in microscopia ottica della stratigrafia del campione 2

Il microprelievo risulta costituito da due strati (Fig. 27): il più profondo, di colore bianco nella Fig. 27, è lo strato tecnico di preparazione ed è costituito da gesso con minimi inquinamenti di materiale silicatico (Fig. 28), mentre la finitura di colore, strato Esterno giallino, ha uno spessore medio di circa 20 – 30 micron ed è a base di Piombo (Fig. 29), tuttavia sono ancora presenti piccole quantità di una componente silicatica, rappresentata dai picchi di Mg-Si-Al +/- Ca. Il pigmento è litargirio, addittivato con piccole quantità di terra naturale

In microscopia elettronica (Fig. 30) è ben visibile la superficie di scollamento tra i due strati e la diffusa microporosità dello strato di preparazione. Per contro, lo strato di finitura è molto compatto.

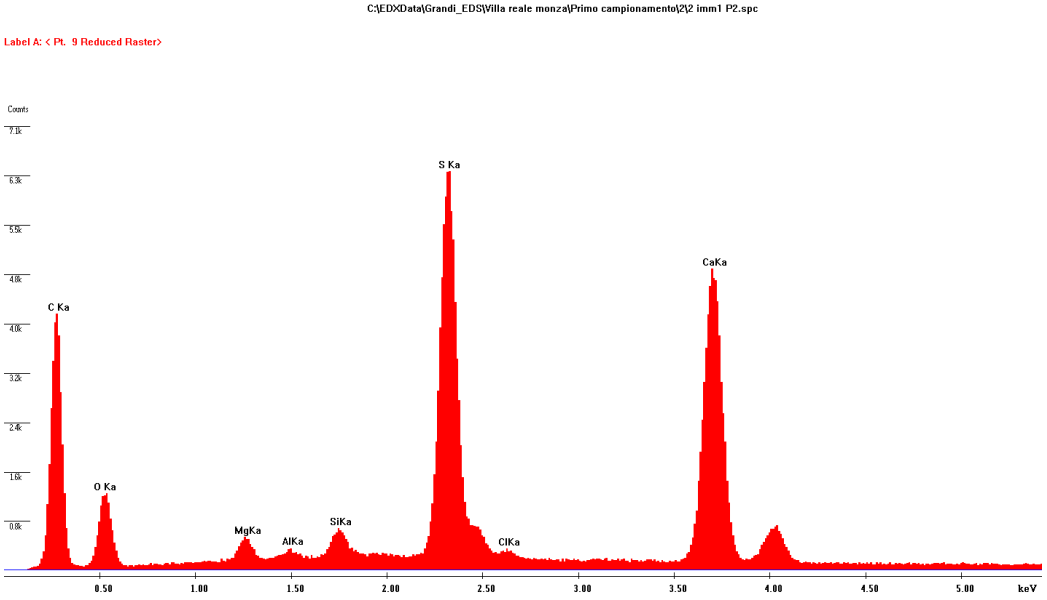


Fig. 28. Spettro in dispersione di energia (EDX) dello strato preparatorio bianco, campione 2.

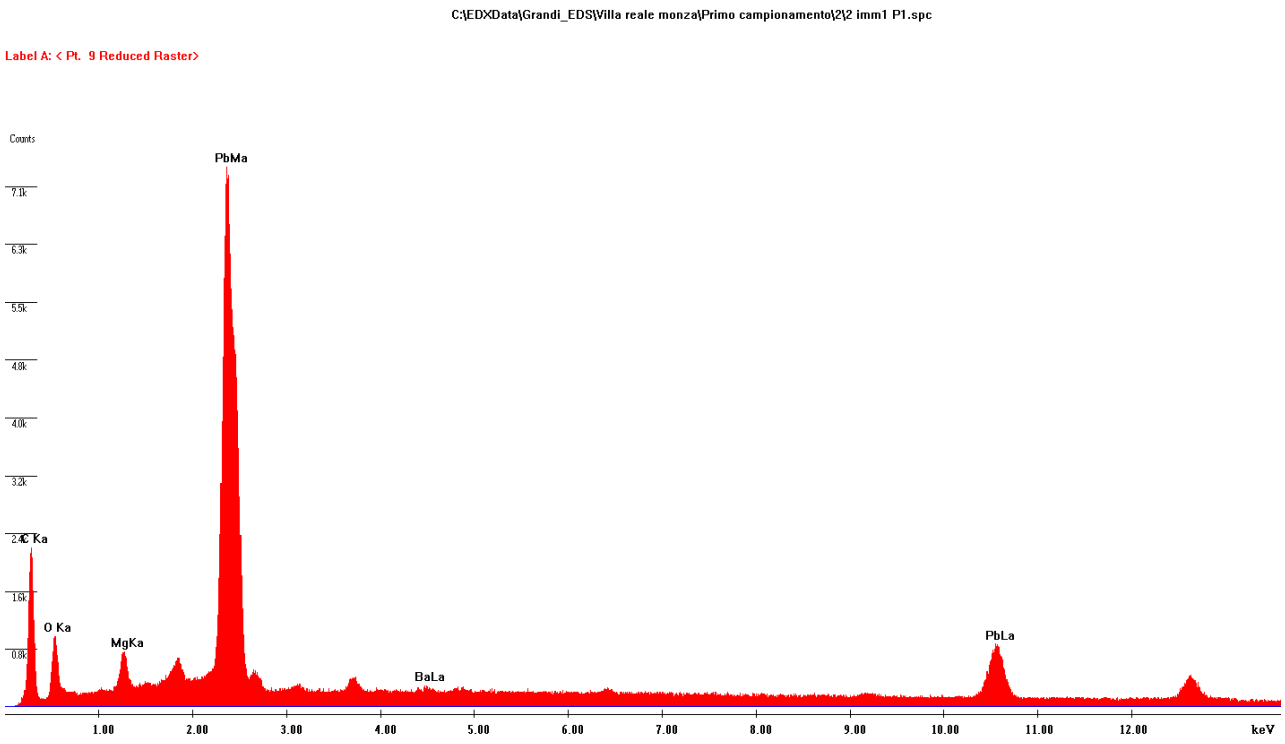


Fig. 29. Spettro in dispersione di energia (EDX) dello strato di colore, campione 2.

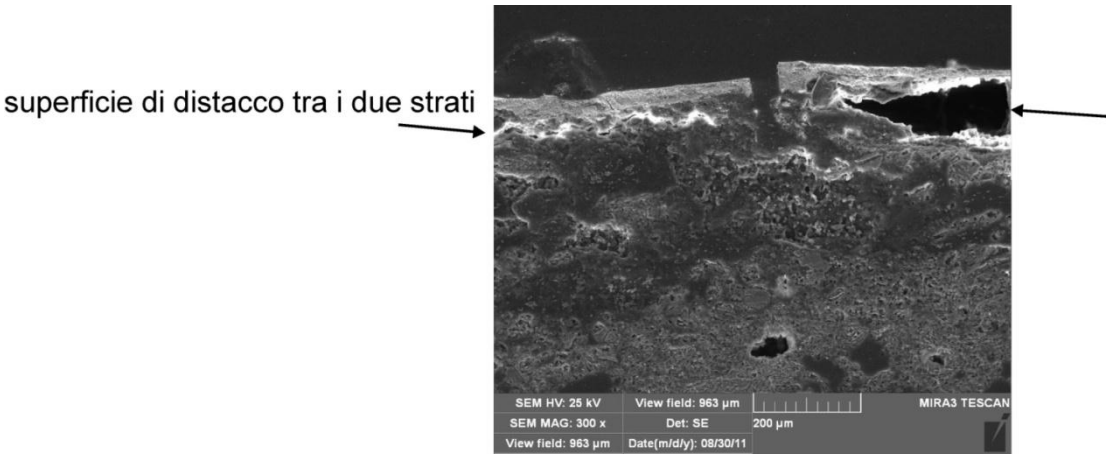


Fig. 30. Immagine in elettroni retro diffusi della porzione superiore del campione 2

Micro FTIR

Le indagini in micro FTIR hanno permesso di individuare, nello strato bianco preparatorio, i picchi del carbonato (picchi a 1414 cm-1, a 826 cm-1 ed a 731 cm-1), del gesso (ma in quantità inferiore rispetto allo strato precedente) e tracce di olio (Fig. 31).

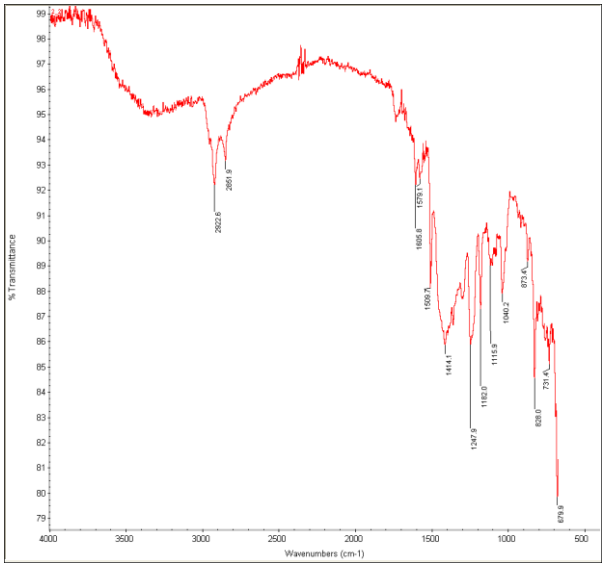


Fig. 31. Misura al Micro FTIR dello strato preparatorio bianco del campione 2.

Nello strato di finitura giallino-beige (Fig. 32) si individua la presenza di carbonato (picco a 1396 cm-1), di gesso (picchi a 3550 cm-1 ed a 1606 cm-1 dell'acqua di idratazione e picchi a 1182 cm-1, a 1109 cm-1 ed a 681 cm-1 del gruppo solfato), e di olio in bassi quantitativi (picco a 1733 cm-1 oltre a quelli a 2925 ne 2851 comuni anche alla resina epossidica dell'inglobamento, a cui si possono attribuire anche i picchi a 1509 cm-1 ed a 1246 cm-1).

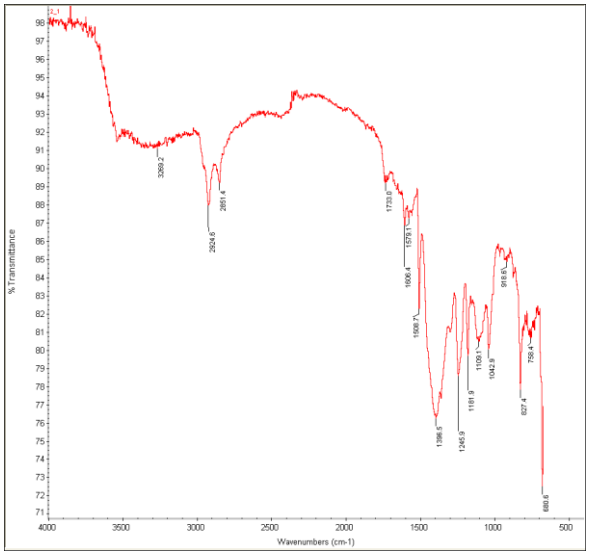


Fig. 32. Misura al Micro FTIR dello strato finitura giallino del campione 2.

Analisi campione 3

L'immagine relativa al prelievo del campione3 illustra nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi Fig. 33).

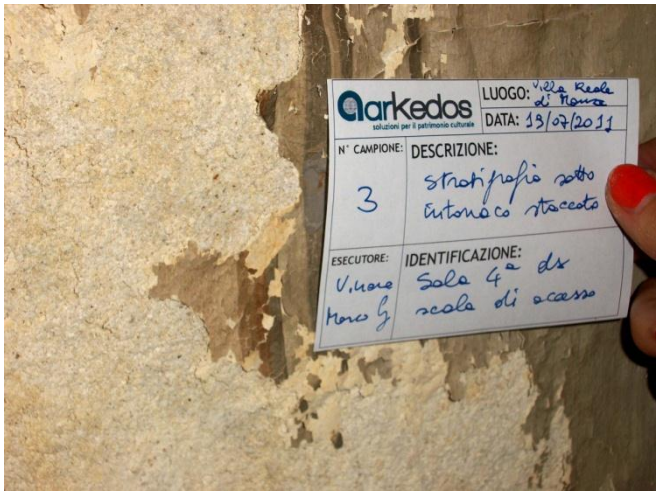


Fig. 33. Foto del dettaglio del campionamento

Stereomicroscopio

Il campione rappresenta la sola porzione di strato preparatorio dell'intonachino e si colloca esattamente al di sotto della sequenza parziale descritta nel campione 2. L'aspetto del campione macroscopico è quello di un materiale molto decoeso. Il prelievo risulta comunque strutturato su due livelli: quello inferiore, di colore più chiaro tendente al bianco, con aspetto pulverulento; lo strato più superficiale, più sottile e più consistente e con variazione cromatiche anche alla scala di osservazione del microprelievo (Fig. 34).

Fronte Retro

Fig. 34. Il campione 3 visto allo stereomicroscopio

Stratigrafia

Entrambi i livelli sono costituiti da gesso (Fig. 35). Lo strato più profondo di colore bianco, presenta minimi inquinamenti di materiale silicatico; lo strato superiore risulta anch'esso costituito da gesso, ma più puro. La stratigrafia mostra che lo strato preparatorio è a tratti più complesso, con variazioni sia composizionali che microstrutturali.

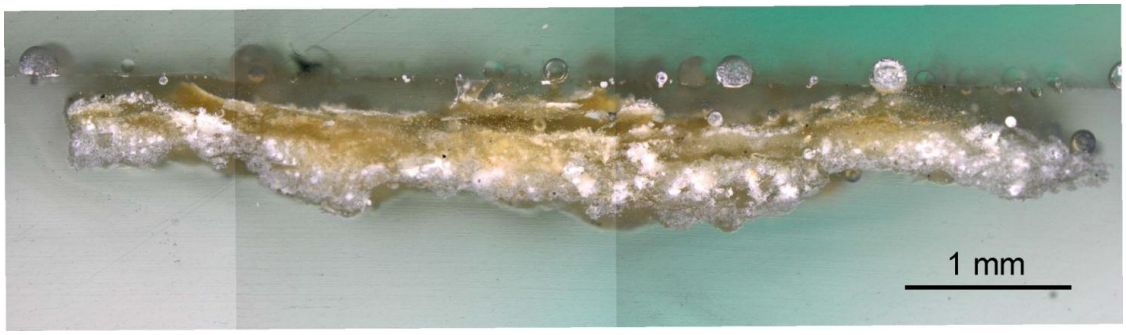


Fig. 35. Immagine in microscopia ottica della stratigrafia del campione 3

SEM-EDS

In microscopia elettronica è possibile apprezzare i dettagli della tessitura dei due strati, la loro porosità e la presenza di elementi tessiturali (fasi) di dimensioni molto variabili. Abbondanti le macroporosità che raggiungono le dimensioni anche di 15 – 20 micron (Fig. 36).

I cristalli più sviluppati presentano forme prismatiche allungate, dove la tipica sfaldatura del gesso risulta regolare e ben evidente (Fig. 36) e la composizione è quella di un gesso molto puro (Fig. 37). I bordi di grano sono talvolta netti, talvolta più articolati, quasi ad indicare l'alternanza di fasi di cristallizzazione a fasi di dissoluzione (Fig. 38).

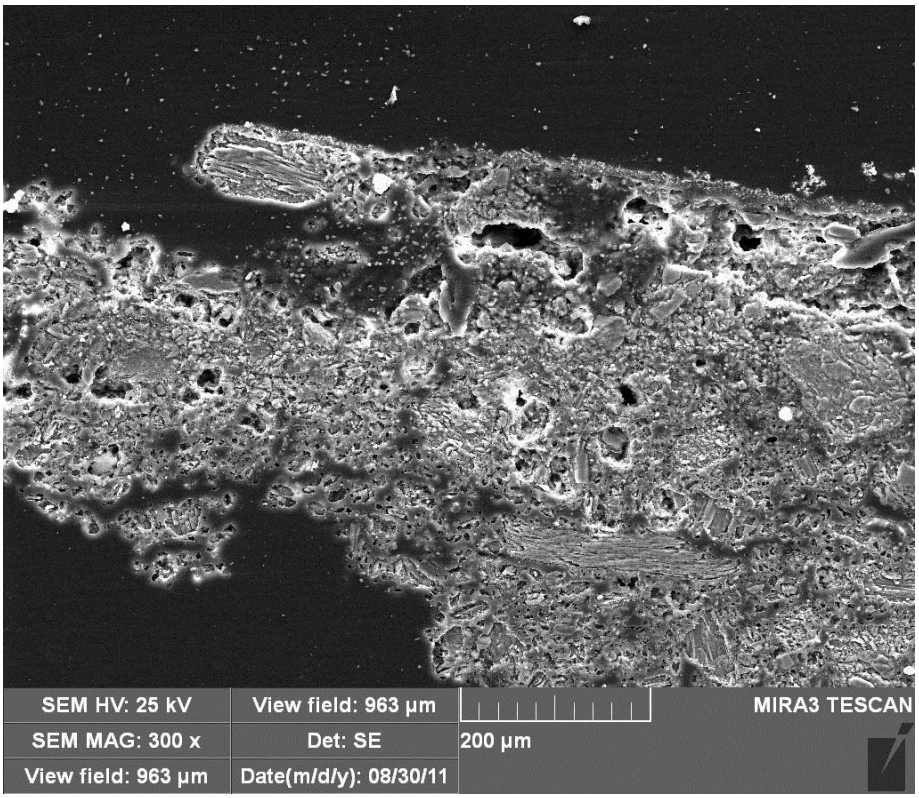


Fig. 36. Immagine in elettroni retro diffusi del campione 3

Tale tessitura è la testimonianza di una ricristallizzazione del materiale, a seguito di un processo di solfatazione. A livello macroscopico questo giustifica la scarsa aggregazione e l'aspetto polverulento del campione

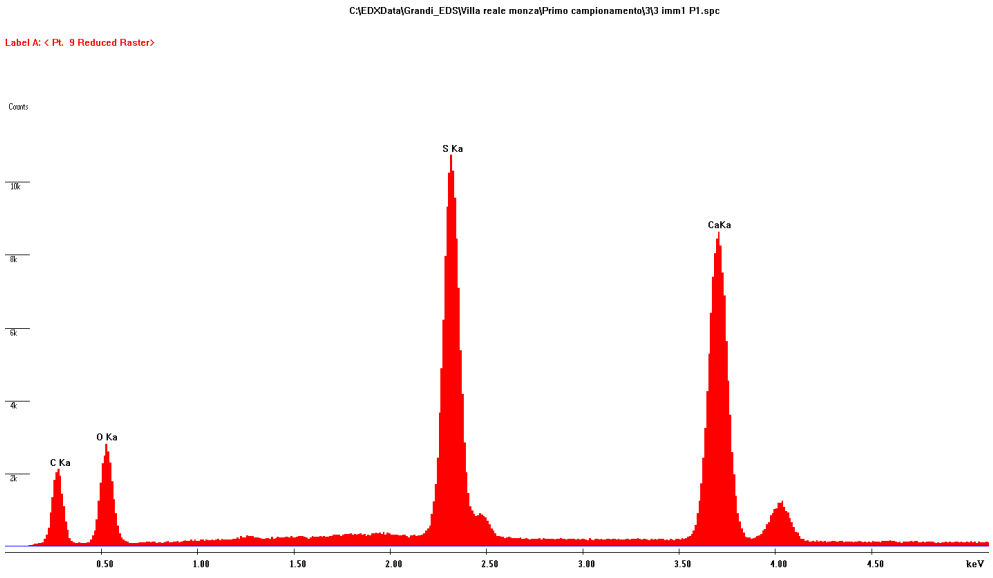


Fig. 37. Spettro in EDX di un cristallo di gesso.

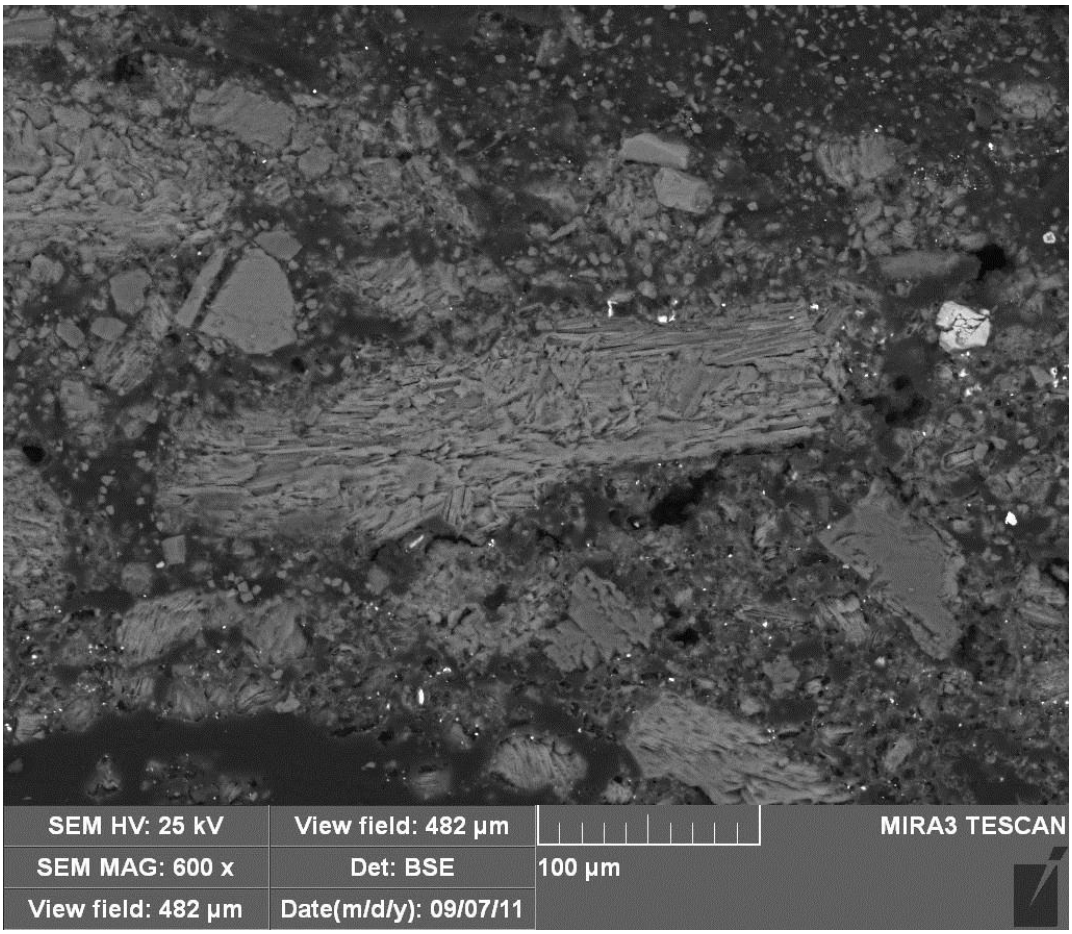


Fig. 38. Immagine in elettroni retro diffusi si un cristallo di gesso fibroso, con bordi frastagliati, ben sviluppato.

Micro FTIR

Le misure al Micro FTIR , condotte sul “bulk” del campione (Fig. 39), indicano la presenza di gesso (doppietto a 1102 cm-1), di poco carbonato (picchi a 1458 cm-1 e a 827 cm-1) e di silicato (picco a 1035 cm-1).

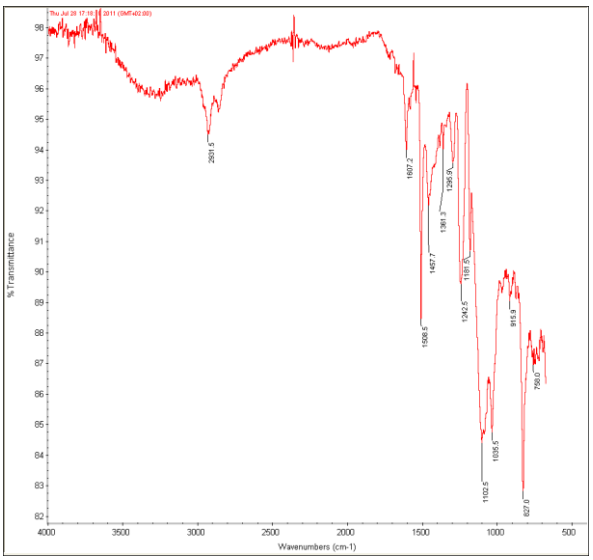


Fig. 39. Misura al Micro FTIR del campione 3.

In sintesi, l'interpretazione della microstratigrafia completa dell'intonaco può essere interpretata come dallo schema in Fig. 40.

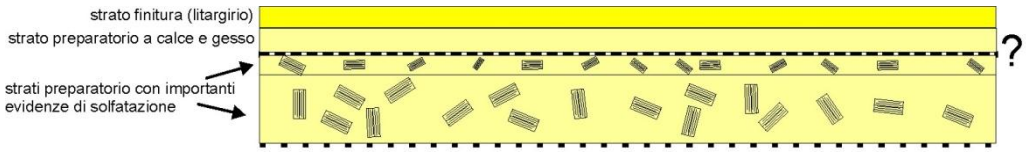


Fig. 40. Schema interpretativo della stratigrafia dell'intonaco (campione 2 e 3)

L'insieme dei dati analitici ottenuti evidenzia per questo intonaco decorato uno stato di degrado molto avanzato attribuibile ad un evento traumatico, rottura della tubatura dell'acqua, ma su cui si sono poi innestati fenomeni di degrado legati anche alla presenza di inquinanti atmosferici , quali gli ossidi di zolfo, che in condizioni di elevata umidità causano un notevole degrado delle superfici lapidee, decorate e non. Da questi risultati emerge quindi evidente l'importanza di un controllo delle condizioni termoigrometriche delle stanze e della concentrazione degli inquinanti atmosferici, per evitare degradazioni ulteriori di questa parete e di altre.

Dorature del muretto divisorio nella Camera da letto di Re Umberto I

Le dorature del muretto divisorio nella Camera da letto di Re Umberto I presentano diverse lacune di dimensione variabile (vedi Fig. 41); i distacchi sono imputabili per la maggior parte ad urti, ma non si può escludere che potrebbero essere anche conseguenza di un degrado del materiale di supporto della doratura. Risulta quindi interessante caratterizzare due punti diversi della cornice dorata, uno sul lato Ovest del muretto (campione n. 5) e uno sul lato Est del muretto (campione n. 6), effettuando dei prelievi sufficientemente in profondità da permettere anche la caratterizzazione della preparazione, per capire se in essa sono in atto dei processi di degrado chimico.

Fig. 41. I due lati del muretto (lato Ovest a sin. e lato Est a dx)

Analisi campione 5

L'immagine relativa al prelievo del campione illustra nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi Fig. 42).

Fig. 42. Foto del dettaglio del campionamento

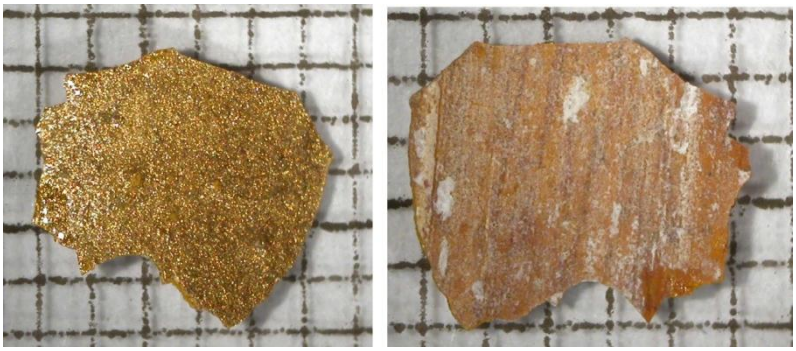
Stereomicroscopio

Il campione rappresenta una delle dorature delle cornici collocate entro la Camera di Re Umberto I

(Fig. 43). Il materiale ha un aspetto compatto e buone caratteristiche di resistenza.

Ben adesi sono pure gli strati di finitura, che possono essere separati con difficoltà.

Punto di debolezza è l'adesione al substrato ed al suo strato preparatorio.



Fronte Retro

Fig. 43. Il campione 5 visto allo stereomicroscopio

Stratigrafia e SEM-EDS

Il microprelievo risulta costituito da più strati. La risoluzione dell'immagine in microscopia ottica non permette di distinguere gli strati più sottili e di conseguenza la corretta lettura della stratigrafia è stata redatta combinando le immagini in microscopia ottica (Fig. 44) con la microscopia elettronica (Fig. 45).

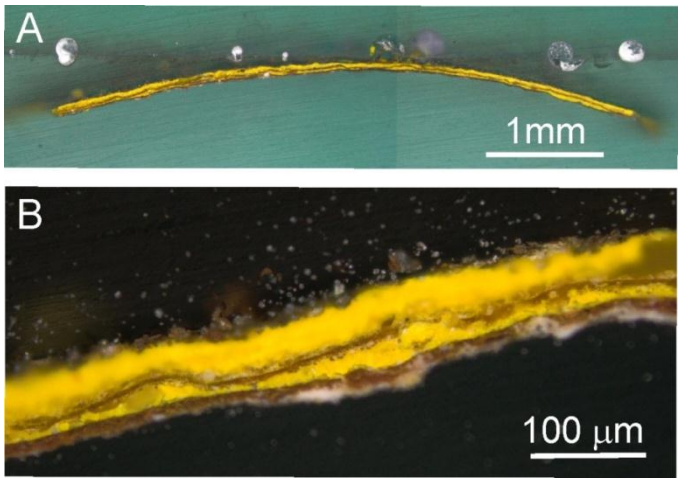


Fig. 44. Immagine in microscopia ottica della stratigrafia del campione 5. A: visione d'insieme; B: dettaglio della successione degli strati di spessore più consistente.

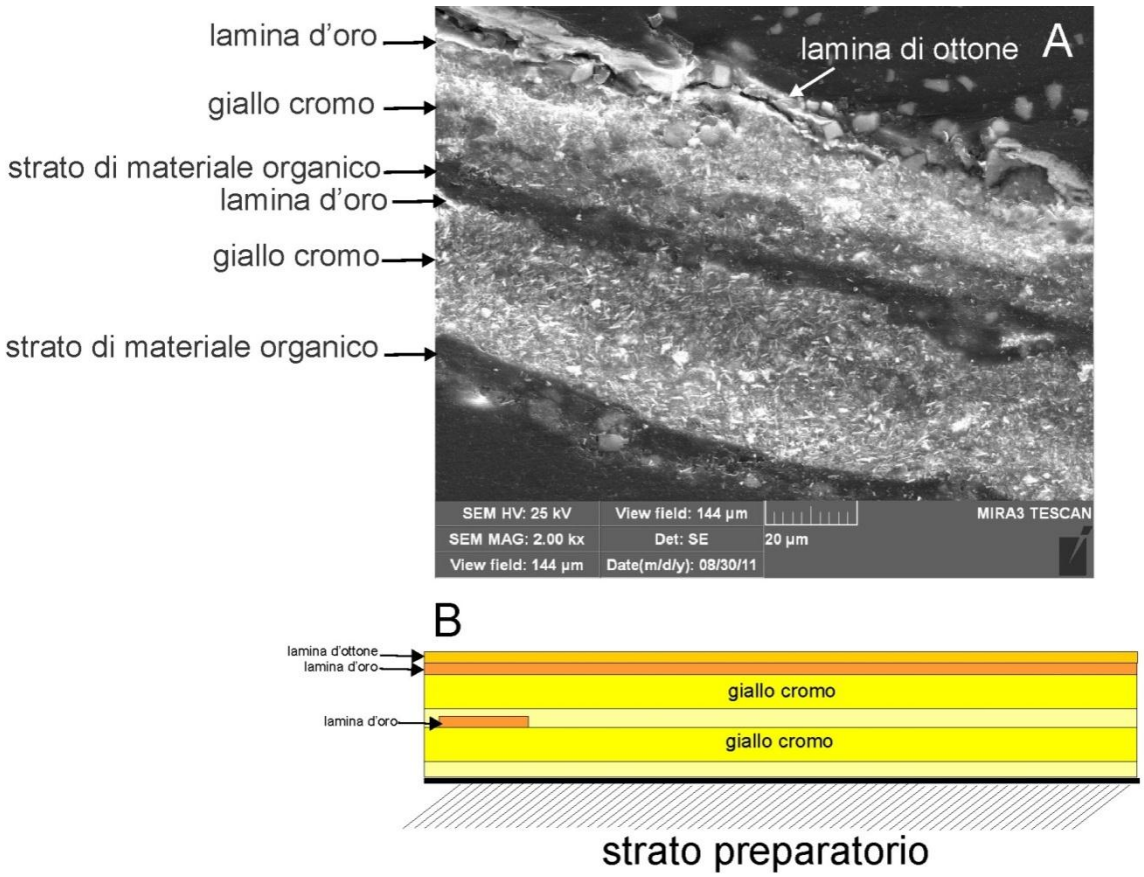


Fig. 45. Immagine in elettroni retrodiffusi del campione 5 (A) e schema interpretativo della sequenza stratigrafica rilevata nel campione 5 (B)

In elettroni retrodiffusi, la sequenza stratigrafica appare complessa: sullo strato preparatorio bianco, presente solo in piccoli brandelli visibili nell'immagine in microscopia ottica (Fig. 45 B), sono presenti due sequenze che portano alla messa in opera di lamine metalliche. Sullo strato preparatorio, uno strato organico, poi identificato al Micro FTIR, è steso un livello di giallo di cromo (Fig. 47). Il pigmento è probabilmente messo in opera con un legante organico. Il pigmento risulta costituito da

cristalli allungati di forma prismatica, di dimensioni medie comprese tra 1 – 2 micron (Fig. 48).

Su tale strato di colore, in modo molto frammentario, è presente una prima lamina di oro avente una composizione molto pura (Au_2O_3=93.7 wt%; AgO=3.9 wt%; CuO=2.2 wt%) (Fig. 49).

La porzione più superficiale della sequenza stratigrafica vede ancora la successione: strato di materiale organico, finitura di colore in giallo di cromo, brandelli di lamina d'oro (Fig. 45). La composizione in wt% in ossidi di questa lamina metallica risulta la seguente: Au_2O_3=94.3 wt%; AgO=2.0 wt%; CuO=3.6 wt%) (Fig. 50).

La lamina metallica in superficie risulta di ottone (Fig. 51).

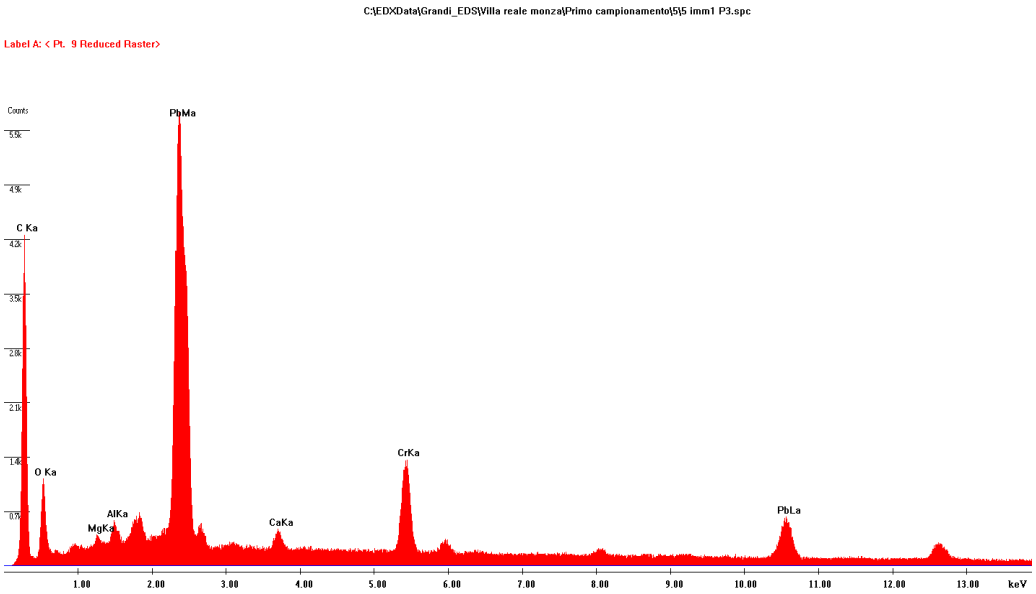


Fig. 47. Spettro EDX del pigmento Giallo di Cromo del campione 5

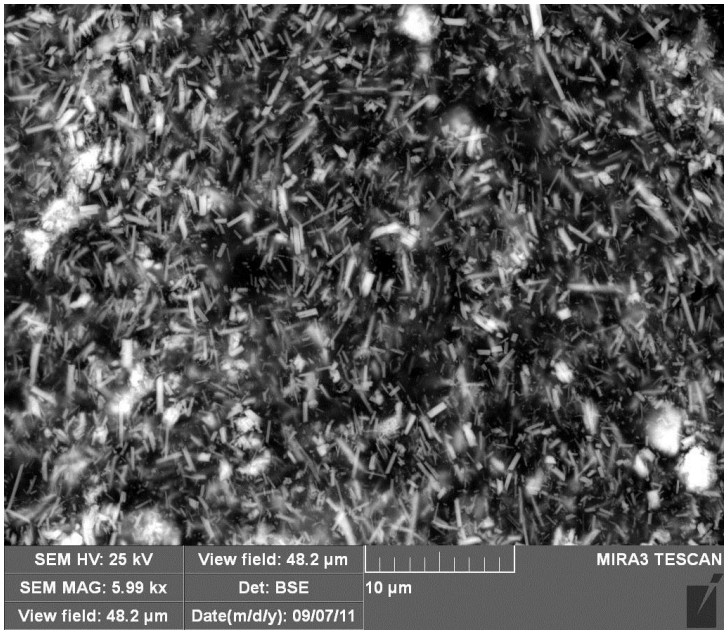


Fig. 48. Tessitura di un livello giallo di cromo del campione 5. Il pigmento è costituito da piccoli cristalli prismatici di forma regolare e in misura molto minore da aggregati di cristalli aciculati.

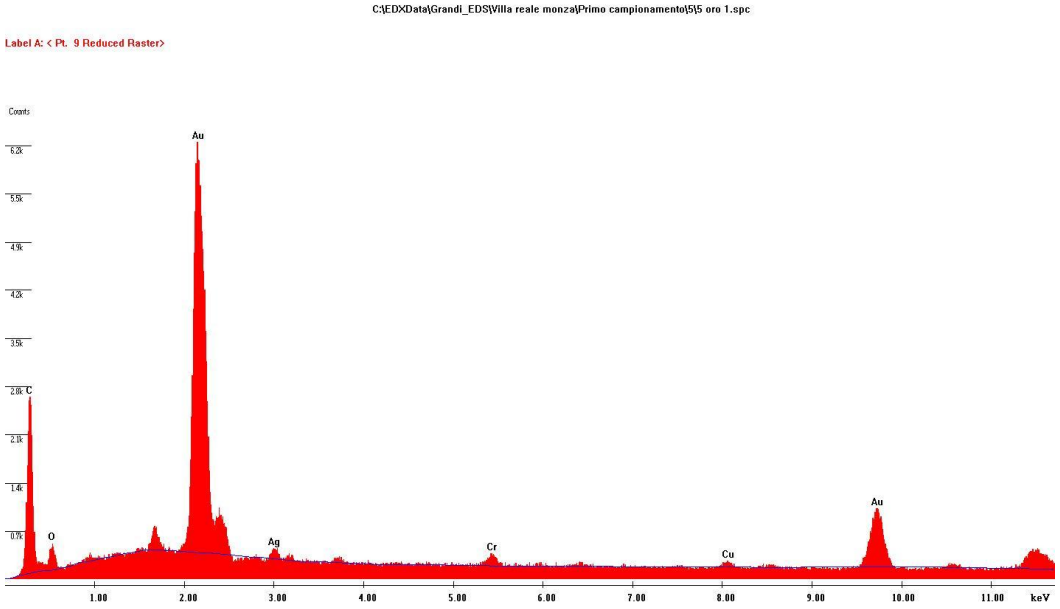


Fig. 49. Spettro EDX della lamina metallica più interna, presente nel campione 5 (vedi Fig. 45 B). La presenza di tracce di Cromo e Piombo sono da attribuire alla interferenza del sottostante strato di pigmento giallo cromo

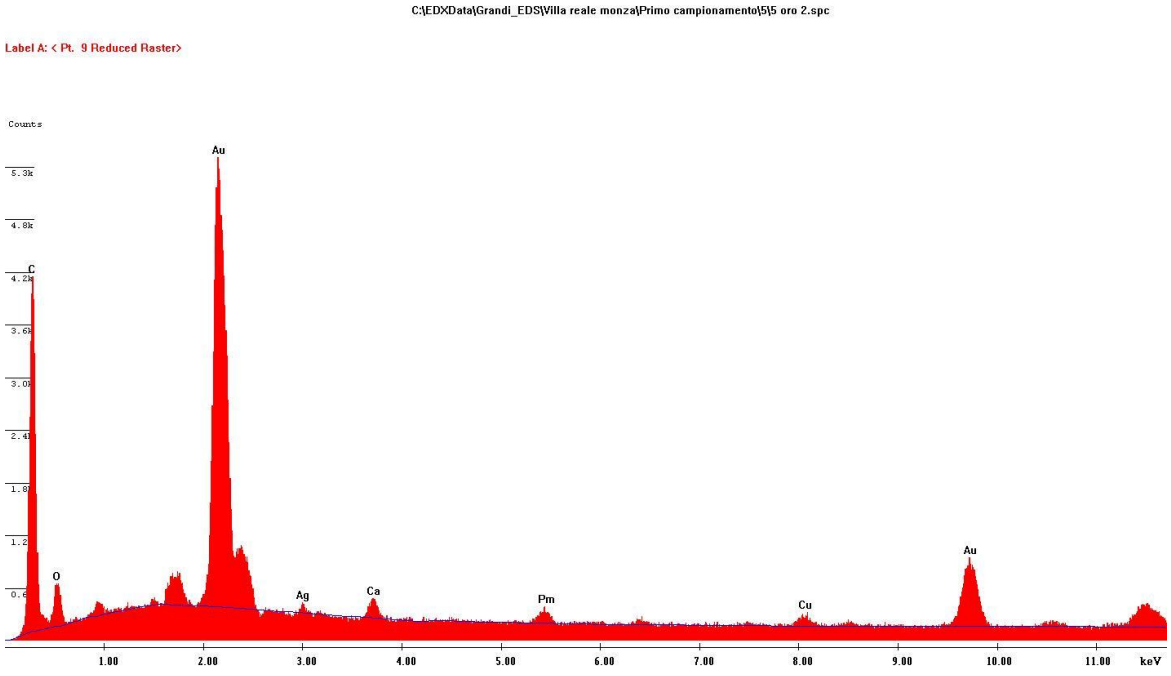


Fig. 50. Spettro EDX della lamina d'oro posto sul secondo strato di colore giallo, campione 5 (vedi Fig. 45 B)

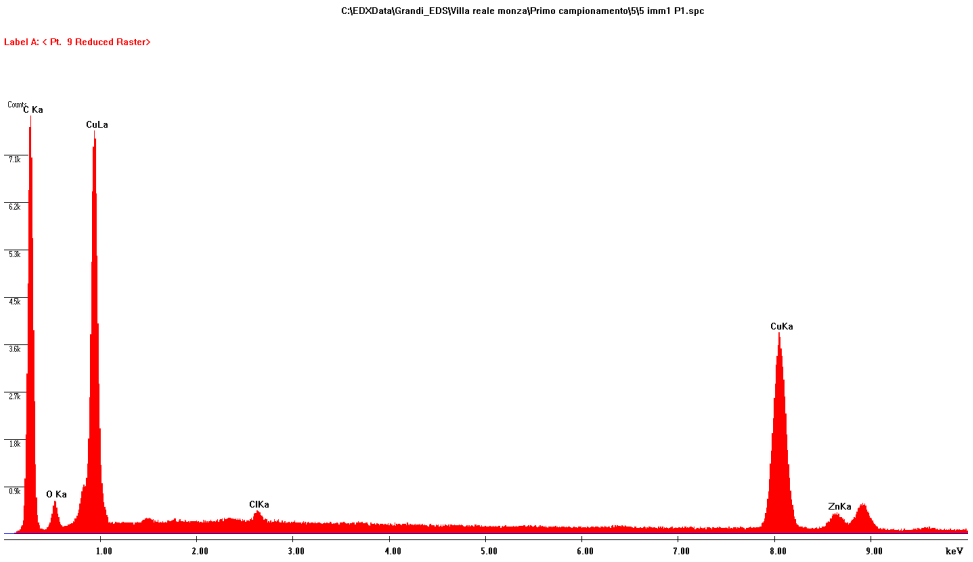


Fig. 51. Spettro EDX riferito alla lamina metallica più superficiale.

Il giallo cromo è un pigmento di sintesi prodotto sperimentalmente alla fine del 1700, ma utilizzato solo nel 1800. La complessa sequenza di strati può essere interpretata come la testimonianza di interventi di integrazione e rifacimenti dell'apparato decorativo, probabilmente databili al 1800. La lamina di ottone potrebbe invece essere legata ad un intervento più recente.

Micro FTIR

L'analisi in micro FTIR centrata sullo strato giallo (Fig. 52) più Esterno ha permesso di riconoscere la presenza di olio come legante organico (picchi a 2923 cm-1 ed a 2854 cm-1 -CH str-, a 1732 cm-1 -C=O estereo-, a 1402 cm-1-CH def-, a 1100 cm-1-CO- ed a 720 cm-1-CC str-) e di cromato (doppietto a 848 cm-1 e a 829 cm-1). Quest'ultimo risultato conferma che il pigmento giallo è il giallo di cromo, ossia il cromato di piombo (PbCrO4).

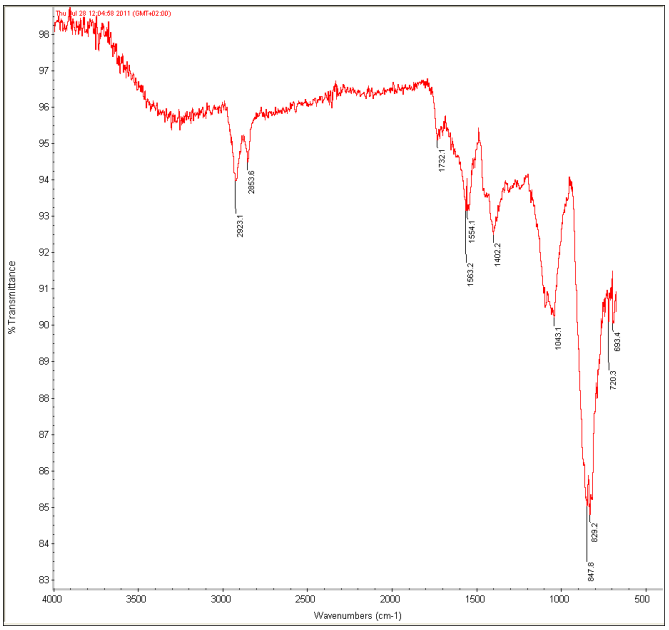


Fig. 52. Misura al Micro FTIR del campione 5.

L'analisi dello strato giallo più interno fornisce risultati del tutto analoghi.

Analisi campione 6

L'immagine relativa al prelievo del campione illustra nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi Fig. 53).

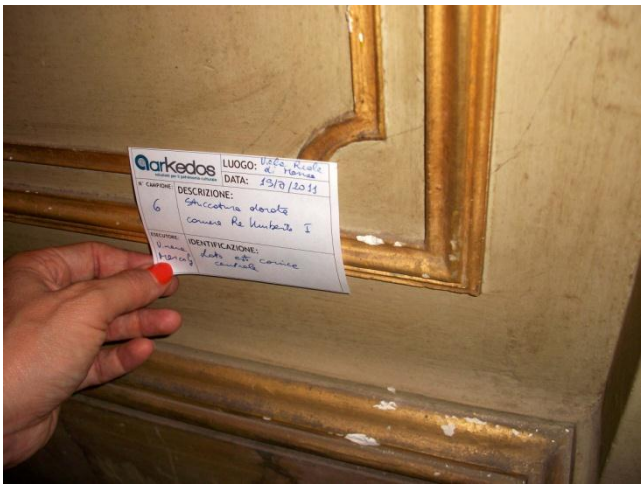


Fig. 53. Foto del dettaglio del campionamento

Stereomicroscopio

Il campione rappresenta una delle dorature delle cornici collocate entro la camera di Re Umberto ed è correlabile con il campione 5. Il materiale ha un aspetto coeso e buone caratteristiche di resistenza e compattezza (Fig. 54). Ben adesi sono pure gli strati di finitura, che possono essere separati con difficoltà. Anche lo strato preparatorio, qui ben rappresentato, risulta consistente e in continuità con gli strati soprastanti.

Fronte Retro

Fig. 54. Il campione 6 visto allo stereomicroscopio

Stratigrafia

Il campione presenta una sequenza stratigrafica completa: dallo strato preparatorio alla finitura metallica (Fig. 55).

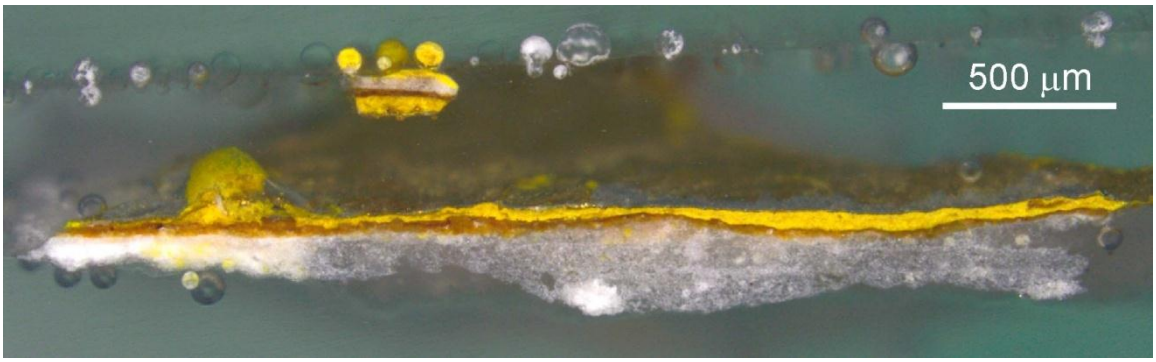


Fig. 55. Immagine in microscopia ottica della stratigrafia del campione 6.

SEM-EDS

In elettroni retrodiffusi è possibile apprezzare la continuità e lo spessore della lamina metallica, presente a chiusura della sequenza materica. Lo strato preparatorio risulta costituito da gesso ed a questo fa seguito una scialbatura a calce. Sulla scialbatura a calce è presente uno strato organico costituito pure da una componente inorganica attribuibile alla terra rossa. Sopra allo strato rosso è presente un livello pigmentato con giallo di cromo e su questo la lamina d'oro (Fig. 56).

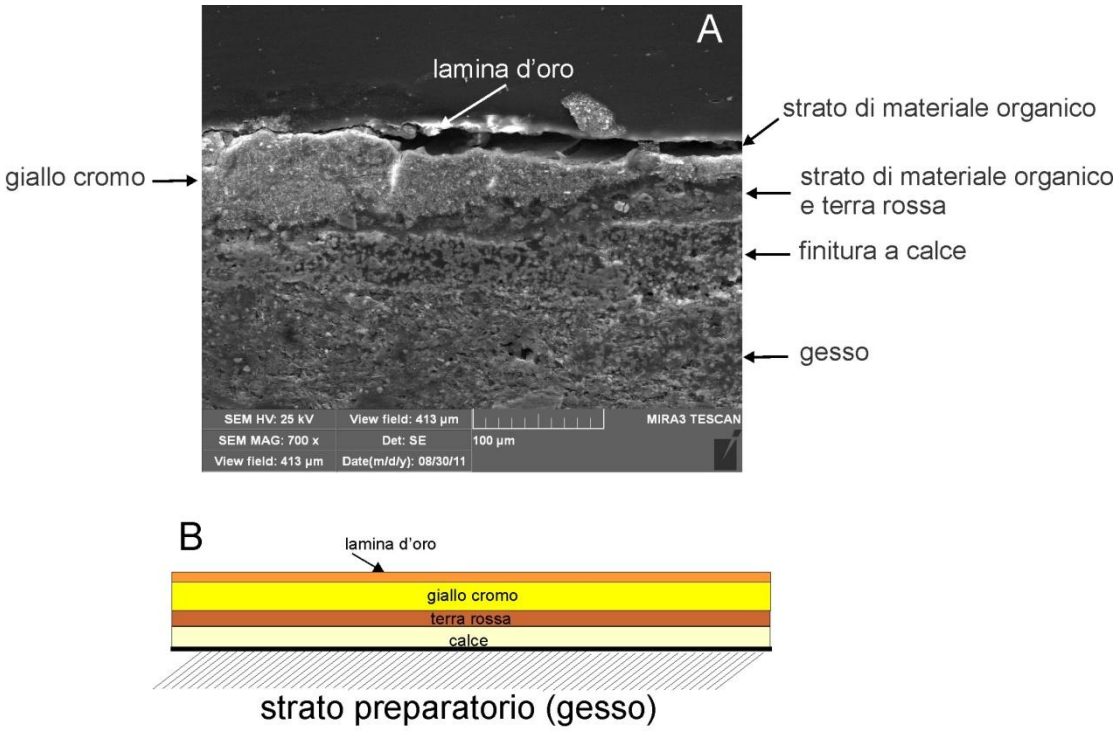


Fig. 56. Immagine in elettroni retrodiffusi del campione 6 (A) e schema interpretativo della sequenza stratigrafica rilevata nel campione 6 (B). (Nota bene: lo strato di materiale organico presente al di sotto della lamina metallica è attribuibile alla resina epossidica utilizzata per l'inglobamento del campione)

Immagini di dettaglio della porzione finale della stratigrafia, mostrano particolari della tessitura dello strato rosso e della messa in opera della lamina metallica (Fig. 57).

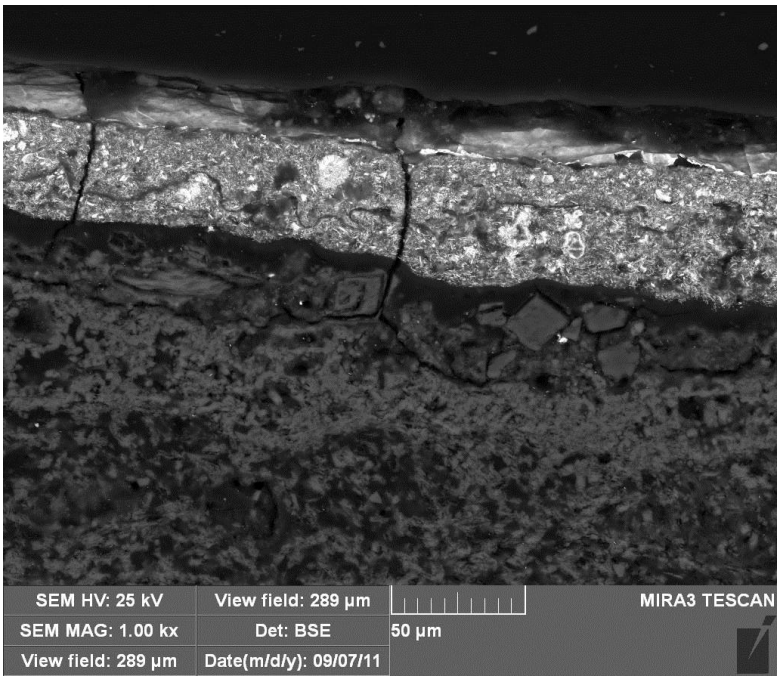


Fig. 57. Dettaglio della porzione finale della stratigrafia relativa al campione 6

Lo strato rosso risulta infatti costituito da terra rossa (Fig. 58) e granuli di calcite di forma quasi regolare, di dimensioni medie di circa 30-40 micron. La lamina è direttamente messa in opera sullo strato di giallo cromo e presenta la seguente composizione: Au_2O_3=95.6 wt%; AgO=2.3 wt%; CuO=2.2 wt%) (Fig. 59).

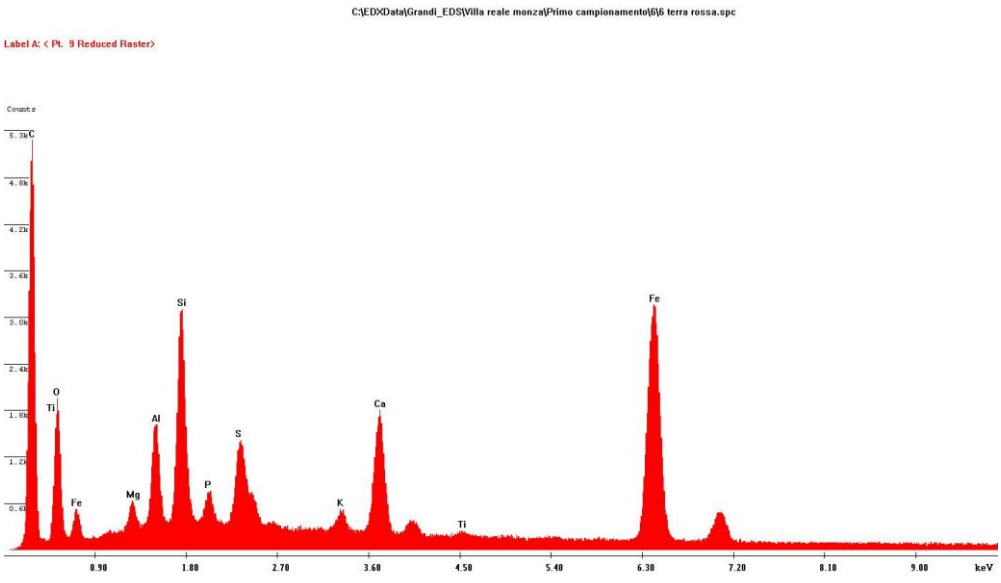


Fig. 58. Spettro EDX dello strato di terra rossa, campione 6

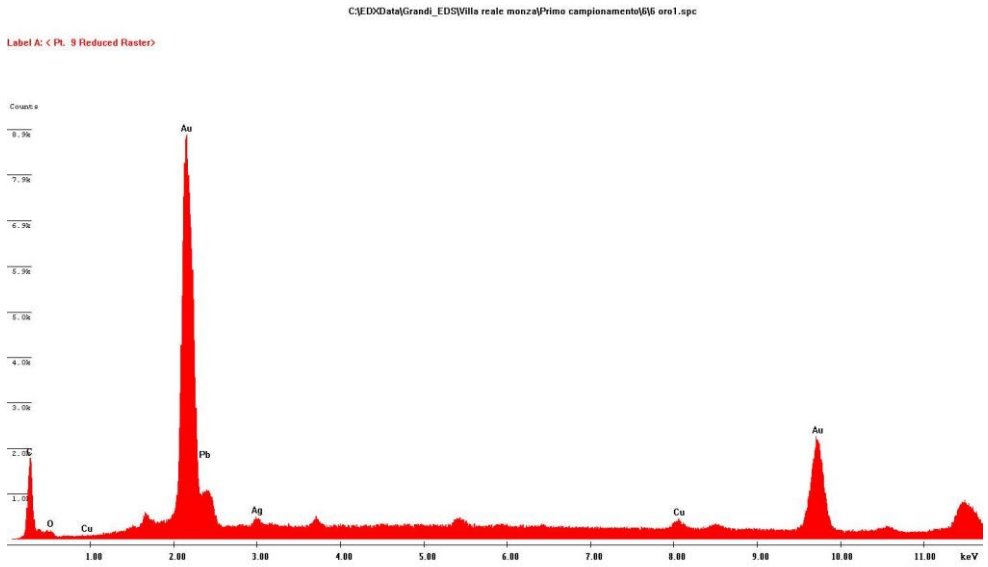


Fig. 59. Spettro EDX della lamina metallica, campione 6

Micro FTIR

Al micro FTIR si individua la presenza di carbonato (picchi a 1396 cm-1, 871 cm-1 e 712 cm-1) e di gesso (doppietto a 1107 cm-1) nello strato bianco (Fig. 60).

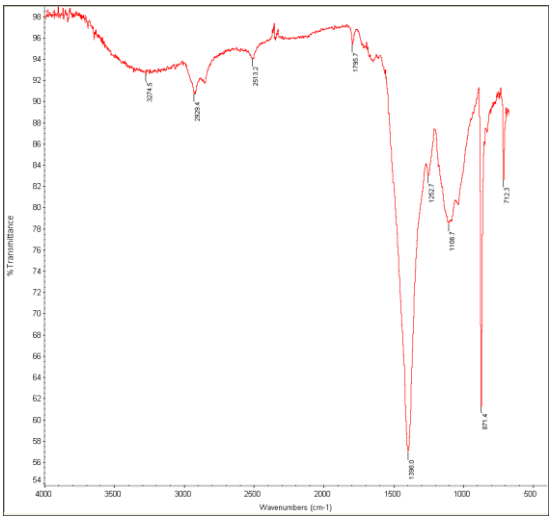


Fig. 60. Misura al Micro FTIR del campione 6, strato bianco in Fig. 51.

Nello strato giallo si individua la presenza di cromato (doppietto a 848 cm-1 e a 829 cm-1), di silicato (picco a 1052 cm-1), probabilmente imputabile ad una terra, e di tracce d'olio (picchi a 2918 cm-1 ed a 2851 cm-1, a 1730 cm-1, a 1711 cm-1 -indice di una parziale degradazione dell'olio-, a 1403 cm-1, a 1100 cm-1 ed a 728 cm-1) (Fig. 61).

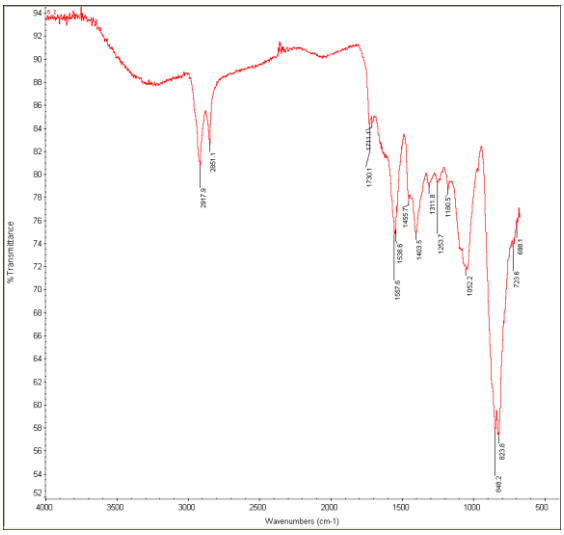


Fig. 61. Misura al Micro FTIR dello strato giallo in Fig. 51.

Lo strato di materiale organico sopra il giallo mostra la presenza di un materiale proteico (picchi a circa 3200, largo –NH str-, a 2918 cm-1 ed a 2849 cm-1-CH str-, a 1645 cm-1-C=O ammidico-, a 1548 cm-1-NH ammidico-, a 1417 cm-1-CH def-), di cromato (doppietto a 848 cm-1 e a 829 cm-1) e di poco olio (Fig. 62).

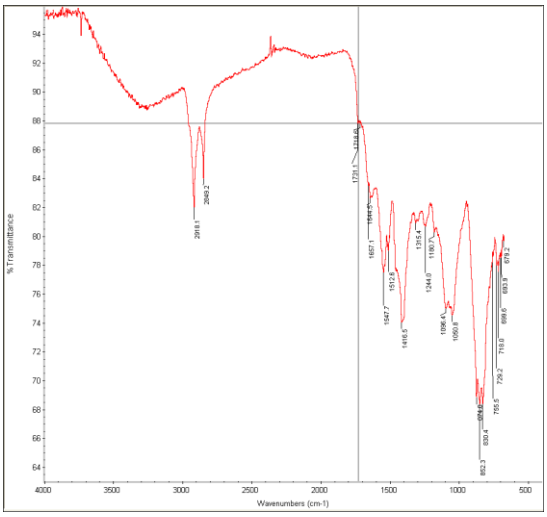


Fig. 62. Misura al Micro FTIR dello strato organico situato appena sotto alla lamina d'oro.

Marmorino del corridoio e sue integrazioni

Il marmorino delle pareti del corridoio presenta fori di dimensioni variabili da 2-3 mm di diametro ad una decina di mm di diametro. In fase di restauro tali fori sono stati riempiti con una stuccatura, poi tutta la parete è stata dipinta in modo da minimizzare la presenza dei fori dal punto di vista colorimetrico, ma la localizzazione delle integrazioni è riconoscibili per la presenza di un tratteggio superficiale. Dopo il restauro però molte di queste integrazioni si sono staccate; per capire se tale distacco è imputabile solo ad una scarsa adesione della stuccatura di riempimento al materiale originale o se è dovuto ad un degrado della stuccatura, del marmorino o di entrambi, sono stati prelevati due campioni, uno da una stuccatura (campione n. 7) ed uno dall'intonaco a marmorino (campione n. 8).

Analisi campione 7

L'immagine relativa al prelievo del campione illustra nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi Fig. 63).

Fig. 63. Foto del dettaglio del campionamento

Stereomicroscopio

Il Campione 7 rappresenta una struccatura inserita nel più recente intervento di restauro. Non presenta una vera e propria stratigrafia, ma è un livello unico, corrispondente ad un preciso punto di stuccatura, con una finitura superficiale molto sottile di colore rosa chiaro non uniforme (Fig. 64).

Fronte Retro

Fig. 64. Il campione 7 visto allo stereomicroscopio

Stratigrafia

Nell'immagine in microscopia ottica è possibile apprezzare l'uniformità del campione, di colore bianco (Fig. 65).

Fig. 65. Immagine in microscopia ottica di una sezione trasversale del campione 7.

SEM-EDS

In microscopia elettronica, in elettroni retrodiffusi, il materiale si mostra poco coeso, molto poroso percorso da una fitta rete di microfratture.
Il materiale è costituito da granuli di forma irregolare, sub arrotondati, di dimensioni medie comprese tra 30 e 50 micron, legati da un legante a grana fine (Fig. 66).

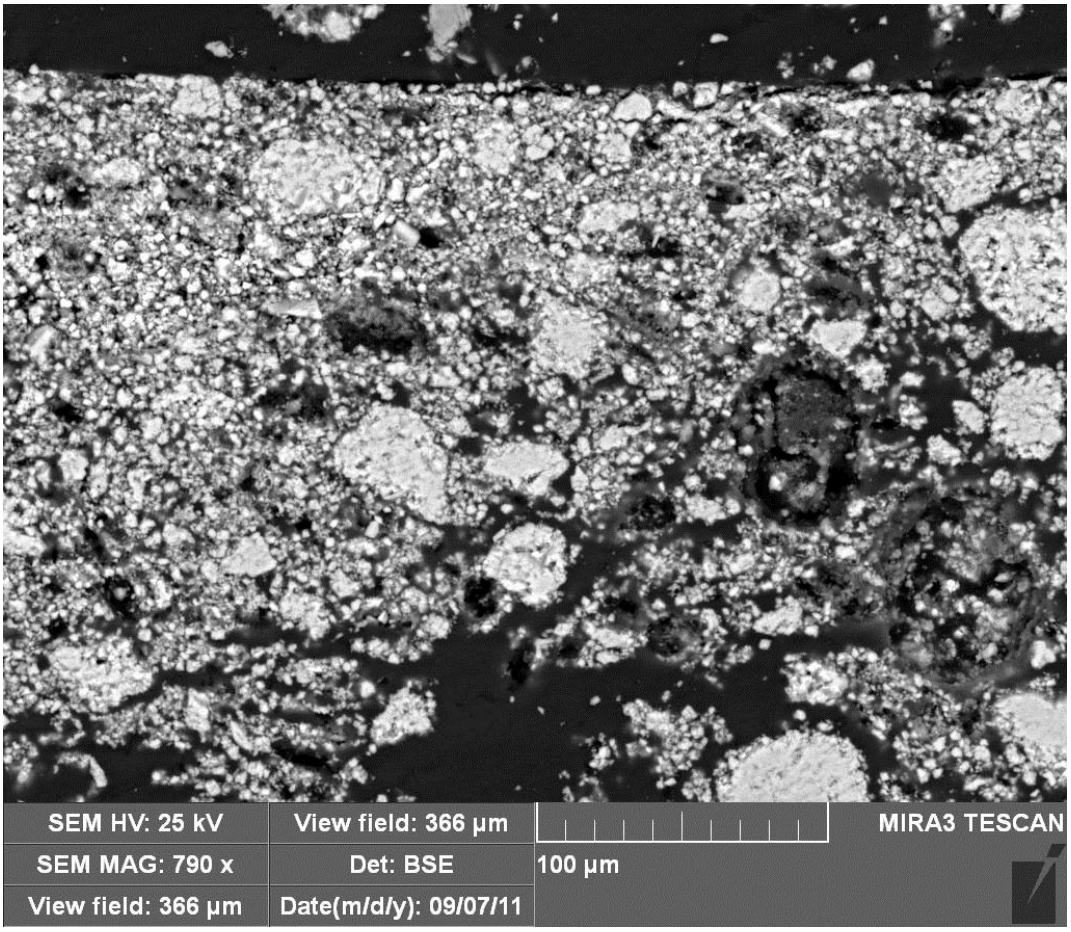


Fig. 66. Immagine in microscopia elettronica della tessitura del campione 7.

Le microanalisi in EDX mostrano che il materiale è costituito da granuli e/o microaggregati di calcite, in un legante aereo, più specificamente una calce calcica (Fig. 67).

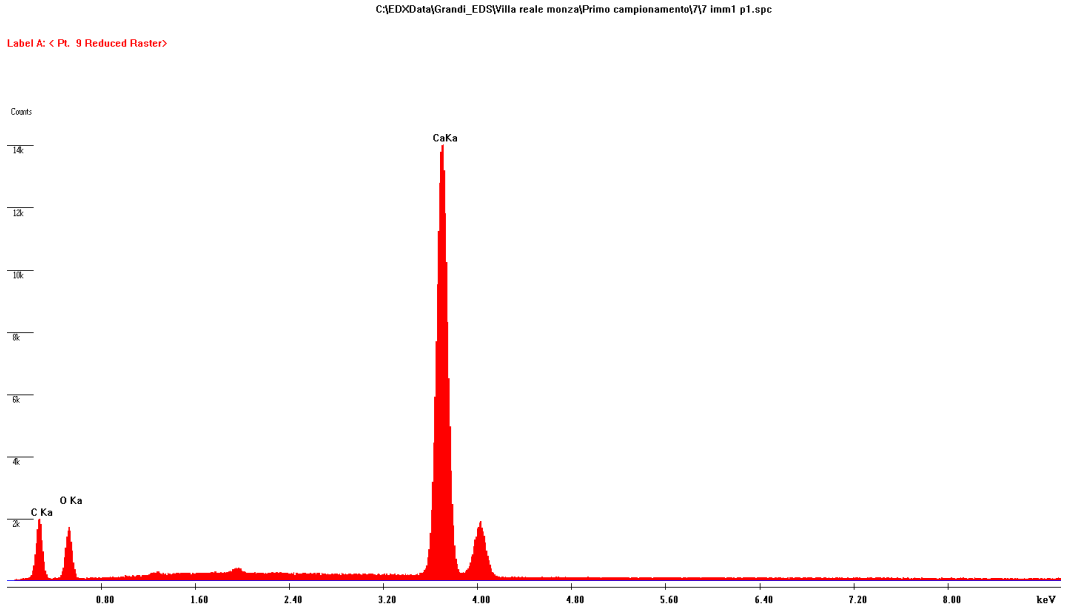


Fig. 67. Spettro EDX di un granulo dell'aggregato, campione 7

Micro FTIR

L'analisi in Micro FTIR, effettuata sul bulk del campione evidenzia la presenza di carbonato (picchi a 1398 cm-1, a 872 cm-1 ed a 712 cm-1) e di olio come legante organico (picchi a 2927 cm-1 ed a 2854 cm-1 - CH str-, a 1738 cm-1 -C=O estereo-, a 1402 cm-1-CH def-, a 1298 cm-1, a 1239 cm-1 ed a 1181 cm-1-CO- ed a 732 cm-1-CC str-). I picchi a circa 3400 cm-1 ed a 1795 cm-1 potrebbero essere attribuiti ai gruppi idrossili-idroperossidi caratteristici dell'olio di lino.

I picchi a 1607 cm-1, 1508 cm-1 ed a 824 cm-1 si possono attribuire alla resina epossidica dell'inglobamento (Fig. 68).

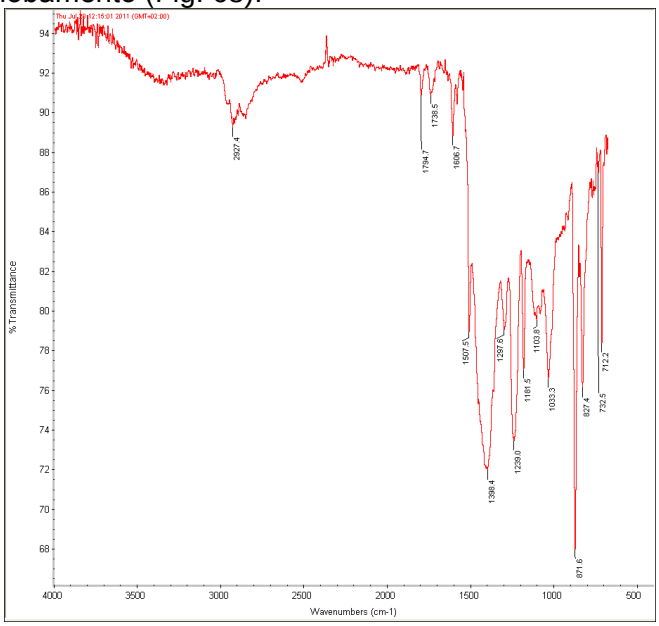


Fig. 68. Spettro al micro FTIR del campione 7.

Analisi campione 8

L’immagine relativa al prelievo del campione illustra nel dettaglio il punto preciso in cui è stato effettuato il campionamento con il bisturi (vedi Fig. 69).

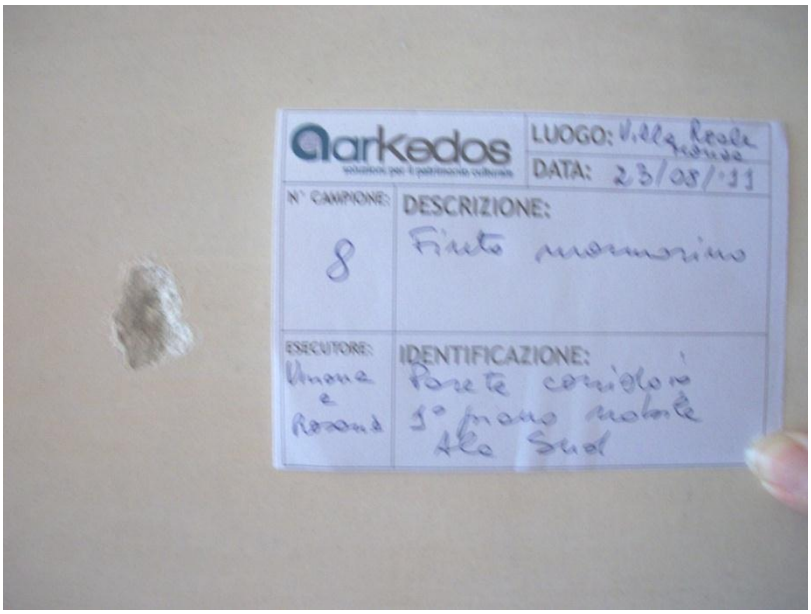


Fig. 69. Foto del dettaglio del campionamento

Stereomicroscopio
Il Campione 8 rappresenta un frammento di marmorino prelevato in corrispondenza di uno dei fori colmati dalle stuccature descritte nel Campione 7. Non presenta una vera e propria stratigrafia, ma è un livello unico con una finitura superficiale molto sottile di colore rosa chiaro non uniforme (Fig. 70).

Fronte Retro

Fig. 70. Il campione 8 visto allo stereomicroscopio

Stratigrafia
Nell’immagine in microscopia ottica è possibile apprezzare l’uniformità del campione, di colore bianco (Fig. 71).

Fig. 71. Immagine in microscopia ottica di una sezione trasversale del campione 8.

SEM-EDS

Il materiale risulta costituito da granuli di dimensioni medie comprese tra 30 – 40 micron, di forma arrotondata – sub arrotondata, stimabili tra il 20-25 % vol. La frazione fine si presenta con una elevata porosità (Fig. 72). I granuli sono costituiti da rocce carbonatiche a grana fine e la loro composizione chimica è quella di una calcite (Fig. 73).

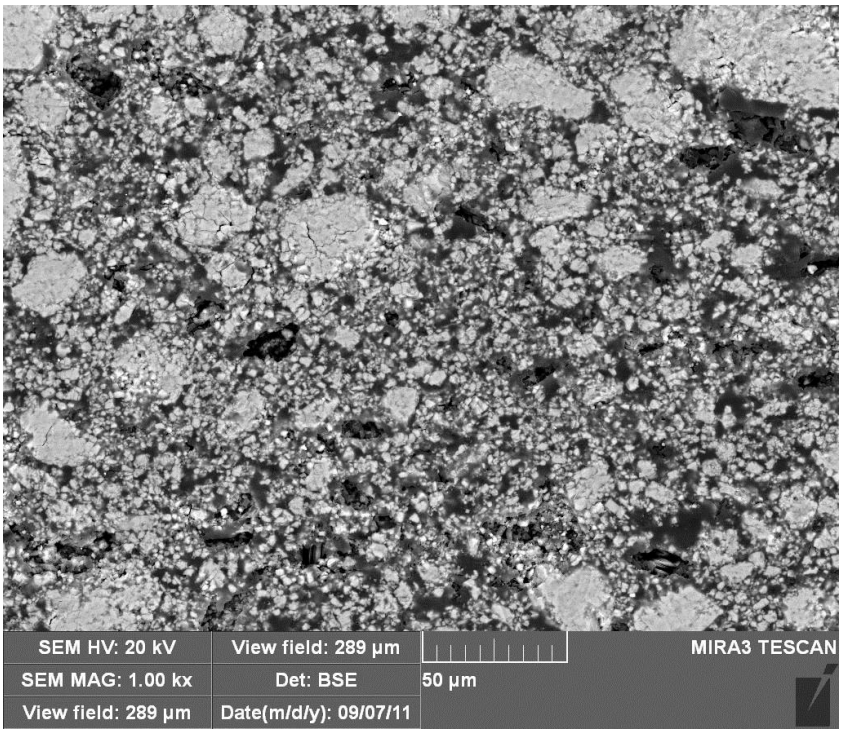


Fig. 72. Immagine in elettroni retrodiffusi della tessitura del campione 8.

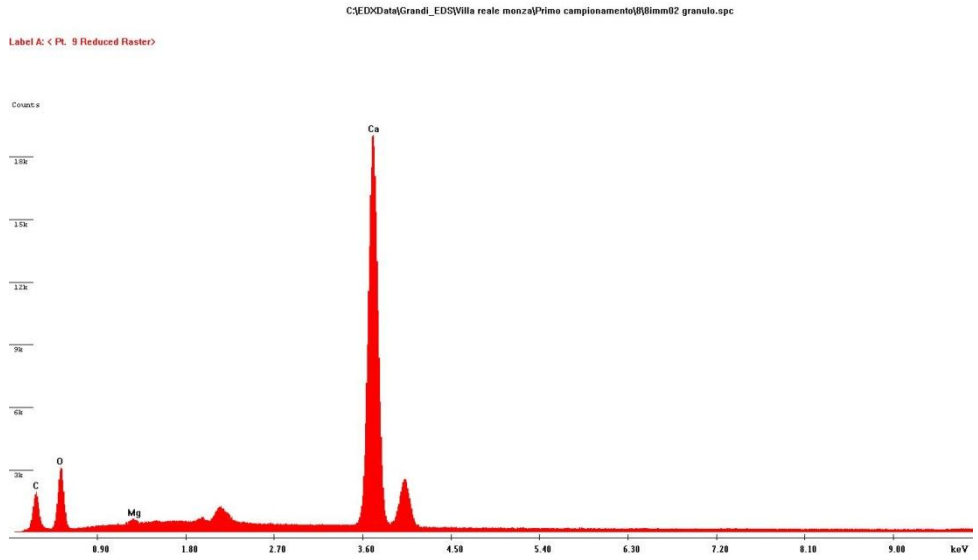


Fig. 73. Spettro EDX di un granulo carbonatico del campione 8. (nota bene: il campione è stato metallizzato con Au e pertanto nello spettro compare il picco di Au imputabile alla metallizzazione)

Anche la matrice fine presenta una composizione ricca in calcio, seppure meno pura di quella misurata sui granuli (Fig. 74). Il legante pertanto è una calce calcica.

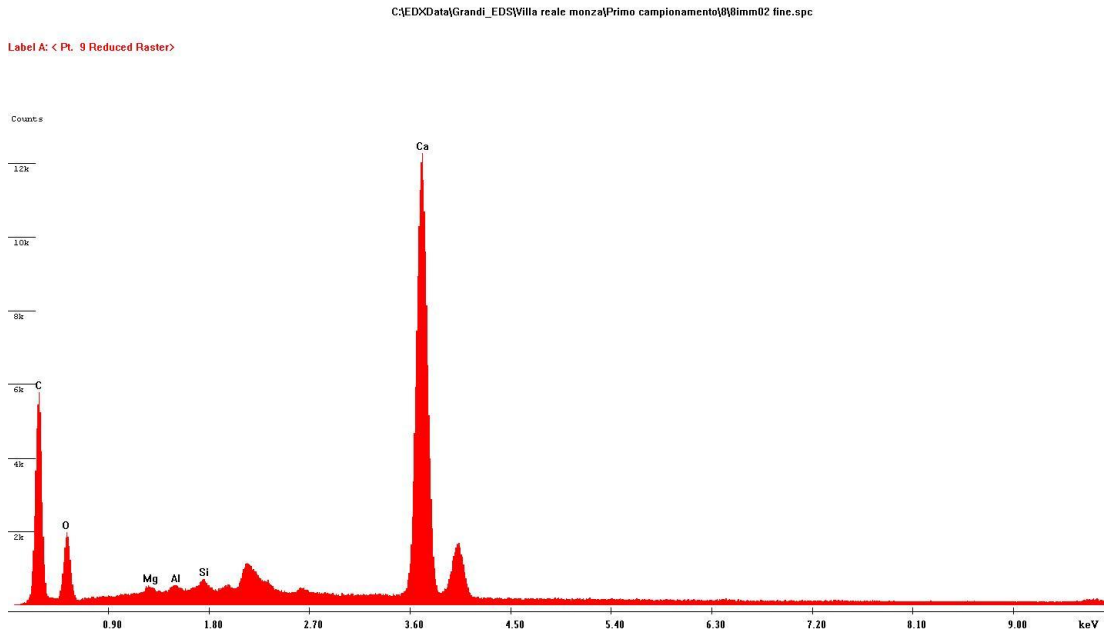


Fig. 74. Spettro EDX relativo alla frazione legante del campione 8. (nota bene: il campione è stato metallizzato con Au e pertanto nello spettro compare il picco di Au imputabile alla metallizzazione)

Micro FTIR

L’analisi in Micro FTIR, effettuata sul bulk del campione evidenzia la presenza di carbonato (1402 cm-1, 871 cm-1 e 711 cm-1), di pochi silicati (1036 cm-1) ed un legante oleoso (2918 cm-1, 2854 cm-1, 1737cm-1 e 1241 cm-1) (Fig. 75).

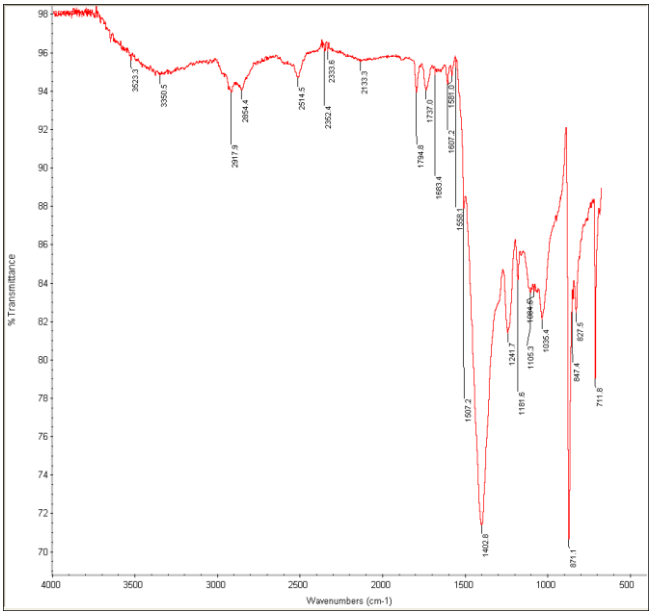


Fig. 75. Spettro al micro FTIR del campione 8.

I dati analitici ottenuti non evidenziano alterazioni chimiche della stuccatura o del marmorino tali da giustificare il distacco, mentre sono evidenti delle alterazioni delle caratteristiche fisico-meccaniche della stuccatura, che appare fessurata e poco coesa. Queste alterazioni possono essere imputabili sia ai caratteri materici della stuccatura sia alle condizioni termoigrometriche poco idonee nel momento dell’applicazione o nei periodi successivi.

ANALISI DELLO STATO DI DEGRADO DI ALCUNI MANUFATTI LIGNEI DELLA VILLA REALE DI MONZA – ALA SUD: POSSIBILI CORRELAZIONI CON LE CONDIZIONI DI CONSERVAZIONE

Introduzione

L'avanzato stato di degrado dei paramenti lignei (pavimenti e pannelli di copertura delle pareti) di alcuni ambienti di pertinenza all'ala sud, non ancora interessati da restauro, appare fortemente correlato alle condizioni microclimatiche delle stanze e con forti interconnessioni agli aspetti conservativi più essenziali, quali risalite capillari con conseguenti presenze di efflorescenze saline, sviluppo diffuso ed evidente di biodeteriogeni ed elevati gradienti termoigrometrici sia nelle ventiquattro ore che nei cicli stagionali. Il controllo delle più idonee condizioni di conservazione si deve basare sullo studio e la ricerca delle forme di alterazione dei materiali e sull'analisi delle loro possibili cause e concause.

1. Viste le condizioni di manutenzione delle aree investigate si ritiene di fondamentale importanza per i manufatti lignei lo studio accurato e diffuso della **temperatura**, in quanto le variazioni di temperatura inducono differenti espansioni nei materiali lignei e sforzi di tensione tra le superfici e le strutture sottostanti: le variazioni cicliche di temperatura presenti nelle stanze non climatizzate contribuiscono sicuramente a sviluppare i fenomeni di alterazione, con i conseguenti processi degradativi. È da segnalare la diffusa presenza di macchie di umidità sia come acqua di risalita che per diffusione capillare dai soffitti: la presenza di acqua nelle sale investigate agisce come fattore sinergico con le variazioni di temperatura che di conseguenza può far variare la quantità di acqua assorbita dai pavimenti lignei, i quali espandendosi e contraendosi generano crepe e fessurazioni fino agli evidenti distacchi presenti nelle zone vicine alle finestre, con perdite di materiale costitutivo. Il controllo della temperatura diventa un fattore fondamentale anche e soprattutto per lo sviluppo della vita biologica e per il controllo del metabolismo. La necessità di controllare capillarmente la temperatura all'interno delle stanze si correla anche con i possibili scambi di calore con tutte le possibili sorgenti o pozzi di calore e dall'avvezione di nuova aria da porte o finestre. In un ambiente chiuso come le stanze visionate, l'ascesa dell'aria più calda è fermata dal soffitto, l'aria si distribuisce secondo la propria densità formando una stratificazione stabile. Tuttavia la presenza dei caloriferi a terra sotto le finestre, come uniche sorgenti di calore, richiede necessariamente che l'ascesa dell'aria calda sia compensata dalla discesa di aria, generando moti convettivi in grado di movimentare nel tempo polveri, spore fungine e particellato inorganico. Le analisi diagnostiche effettuate in questi ambienti sembrano confermare questo fenomeno.
2. Il controllo dell'**umidità relativa** è fortemente correlato ai valori di temperatura e lo studio dei parametri termoigrometrici degli ambienti della Villa potranno consentire di ottenere una stato di salute delle sale *in continuum* con possibilità di interventi diretti nel caso in cui i dati registrati fossero fuori norma. Gli alti livelli di umidità che si possono riscontrare all'interno degli ambienti della Villa Reale possono aumentare il tasso di deterioramento dei materiali lignei, specie nelle pavimentazioni, in diversi modi, come l'accelerazione di reazioni chimiche quali la corrosione e conseguente depolimerizzazione delle fibre e dei legami glicosidici a livello dell'ultra-struttura del legno, cristallizzazione e dissoluzione di sali attraverso l'evaporazione dell'acqua, aumento dimensionale dei materiali igroscopici con conseguente diminuzione della resistenza, facilitazione nello sviluppo di biodeteriogeni eterotrofi e insetti xilofagi con conseguente variazioni cromatiche e strutturali dei legni. L'assenza nelle sale di sistemi di controllo

dell'umidità relativa pone alcune questioni sul controllo microclimatico in particolare legato ai pavimenti lignei, in quanto aumenti di temperatura di circa sette gradi possono causare variazioni di umidità maggiori del 10% con possibili ripercussioni sul contenuto di acqua di saturazione del legno e conseguente possibile deformazione fisica.

3. Le stanze visionate presentano tutte un controllo della **radiazione solare** effettuato attraverso la chiusura delle imposte delle finestre, con ambienti bui e in totale assenza di luce diretta. Le problematiche legate a questo fenomeno di alterazione si presenteranno nel momento in cui gli ambienti diventeranno fruibili da parte del pubblico e richiederanno un'illuminazione con luce naturale. L'esposizione diretta ai raggi UV e IR potrebbe provocare sui pavimenti lignei alterazioni e scolorimento: diventerà quindi fondamentale studiare l'effetto indiretto delle lampade che allo stato attuale risultano assolutamente insoddisfacenti. Per la conservazione dei manufatti lignei la migliore lampada è quella con minor UV (le lunghezze d'onda più pericolose) e IR (minore flusso di calore). Per quanto riguarda i colori, la luce artificiale deve possedere lo stesso spettro (lunghezze d'onda) della luce naturale al quale è sensibile l'occhio umano. Gli effetti che si possono riscontrare sui manufatti lignei della Villa Reale sono legati ai fenomeni di foto-ossidazione con conseguenti variazioni cromatiche (per lo più legate ad imbrunimento), catalizzazione dei processi di attivazione cellulare (biodeteriogeni autotrofi foto sintetici), incremento di fenomeni di evaporazione di acqua con conseguenti possibili variazioni dimensionali del legno. Allo stato attuale le alterazioni causate da irraggiamento di luce diretta sembrano essere trascurabili rispetto alle altre forme di degrado.
4. La deposizione di **particellato** sui pavimenti lignei sembra essere un fenomeno piuttosto diffuso in tutte le stanze visionate, probabilmente generato nel tempo dalla creazione di moti convettivi all'interno degli ambienti con flussi di aria che hanno consentito la deposizione sui pavimenti di micro particelle. I sistemi di riscaldamento presenti nelle sale introducono ventilazione e turbolenza causando il moto e la deviazione della direzione delle particelle sospese in aria che quindi impattano più facilmente sulle superfici aumentandone la deposizione. La miglior condizione per ridurre la deposizione delle particelle sulle opere d'arte è quella in cui i movimenti delle masse d'aria sono ridotti e non si ha generazione di moti turbolenti, quindi aria stratificata stabilmente senza ventilazione e sorgenti di calore. Superfici igroscopiche quali le pavimentazioni lignee rimangono umide più a lungo e di conseguenza si sporcano maggiormente. Molti studi hanno dimostrato l'importanza del microclima nei processi di deposizione. Nella pratica risulta impossibile filtrare completamente il particolato sospeso e in alcuni casi la presenza di impianti di filtraggio può peggiorare la situazione aumentando la deposizione.

Campionamenti

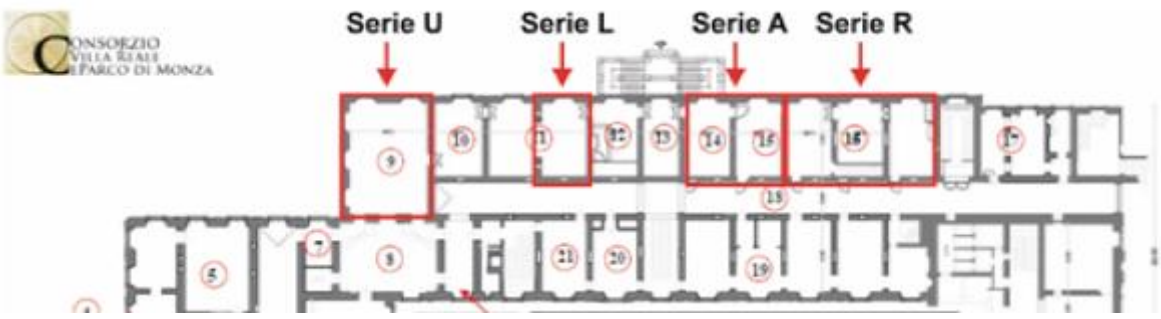


Fig. 1. Planimetria dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza. I riquadri rossi indicano gli ambienti interessati dai prelievi, con le corrispondenti serie di campioni.

Modalità analitiche

I campioni prelevati sono stati fotografati allo stereomicroscopio e, successivamente, inglobati in resina epossidica per la preparazione di cross-sections. I campioni inglobati sono stati sottoposti ad un processo di lappatura mediante carte abrasive e lucidatura con paste diamantate delle seguenti granulometrie: 6, 3, 1 e 0.25 µm. Questo trattamento ha permesso di ottenere sezioni stratigrafiche per le analisi morfologiche e composizionali. Le sezioni stratigrafiche sono state osservate al microscopio ottico polarizzatore Leitz Laborlux, dotato di 6 obiettivi e di una telecamera integrata, che ha permesso di acquisire le immagini dei campioni indagati in luce riflessa. Le indagini eseguite al micro FT-IR (Thermo Scientific, Nicolet iN10) hanno interessato sia i frammenti tal quali sia alcuni microprelievi. In entrambi i casi gli spettri sono stati acquisiti in modalità ATR con cristallo di Germanio, variando pressione e tempo di acquisizione a seconda della tipologia di campione. Le indagini al SEM sono state condotte mediante un microscopio Tescan della serie Mira 3XMU, equipaggiato con emettitore Schottky Field Emission, dotato di sistema di microanalisi con uno spettrometro a dispersione di energia (EDAX). Le condizioni operative hanno previsto l'uso di una tensione di accelerazione mantenuta a 20 kV e una distanza di lavoro di 15 mm. Le misure microanalitiche sono state processate mediante il software EDAX Genesis.

Appartamento del Primo Ministro (serie R)

I pavimenti lignei delle tre stanze presentano numerosi rigonfiamenti, sollevamenti e distacchi delle tessere lignee che costituiscono la parquettatura pavimentale. Le stanze in questione sono le uniche di quelle prese in considerazione dell'Ala Sud della Villa che non sono state restaurate: il legno si presenta in generale con forti disconnessioni strutturali e con evidenti segni di ritiri dimensionali e conseguenti deformazioni (fig. 2a). È possibile evidenziare una diffusa patina di colore scuro, a differenti concentrazioni, dovute probabilmente in parte a risalite capillari dalle stanze del piano sottostante. Non è escluso il possibile fenomeno di deposizione di particellato nel corso del tempo dovuto alla presenza di singole sorgenti di calore posizionate sotto le finestre e con gettata verticale. Sono inoltre evidenti e diffuse le macchie dovute alla presenza di acqua diretta, con conseguenti formazioni di aloni e sollevamenti del pavimento (fig. 2b). I pavimenti non presentano segni di decorazione o intarsi ma risultano particolarmente importanti perché non essendo stati restaurati consentono di ottenere informazioni sullo stato di degrado e sulle possibili cause. I campioni prelevati sono stati analizzati in sezione stratigrafica in microscopia ottica, spettroscopia IR e microscopia elettronica.

Fig. 2. Documentazione fotografica delle principali forme di degrado rilevate nelle sale pertinenti all'appartamento del primo ministro. (a) Stanza con camino; (b) seconda stanza e bagno.

Allo scopo di caratterizzare soprattutto i depositi superficiali e comprenderne le cause, sono stati prelevati 3 micro-frammenti (fig. 3) in tre differenti aree pavimentali. Le osservazioni effettuate con lampada di Wood non consentono di evidenziare la presenza di patine organiche o protettivi superficiali.

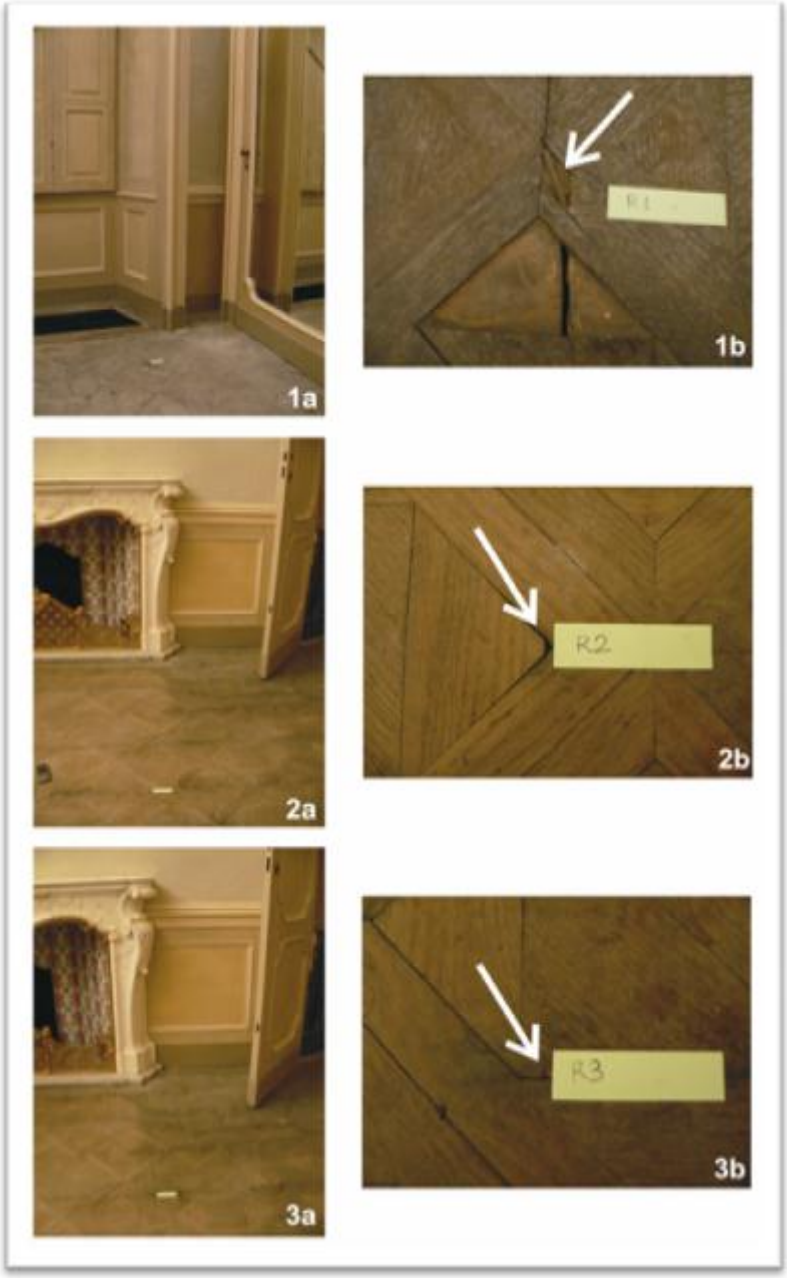


Fig. 3. Campionatura della serie R, con foto generale e relativo dettaglio.

R1: frammento già distaccato dal pavimento della stanza da bagno, davanti allo specchio (fig. 3, 1a e 1b). **R2**: frammento proveniente dal pavimento della stanza con camino, prelevato da area chiara di fronte al camino (fig. 3, 2a e 2b). **R3**: frammento proveniente dal pavimento della stanza con camino, prelevato da area con patina scura (fig. 3, 3a e 3b).

Stanza dell'Armeria e Guardaroba adiacente (serie A)

I pavimenti delle stanze risultano restaurati e protetti (probabilmente visto l'elevato indice di riflessione con prodotti a base di cera). È stata identificata un'area più nascosta dietro uno degli armadi di custodia delle armi dove è evidente uno strato di finitura originaria più scura. Il secondo prelievo è stato effettuato nella stanza adiacente in prossimità della finestra dove si evidenziavano aree di degrado legate a probabili risalite capillari con presenza di materiali di deposito.

Fig. 4. Campionatura della serie A, con foto generale e relativo dettaglio.

A1: frammento di legno dal pavimento dell'armeria, vicino alla finestra. Il campione presenta una patina scura che si differenzia dal resto del pavimento (fig. 4, 4a e 4b). **A2**: frammento di legno dal pavimento della stanza-armadio, vicino alla finestra. (fig. 4, 5a e 5b).

Stanza da Letto del Re (serie L)

I prelievi effettuati in questa stanza hanno interessato la caratterizzazione dei pannelli lignei adiacenti alla parete sud della stanza immediatamente dietro la porta di ingresso e che presentano evidenti segni di degrado, con fenomeni di rigonfiamento e distacchi. Le fasi di alterazione sono probabilmente legate a presenza di acqua ed infiltrazioni dal muro. Gli obiettivi analitici riguardano la caratterizzazione delle tecniche realizzative e delle eventuali presenze di forme di degrado.

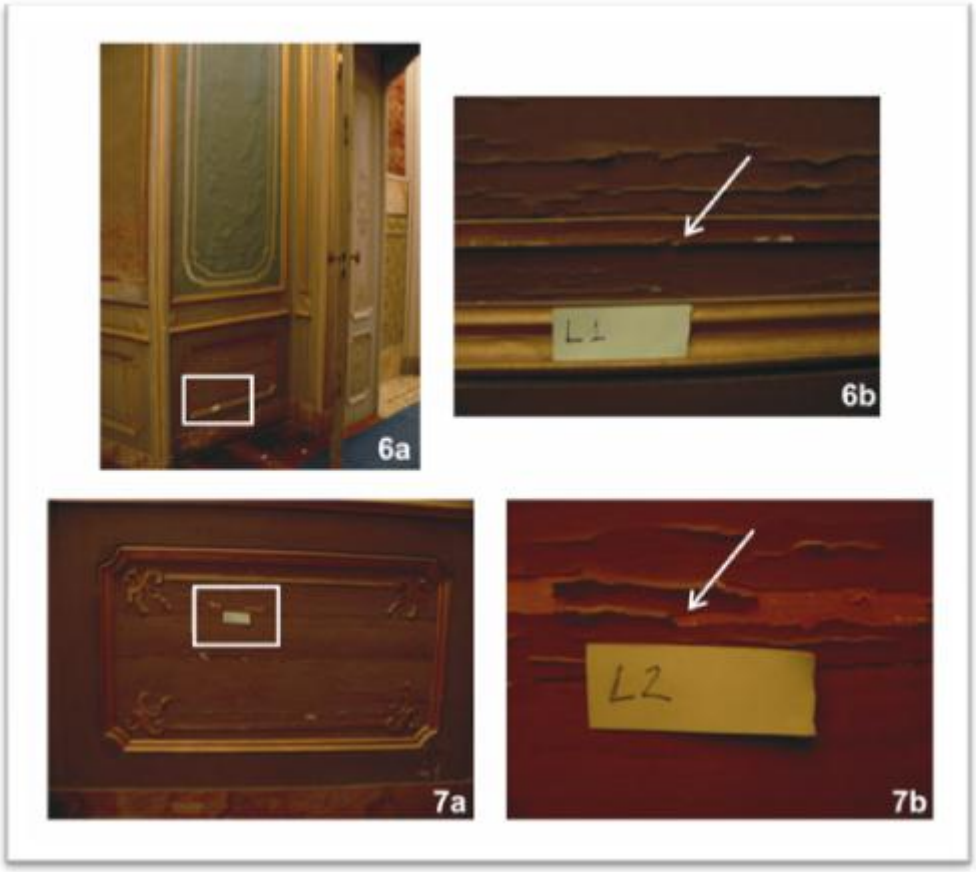


Fig. 5. Campionatura della serie L, con foto generale e relativo dettaglio.

L1: frammento proveniente dalla doratura del pannello (fig. 5, 6a e 6b). **L2**: frammento che comprende lo strato di preparazione + la vernice di colore verde del pannello (fig. 5, 7a e 7b).

Sala delle Udienze (serie U)

In questa sala sono stati presi in considerazione sia il pannello ligneo alla base della finestra centrale della parete sud che presentava evidenti fenomeni di degrado quali distacchi e sollevamenti pittorici sia un micro prelievo pavimentale mirato a caratterizzare il colore verde presente nel decoro floreale.

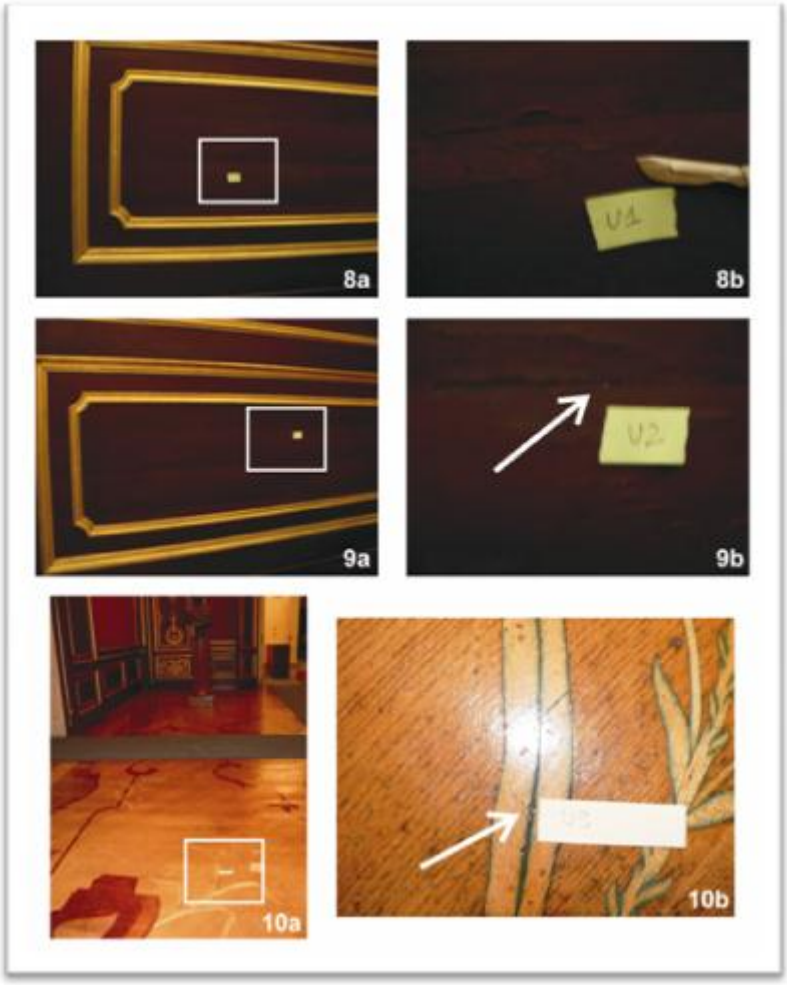
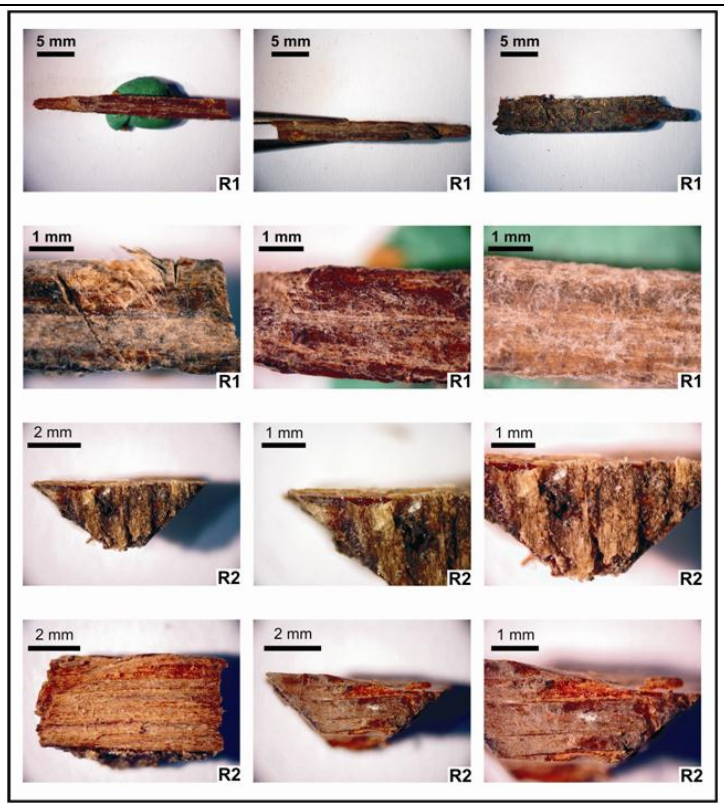


Fig. 6. Campionatura della serie U, con foto generale e relativo dettaglio.

U1: frammento di vernice marrone lucida più scura superficiale (fig. 6, 8a e 8b). **U2**: vernice marrone opaca più interna (forse legato ad un intervento di restauro) (fig. 6, 9a e 9b). **U3**: pigmento verde di una foglia del decoro pavimentale, tra il trono e la porta (fig. 6, 10a e 10b).


5 mm
R1
5 mm
R1
5 mm
R1
1 mm
R1
1 mm
R1
1 mm
R1
2 mm
R2
1 mm
R2
1 mm
R2
2 mm
R2
2 mm
R2
1 mm
R2

1 mm
R3
1 mm
R3
1 mm
R3
2 mm
A1
1 mm
A1
1 mm
A1
2 mm
A2
1 mm
A2
3 mm
L1
1 mm
L1
1 mm
L2
1 mm
L2

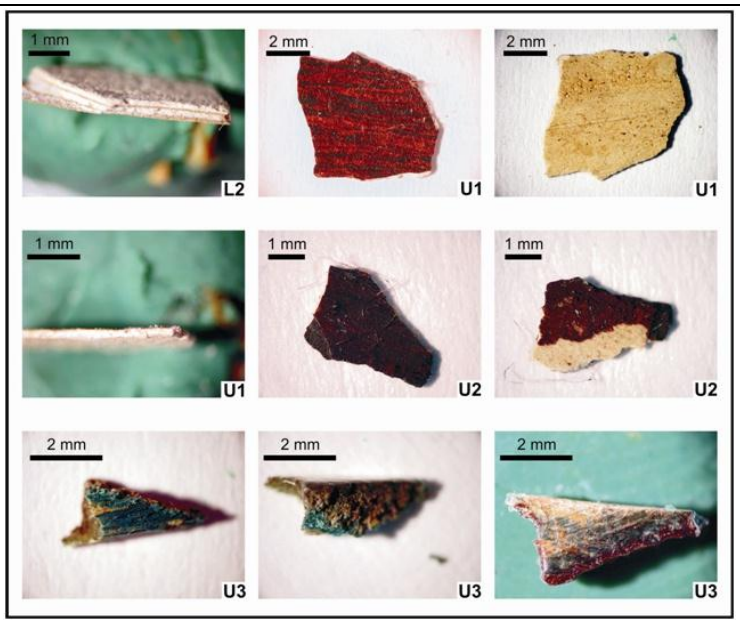


Fig. 7. Schema generale dei prelievi effettuati con foto allo stereomicroscopio

Analisi in stereomicroscopia

Sono state condotte analisi di caratterizzazione superficiale dei pavimenti attraverso uno stereomicroscopio portatile. Le indagini effettuate consentono di definire lo stato di conservazione delle superfici lignee e di indagarne le patine di alterazione, anche attraverso uno studio delle strutture morfologiche dei legni. L'analisi è stata condotta in luce riflessa e con ingrandimenti 50x.

Serie R - Le analisi al microscopio ottico confermano la presenza diffusa di particellato superficiale deposta sui pavimenti dell'Appartamento del Primo Ministro, con maggiore concentrazione nelle aree di distacco delle tessere lignee (A), e con lo sviluppo di patine diffuse in modo piuttosto omogeneo su tutte le aree pavimentali interessate dal fenomeno (B-C-D). In molti casi, associate al particellato scuro, sono visibili al microscopio patine diffuse patine di colore bianco di probabile composizione inorganica (possibili efflorescenze saline) (G-H).

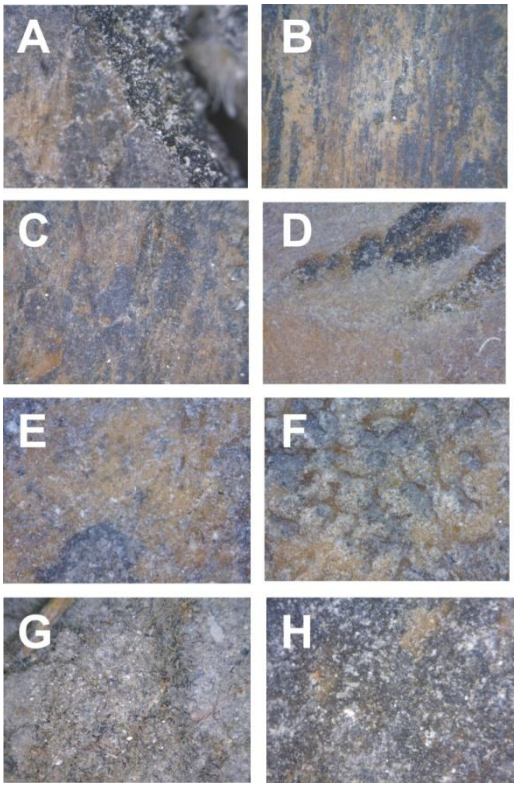


Fig. 8. Analisi allo stereomicroscopio, Serie R (Appartamento Primo Ministro)

Serie A – Le analisi condotte sui pavimenti della stanza dell'Armeria mostrano chiaramente come i pavimenti siano stati restaurati e trattati, evidenziando soprattutto un alto indice di riflessione e quindi l'utilizzo di un protettivo superficiale (C). La mappatura delle superfici ha reso evidente in molti punti la presenza di graffi anche piuttosto marcati (A-B): in questo caso l'azione meccanica potrebbe essere causata da un uso improprio di prodotti e strumenti utilizzati per la pulizia dei pavimenti. Ad alti ingrandimenti è stato possibile identificare diversi canali di scavo di precedenti attacchi xilofagi (D).

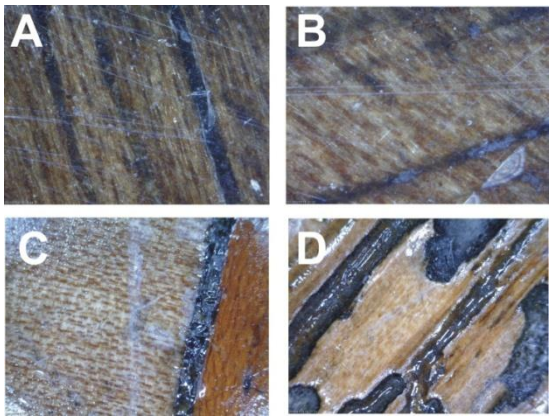


Fig. 9. Analisi allo stereomicroscopio, Serie A (Armeria)

Serie L – Le immagini al microscopio del pannello ligneo decorativo della Stanza da Letto del Re mostrano un elevato degrado strutturale delle finiture decorative, con distacchi diffusi delle vernici e sollevamenti. Il microscopio ha evidenziato in modo chiaro come lo strato di vernice superficiale sia steso sopra uno strato preparatorio di colore bianco a sua volta adeso alla superficie di un pannello ligneo (A-B-C). Anche la doratura della decorazione risulta applicata sopra uno strato preparatorio di colore bianco (D) escludendo l'utilizzo di una tecnica a bolo.

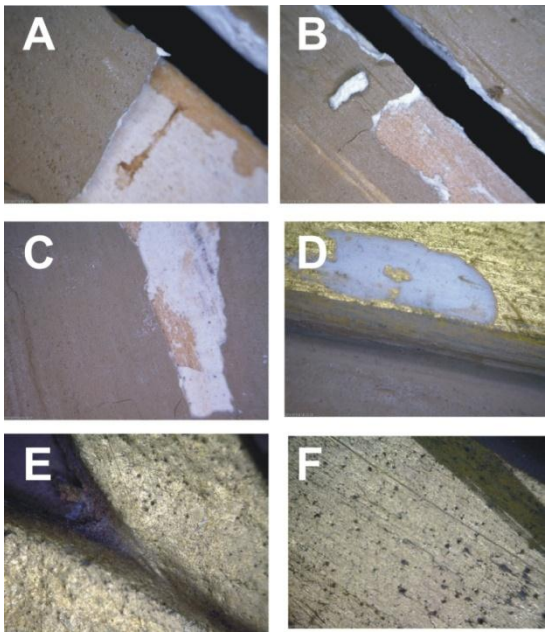


Fig. 10. Analisi allo stereomicroscopio, Serie L (Stanza da Letto del Re)

Serie U – Le analisi condotte sui pannelli posti immediatamente dietro il trono nella Sala delle Udienze mostrano evidenti disomogeneità nella stesura del colore e nella tenuta strutturale. Anche in questo caso è stato possibile evidenziare elevati livelli di degrado, con distacchi e sollevamenti (A-B) e in molti casi diffusa disgregazione dei materiali (C). Le decorazioni pavimentali di colore verde appaiono diffuse fino agli strati più profondi del legno (D). L'alto livello di assorbimento che il legno mostra nei confronti del verde sembrerebbe indicare l'utilizzo di un consolidante organico o una tintura naturale a base organica.

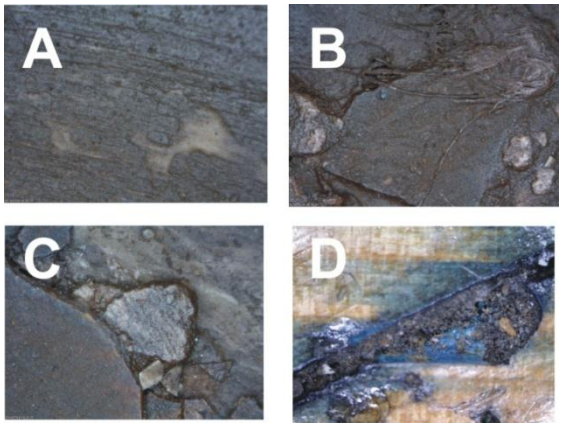
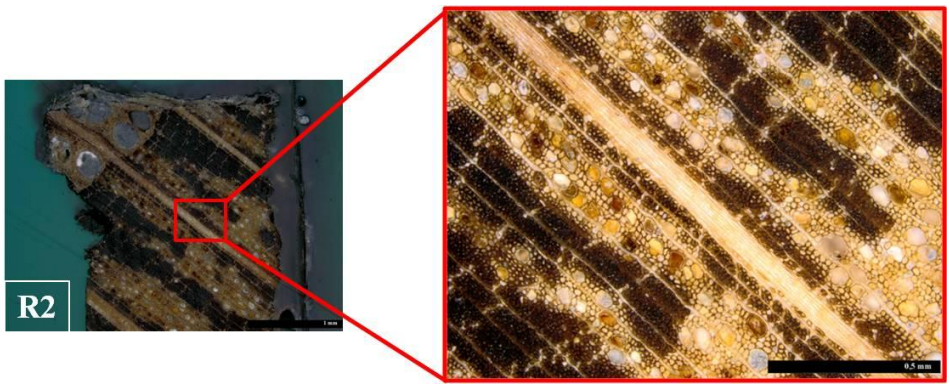


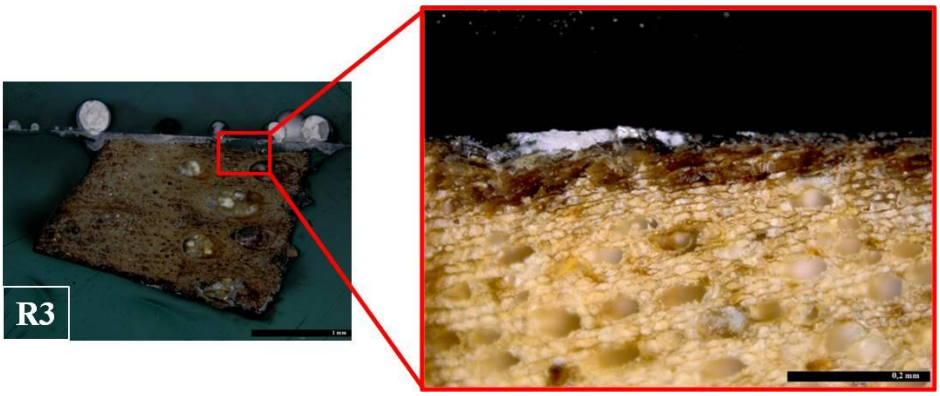
Fig. 11. Analisi allo stereomicroscopio, Serie U (Sala delle Udienze)

Analisi in microscopia ottica delle sezioni lucide

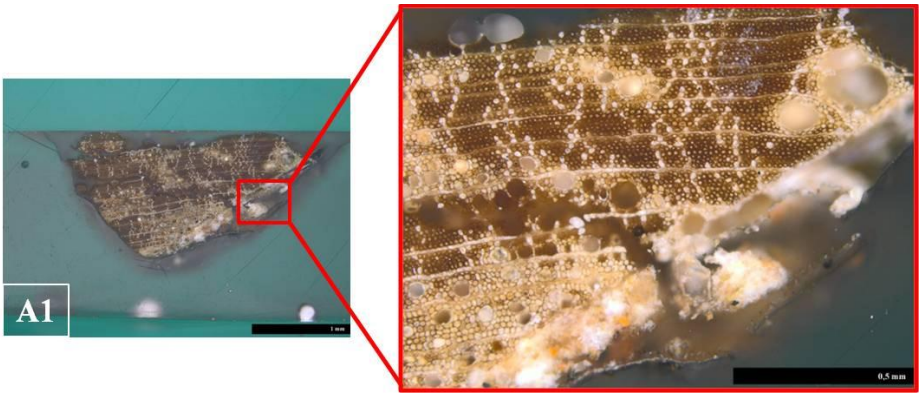
I campioni prelevati sono stati inglobati in resina epossidica e la sezione stratigrafica è stata lucidata fino ad ¼ di micron. Lo studio delle caratteristiche micro dimensionali del legno e degli strati pittorici è stata condotta al microscopio ottico in luce riflessa a differenti ingrandimenti fino a 50x.

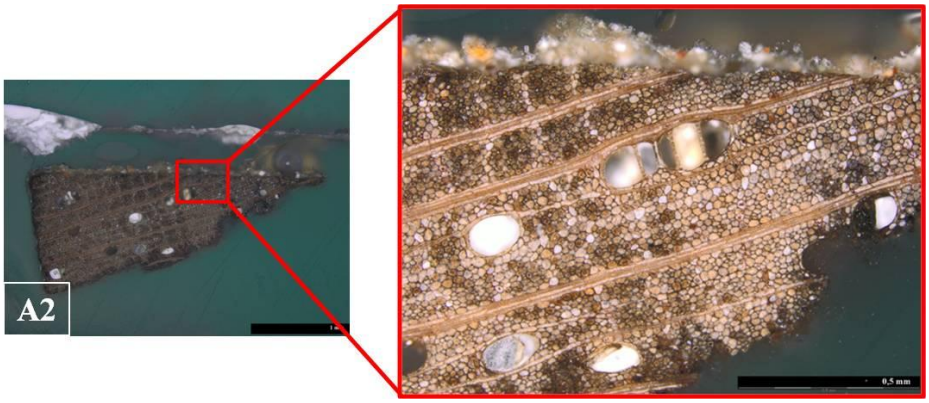
Serie R - I campioni in sezione trasversale mostrano una sostanziale omogeneità nelle caratteristiche anatomiche e cromatiche. È possibile evidenziare come sia nel campione R2 che in quello R3 siano presenti diffusi livelli di patine scure, in accordo con le forme di degrado fin qui evidenziate. In particolare nel campione R3 il livello scuro sembra essere concentrato nel livello più superficiale, a differenza del campione R2, ad indicare probabilmente un differente processo di degrado sia per risalita che per deposito.



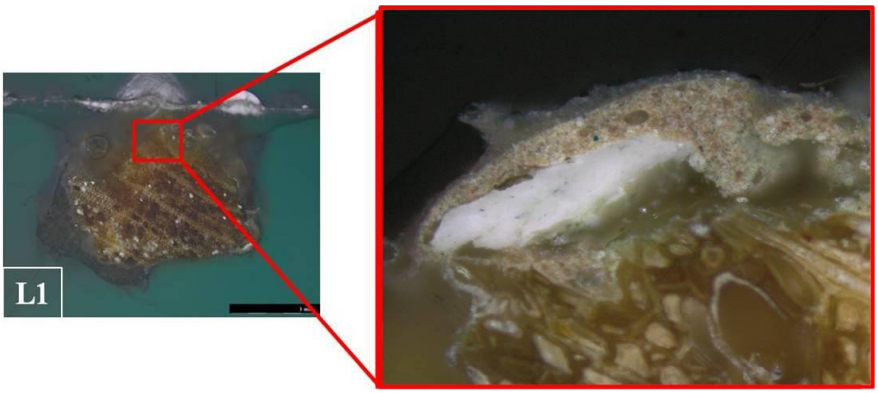

R3
0,2 mm

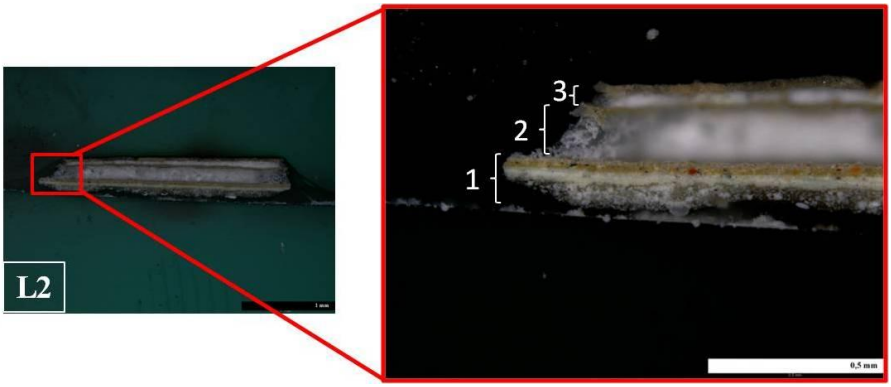
SERIE A – Le sezioni della serie A mostrano una colorazione bruna soprattutto negli strati più superficiali (A1) a conferma di un possibile trattamento protettivo applicato sui pavimenti. È possibile identificare in entrambi i campioni la presenza di patine bianche con inclusi di color arancione (A2).



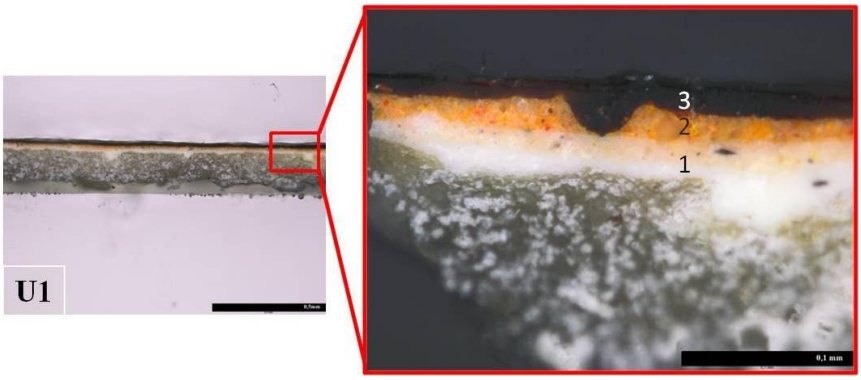


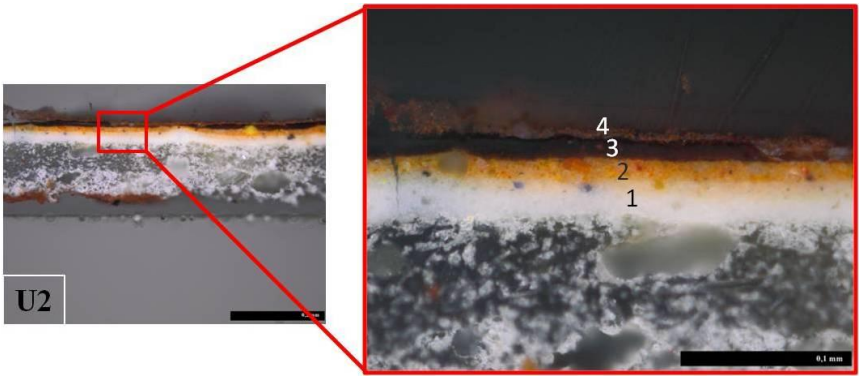
Serie L – Le analisi condotte sui campioni prelevati dal pannello ligneo della Stanza da Letto del Re mostrano alcune caratteristiche decorative piuttosto interessanti. Nel caso del campione prelevato dall'area della decorazione del pannello (L1) è possibile identificare alcuni residui di una "finta doratura" a vernice contenente inclusi a differente granulometria. Lo strato di vernice è stato steso su una finissima base preparatoria di colore bianco piuttosto coesa (probabilmente gesso e colla animale). La stratigrafia del campione prelevato direttamente dal pannello ligneo (L2) consente di identificare almeno tre livelli sovrapposti: un primo livello (1) di base costituito da uno strato preparatorio piuttosto ridotto di spessore e uno pittorico di colore marrone chiaro, coperto da uno strato bianco di più ampio spessore coperto a sua volta da una finitura cromatica marrone (2). L'ultimo livello (3) è costituito dal livello più esterno con uno strato preparatorio nuovamente fine coperto da un film pittorico di colore più scuro.

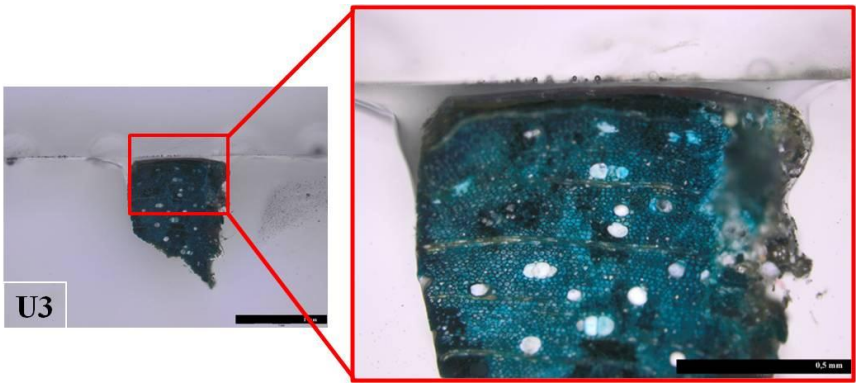




Serie U – L'indagine al microscopio sui prelievi provenienti dal pannello ligneo consente di evidenziare la presenza di una successione stratigrafica a differenti cromie (U1), a partire da uno strato preparatorio di colore bianco compatto (1) per passare ad uno strato pittorico di colore arancione chiaro (2) coperto dal livello più esterno marrone scuro estremamente compatto (3). Nel secondo punto del prelievo (U2) è interessante notare come la successione stratigrafica sia immutata tranne che nella presenza di un quarto strato (4) di colore più chiaro e molto meno coesa dello strato scuro sottostante e che rappresenta probabilmente l'ultima stesura cromatica stesa nelle fasi di restauro dei pannelli. L'osservazione del campione proveniente dal pavimento ligneo della decorazione a foglia di colore verde evidenzia una diffusa e omogenea presenza nella sezione del colore verde-azzurro, in modo continuo e senza presentare discontinuità (U3). L'alto livello di assorbimento e l'elevata affinità con il legno farebbe pensare all'utilizzo di colorante di natura organica.


U1
3
2
1
0,1 mm


U2
4
3
2
1
0,1 mm


U3
0,5 mm

Analisi in microscopia IR (*micro*FT-IR)

I campioni prelevati sono stati sottoposti ad analisi con un microscopio in spettroscopia IR in modalità ATR. I risultati ottenuti hanno consentito di ottenere informazioni interessanti sulle caratteristiche del degrado presente e sui trattamenti subiti.

Serie R – Gli spettri effettuati sulle patine nere presenti nei campioni prelevati dall'Appartamento del Primo Ministro (Fig.12 R1-R2-R3) mostrano una sostanziale omogeneità negli assorbimenti. Si evidenziano i picchi presenti intorno ai 1100 cm^{-1} caratteristico degli ioni solfato associato al picco intorno a 1620 cm^{-1} caratteristico dello stretching H-O-H. La presenza di un forte assorbimento intorno a 1423 cm^{-1} con debole assorbimento intorno a 1000 cm^{-1} e 870 cm^{-1} è riconducibile alla presenza di ioni carbonato. La presenza di solfati e di carbonati in quest'analisi mirata nei campioni tal quali sui diversi strati neri presenti sulle superfici confermerebbe come la modalità di alterazione possa essere causata da depositi di particellari indotti dai caloriferi posti vicino le finestre, oltre che da possibili risalite capillari dagli ambienti sottostanti. L'assenza di stretching C-H intorno a 2950–2920 cm^{-1} consente di escludere la presenza di trattamenti organici superficiali, a conferma dell'unico caso di studio di pavimenti che non hanno subito restauri o interventi di recupero recenti.

Serie A – Il campione A1 (Fig. 12, A1) mostra evidenti assorbimenti degli stretching C-H a 2910-2850 cm^{-1} oltre che un picco intorno a 1729 cm^{-1} caratteristico della presenza di gruppi carbonilici C=O. Queste indicazioni, associate alla presenza di un debole assorbimento nell'intorno di 1450 cm^{-1} tipico dei legami idrocarburici sembrerebbero evidenziare la presenza di un materiale oleoso presente sul campione, probabilmente un materiale di natura oleica utilizzato come protettivo dei pavimenti. Lo shift a del doppio legame C=O verso assorbimenti più prossimi a 1710 cm^{-1} sarebbe caratteristico della presenza di un olio invecchiato con evidenti processi di polimerizzazione. Il campione A2, proveniente da un'area evidentemente più degradata della stanza attigua all'Armeria, presenta invece picchi più simili a quelli della serie R, con picchi caratteristici, anche se meno evidenti, dei solfati. L'assenza degli stretching C-H indicherebbe l'assenza di matrice organica, anche se non è escluso che sotto lo strato di deposito analizzato non sia presente un livello di trattamento organico.

Serie L – Gli spettri della serie L sono risultati di complessa lettura e in particolare quello del campione L2 (Fig. 12, L2) consente di identificare alcuni picchi caratteristici sia degli oli che di strutture terpeniche, tipiche delle resine naturali. La ripetuta successione stratigrafica (come evidenziato nella caratterizzazione delle sezioni lucide) può aver sovrapposto differenti leganti organici e trattamenti rendendo difficoltosa l'analisi spettroscopica in IR.

Serie U – I due spettri prelevati dal pannello posto dietro il trono risultano praticamente sovrapponibili (Fig. 12, U1), indicando la presenza di gesso a conferma dello strato preparatorio presente e alcuni deboli segnali di materiale organico di probabile origine oleica. È interessante notare nel campione U3 prelevato dal pavimento ligneo e di colore verde come lo spettro sia praticamente sovrapponibile a quello di un legno trattato (Fig. 12, U3), e questo sembrerebbe confermare l'utilizzo di un colorante organico per le decorazioni delle foglie dei pavimenti della Sala delle Udienze.

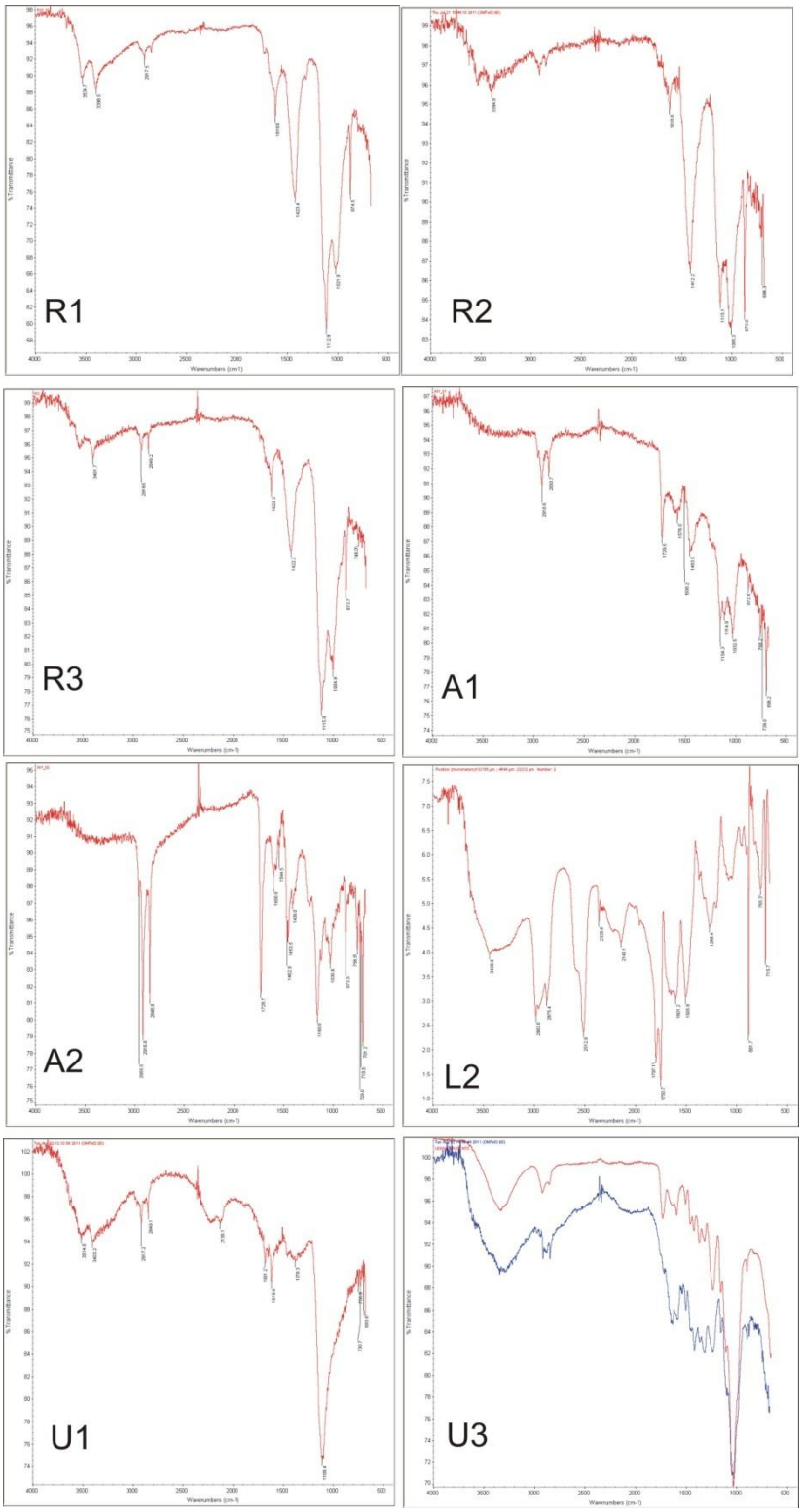


Fig. 12. Spettri IR prelievi

Analisi in Microscopia Elettronica (SEM-EDS)

Campione U1 (Sala delle Udienze)

Le sezione relativa al campione definito U1 del pannello ligneo, come già evidenziato dalle foto al microscopio ottico, mostra una stratigrafia con un livello esterno di colore marrone scuro, un livello sottostante di colore arancione, un ulteriore livello bianco e uno strato preparatorio grossolano. Le immagini al SEM confermano la suddivisione stratigrafica, con una maggior evidenziazione del livello di preparazione più profondo (Fig. 13 A) e una meno evidente differenziazione tra lo strato arancione e quello bianco. I due livelli nell'immagine al microscopio elettronico presentano una differenziazione strutturale che sembra legata più ad una concentrazione e compattamento dei cristalli più che ad una variazione della morfologia dei cristalli (Fig. 13 B). Lo strato preparatorio più interno appare al SEM disomogeneo, con cristalli di neoformazione (Fig. 13 C). Le analisi in EDS (Fig. 14 A1) per la caratterizzazione chimica indica la presenza di un minerale allumino silicatico contenente piombo per lo strato scuro superficiale, probabilmente legato da un medium organico. Lo strato arancione e bianco (Fig. 14 A2) confermano l'univocità strutturale con presenza di piombo dovuto probabilmente all'utilizzo di una carbonato di piombo (è probabile che il livello arancione sia colorato con un colorante organico). Il livello preparatorio evidenzia uno strato di gesso grossolano (Fig. 14 A3).

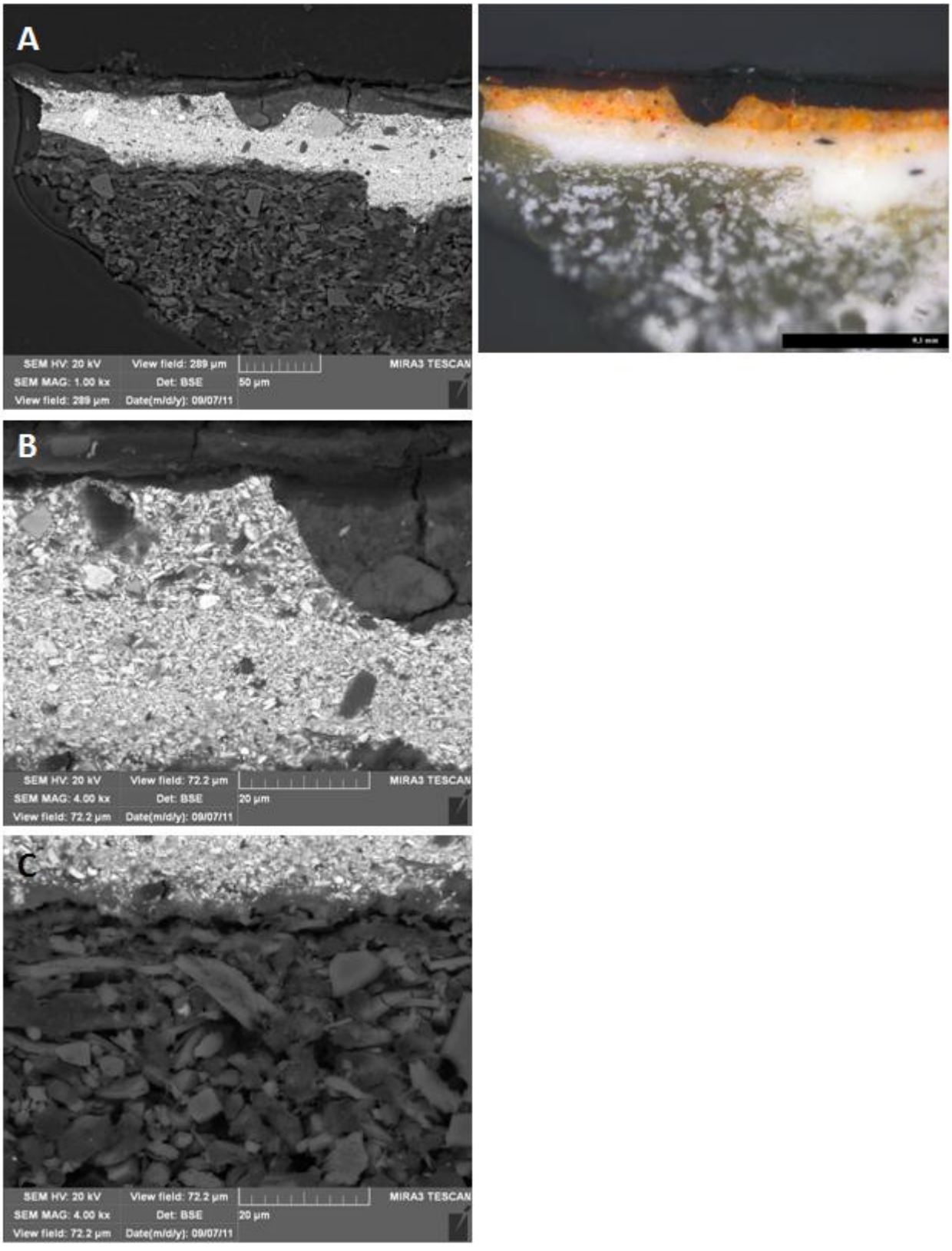


Fig. 13. Immagini al SEM e Microscopio ottico della sezione lucida U1

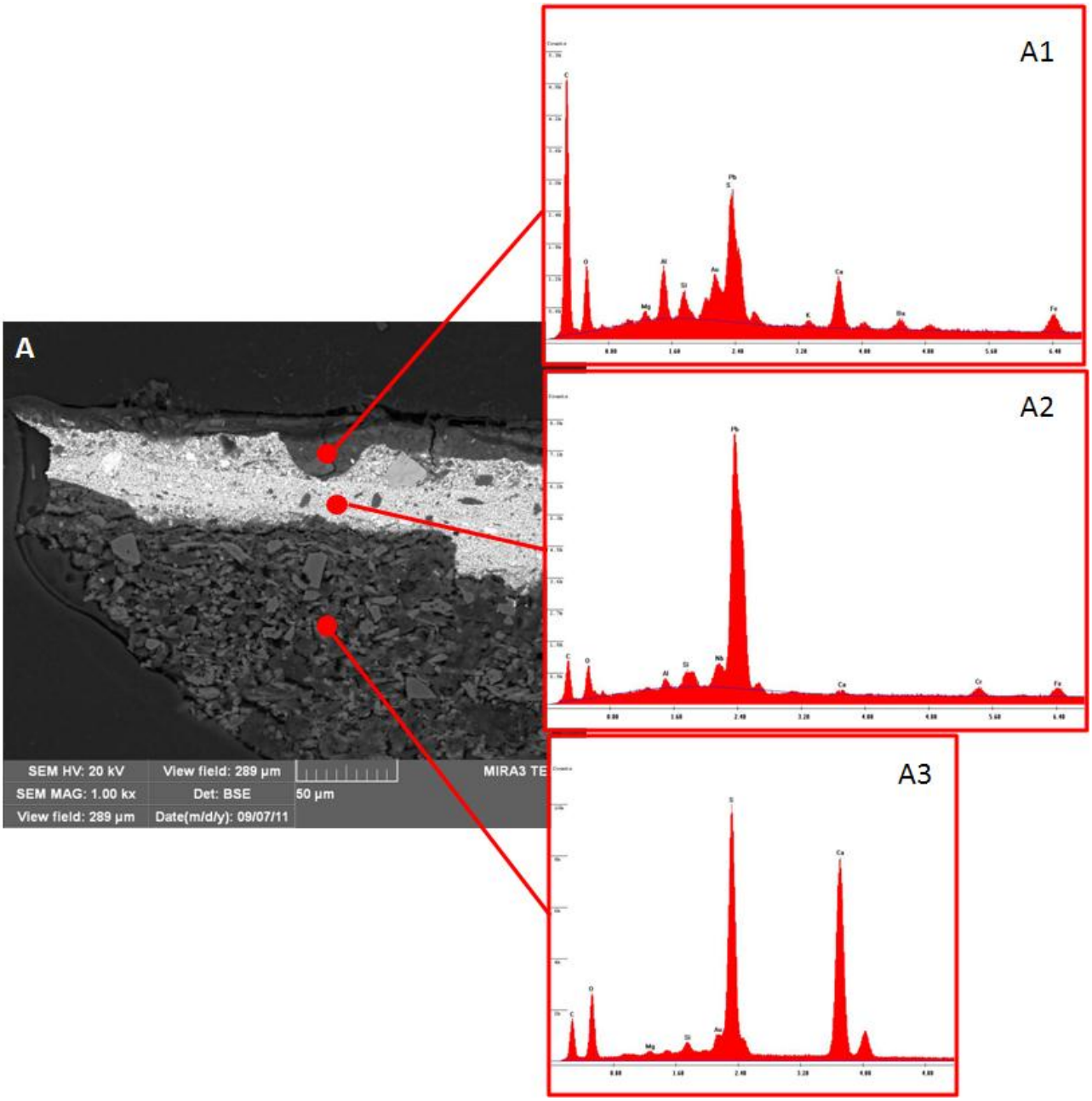


Fig. 14. Analisi all'EDS dei livelli stratigrafici del campione U1

Campione U3

Le immagini al SEM del campione U3 confermano la presenza di un materiale organico colorante uniformemente distribuito nel campione.

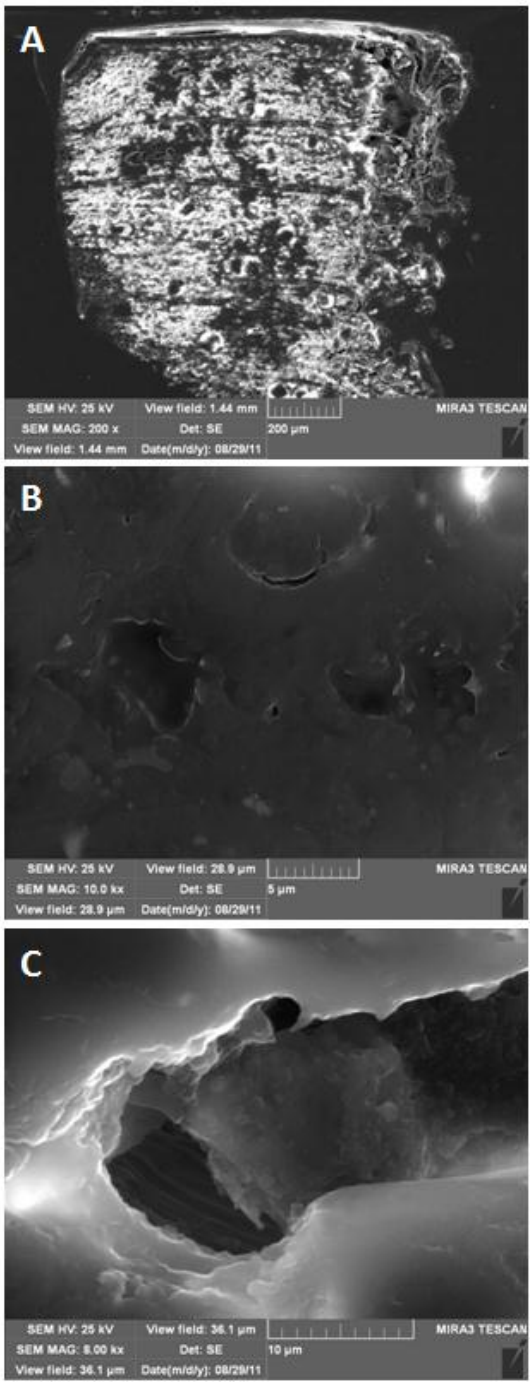


Fig. 15. Immagini SEM campione U3

Allegato 1 - Schede tecniche dei materiali lapidei

ROSSO AMMONITICO VERONESE (ROSA DI TERLAGO)

(Scheda tecnica del prodotto)

Il rosso ammonito veronese è un calcare nodulare abbastanza compatto con frattura concoide dal colore rosa chiaro (varietà rosa Terlago). Presenta stiloliti con concentrazioni di minerali argillosi ed ossidazioni di colore rosso scuro. Dal punto di vista petrografico è una Biomicrite, una roccia sedimentaria appartenente alla formazione del Giurassico medio-superiore (175 - 145 milioni di anni fa) e nota come Rosso Ammonitico Veronese. L'origine e riferibile ad un ambiente pelagico di plateau oceanico sul quale una sedimentazione condensata e a volte discontinua ha determinato una particolare struttura nodulare.

Questa varietà del Rosso Ammonitico Veronese, denominata anche "Ziresol", corrisponde alla parte media della formazione. L'analisi in sezione sottile, tratta dalla scheda tecnica del materiale in commercio, permette di definire la roccia una calcilutite a peloidi micritici torbidi, ricca di tintinnidi (calpionellidi di dimensioni molto minute: 80 - 100 µm) e in minor misura di radiolari, aptici, gusci sottili di lamellibranchi, articoli di crinoidi e saccocoma. La dolomite in cristalli idiomorfi romboedrici è più abbondante lungo i giunti stilolitici che concentrano anche la componente residuale di idrossidi ferrosi conferente il colore rosato alla roccia. Il materiale si può classificare come biomicrite.

Composizione chimica

% in massa			p.p.m.
SiO_2	0,00	Cu	18
TiO_2	0,04	Zn	17
Al_2O_3	0,10	Sr	149
Fe_2O_3	0,33		
MnO	0,07		
MgO	0,40		
CaO	55,11		
Na_2O	0,00		
K_2O	0,07		
P_2O_5	0,13		
LOI	43,76		
totale	100,01		

Caratteristiche fisico - meccaniche

Prove di laboratorio eseguite	valore medio	valore minimo	valore massimo	valore minimo atteso
Assorbimento d'acqua a pressione atmosferica (% massa)	0,29	0,27	0,33	
Resistenza a compressione monoassiale con orientazione dell'asse di carico perpendicolare alle discontinuità (MPa)	175	157	198	144
Resistenza a compressione monoassiale con orientazione dell'asse di carico parallela alle discontinuità (MPa)	86	28	133	15
Resistenza a compressione dopo 48 cicli di gelo - disgelo (MPa)	122	57	207	31
Resistenza alla flessione (MPa)	13	7,3	16,5	7,3
Resistenza alla flessione dopo 48 cicli di gelo - disgelo (MPa)	10,5	8,4	14,6	7,3
Resistenza all'abrasione (mm)	15,7	15,3	16,0	
Resistenza allo scivolamento (su superficie sottoposta a bocciardatura) (adimensionale)	76	75,8		

Utilizzo attuale

Il Rosa di Terlago è utilizzato per tutte le applicazioni edilizie sia in ambienti interni che Esterni: in particolare negli Esterni per l'allestimento di pavimentazioni di superfici pedonali, generalmente con la superficie bocciardata o rullata, ma anche per cordonate di delimitazione, gradinate, copertine, zoccolature, elementi di arredo urbano, nonché per la formazione o il rivestimento di muri nelle finiture grezze. In interni lo troviamo utilizzato nei pavimenti (levigati, lucidi), nella realizzazione di scale, di rivestimenti, di elementi di arredo vari.

BIANCO di CARRARA (ORDINARIO)

Marmo bianco molto puro, a grana media, del Liass inferiore. Dal punto di vista petrografico è una roccia metamorfica; la località di estrazione è compresa nel distretto estrattivo di Carrara. Sono solitamente marmi a grana fine o medio-grossolana, a tessitura xenoblastica, di colore bianco perlaceo fino al grigio molto chiaro, piuttosto omogenei o con qualche ornamentazione grigia, più o meno sfumata, trame di vene irregolari di colore grigio,con pirite microcristallina. L'aspetto è quella di una roccia massiva e compatta, con ornamentazione da orientata a non orientata

Scheda ETAG – Regione Toscana:

ANALISI CHIMICHE

	% in peso
CO_2	44.00
MgO	0.46
Al_2O_3	0.01
SiO_2	0.01
K_2O	0.01
CaO	55.19
TiO_2	0.00
MnO	0.06
Fe_2O_3	0.06

CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE

1. Carico di rottura a compressione	kg/cm^2	1426
2. Carico di rottura a compressione dopo cicli di gelività	kg/cm^2	1268
3. Carico unitario di rottura a flessione	kg/cm^2	185
4. Dilatazione lineare termica	10^{-6} per °C	3.2
5. Coefficiente d'imbibizione d'acqua	% in peso	0.13
6. Peso per unità di volume	kg/m^3	2687
7. Resistenza all'urto	cm	58.8
8. Modulo di elasticità lineare	kg/cm^2	691000
9. Resistenza all'abrasione	mm	6.52

BARDIGLIO

Il bardiglio, nelle sue varietà di colore, appartiene alla famiglia dei marmi di cui fanno anche parte i marmi bianchi, i cipollini, le brecce ed altri ancora. Sono materiali di media durezza e facile lavorabilità. Molto spesso, sono impiegati in rivestimenti murari, pavimenti, davanzali. Il bardiglio comune, abbondante presso Serravezza e Stazzema nella Alpi Apuane, possiede una struttura saccaroide o ceroide, e molta attitudine alla lucidatura. Il colore è bluastro, o ceruleo chiaro, con sfumature e passaggi al bardiglio

fiorito, che spetta pure al gruppo dei marmi venati. Il colore più o meno scuro è dovuto alla presenza di pirite microcristallina.

Scheda ERTAG – Regione Toscana:

ANALISI CHIMICHE

	% in peso
CO_2	44.00
MgO	1.07
Al_2O_3	0.06
SiO_2	0.14
K_2O	0.02
CaO	54.69
TiO_2	0.00
MnO	0.01
Fe_2O_3	0.00

CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE

1. Carico di rottura a compressione	kg/cm^2	1589
2. Carico di rottura a compressione dopo cicli di gelività	kg/cm^2	1551
3. Carico unitario di rottura a flessione	kg/cm^2	241
4. Dilatazione lineare termica	10^{-6} per °C	4.6
5. Coefficiente d'imbibizione d'acqua	% in peso	0.12
6. Peso per unità di volume	kg/m^3	2693
7. Resistenza all'urto	cm	38.8
8. Modulo di elasticità lineare	kg/cm^2	884000
9. Resistenza all'abrasione	mm	3.63

3. LINEA 2

SUPPORTO ALL'INDIVIDUAZIONE DI SOLUZIONI TECNOLOGICHE E COSTRUTTIVE PER L'INTEGRAZIONE IN EDIFICI DI PREGIO STORICO - ARCHITETTONICO DI SISTEMI E SOLUZIONI ORIENTATE ALL'EFFICIENZA ENERGETICA E ALLO SFRUTTAMENTO DI FONTI RINNOVABILI

Gruppo di lavoro

Prof. Marco Morandotti (coordinatore)

Prof. Daniela Besana

Ing. Valentina Cinieri

3.1 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA DELLA RICERCA

3.2 ASSESSMENT PRESTAZIONALE DELLA FABBRICA

3.3 VALUTAZIONE DELL'IMPATTO PRESTAZIONALE

3.4 ASSESSMENT FUNZIONALE

3.5 AZIONI PROGETTUALI

3.1 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA DELLA RICERCA

Lo svolgimento della ricerca è avvenuto con approccio metodologico sistemico, a partire dai punti precedentemente descritti e stabiliti nell'accordo di programma stipulato con ENEA per l'attività di ricerca. In particolare, la fase di studio qui illustrata è volta all'individuazione di soluzioni tecnologiche e costruttive per l'integrazione in edifici di pregio storico-architettonico di sistemi e soluzioni orientate all'efficienza energetica e allo sfruttamento di fonti rinnovabili.

Al fine di comprendere il metodo di studio utilizzato per rispondere agli obiettivi della ricerca stessa, è possibile articolare lo studio in due sotto-categorie:

1. linee guida per modalità di integrazione di soluzioni tecnologiche orientate all'efficienza energetica e all'uso di fonti rinnovabili con apparecchiature costruttive storiche;

2. applicazione ai casi di studio individuati

Tale distinzione infatti si articola mediante una prima ricostruzione e riorganizzazione del quadro conoscitivo in merito alle soluzioni tecnologiche oggi in uso e presenti sul mercato ai fini di un miglioramento dell'efficienza energetica a livello generale con una successiva discesa di scala allo specifico caso di studio individuato. Risulta chiaro inoltre, che rispetto all'ampia casistica delle soluzioni ipotizzate ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio, una fonte di forte possibile limitazione alle scelte è per l'appunto l'edificio stesso, soprattutto se di elevato valore storico-architettonico; il ventaglio delle possibili soluzioni inoltre su un edificio esistente potrà risultare sempre differenti proprio in relazione alle caratteristiche costitutive, costruttive, morfologiche dell'edificio e del suo contenuto, in termini di qualità dei materiali, degli arredi e delle finiture in esso presenti.

Appare quindi evidente che l'obiettivo primario della ricerca, in questa fase, si concentri sulla individuazione di metodi di approccio e di matrici di valutazione di possibili strategie di intervento, piuttosto che non su un abaco esaustivo di possibili soluzioni specifiche.

Una tale modalità di azione, volta ad un approccio meta progettuale delle azioni possibili ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica su un edificio storico si ritiene quindi possa avere una valenza non solo specifica e contingente alla presente ricerca ma, con i necessari accorgimenti dovuti allo specifico caso, un valore esportabile ai differenti contesti dei casi di studio. La validità delle ipotesi nel seguito proposte, seppur partano da soluzioni generali, non viene inficiata proprio perché, nella seconda parte, testata e validata nell'ala sud della Villa Reale.

Risulta chiaro inoltre che, i risultati parziali ottenute dalle singole linee di ricerca discendono dalla sintesi dei singoli risultati proprio in ragione del carattere fortemente multidisciplinare della ricerca stessa, che si è avvalsa dell'apporto di competenze specifiche in ogni singolo campo. L'approccio impiegato dunque mira a raggiungere una visione integrata e multidisciplinare del problema in modo da poter avere una visione complessiva e il più possibile completa dell'oggetto e delle sue specificità rispetto alle soluzioni impiegabili.

Per questa ragione, la presente linea di ricerca riunisce i risultati e le ricerche svolte nell'ambito delle *Linee 1 e 3*. Le indagini effettuate in termini di caratterizzazione microclimatica degli ambienti interni e delle conseguenti dinamiche di degrado dei

materiali e beni in essi presenti (linea 1) costituiscono una base conoscitiva fondamentale per la possibile individuazione delle tecnologie volte a migliorare l'efficientamento termico, tenendo in considerazione le condizioni termo-igrometriche necessarie non solo per il comfort dell'utenza, ma anche per la corretta conservazione dei manufatti storici. Questo, unitamente alle informazioni climatiche, permette di avere dei dati concreti su cui basarsi. Parallelamente gli studi compiuti dalla *Linea 3* risultano di supporto alla definizione dei requisiti principali e per valutare, in base ad indicatori, l'intervento proposto. Ciò permette inoltre un monitoraggio del caso di studio da un punto di vista energetico prima e dopo l'attuazione delle operazioni previste.

Le Linee Guida sono un insieme di raccomandazioni sviluppate sistematicamente, sulla base di conoscenze continuamente aggiornate e valide, e vengono redatte allo scopo di rendere appropriato, e con un elevato standard di qualità, un comportamento desiderato. Le prescrizioni redatte costituiscono una base di partenza per l'impostazione di *modus operandi* condivisi in ogni campo di lavoro.

Obiettivo della ricerca è la definizione di un primo nucleo metodologico finalizzato alla definizione di linee guida per l'integrazione di soluzioni tecnologiche orientate all'efficienza energetica e all'uso di fonti rinnovabili in apparecchiature costruttive storiche. Ciò implica, dunque, la definizione di raccomandazioni finalizzate ad interventi su edifici storici, e pertanto con significativi vincoli e limitazioni per le possibili azioni, che possano produrre un miglioramento dell'efficienza energetica e che permettano lo sfruttamento di fonti di energia rinnovabili.

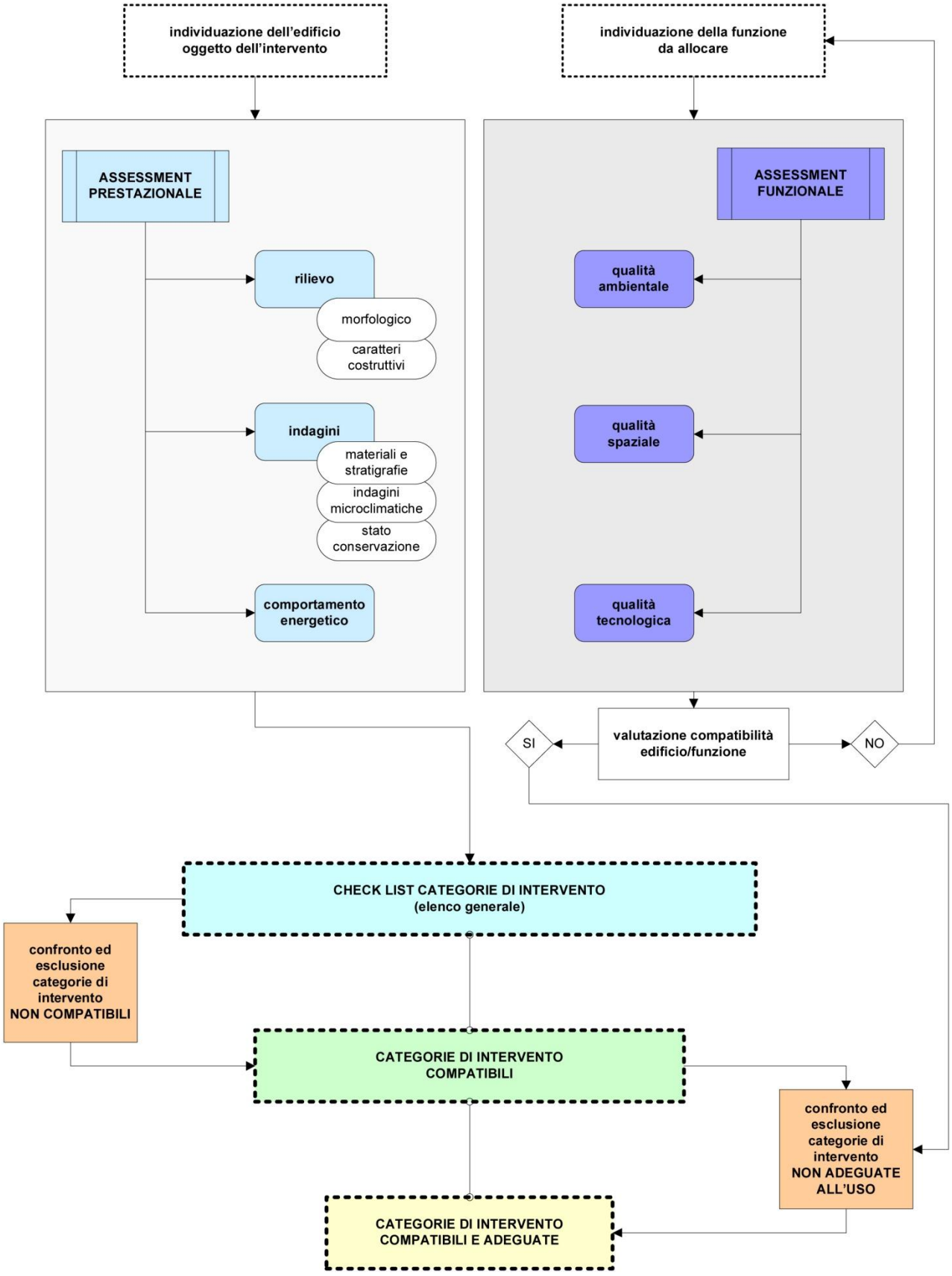
L'attività di ricerca è stata schematicamente articolata in due momenti.

Da un lato una fase analitico/conoscitiva a sua volta articolata in:

- Assessment prestazionale della fabbrica (analisi preliminari) – cfr cap. 3.2
- Valutazione dell'impatto dell'adeguamento funzionale/prestazionale sul contenitore (metaprogettazione) – cfr cap. 3.3
- Assessment funzionale – cfr cap. 3.4

Questo primo momento è stato poi seguito da una seconda fase, di carattere applicativo, centrata sul caso di studio individuato, mediante la determinazione di possibili scelte progettuali e della loro mutua integrazione (fase progettuale) – cfr cap. 3.5.

Lo schema seguente illustra in maniera complessiva e sintetica il metodo di lavoro proposto. Al fine di scegliere consapevolmente delle soluzioni compatibili con l'esistente, è necessario procedere, in primo luogo, attraverso la conoscenza della fabbrica per evidenziare possibilità di azione ed eventuali vincoli per un intervento progettuale volto al suo miglioramento energetico. Secondariamente la stessa casistica di scelte d'intervento possibili deve essere verificata anche in relazione alla funzione che si intende inserire. Solo l'intersezione dei vincoli imposti dall'esistente e quelle imposti dalla destinazione d'uso, permettono di ottenere come sottoinsieme solamente le soluzioni progettuali impiegabili.


individuazione dell'edificio oggetto dell'intervento
individuazione della funzione da allocare
ASSESSMENT PRESTAZIONALE
ASSESSMENT FUNZIONALE
rilievo
morfologico
caratteri costruttivi
indagini
materiali e stratigrafie
indagini microclimatiche
stato conservazione
comportamento energetico
qualità ambientale
qualità spaziale
qualità tecnologica
valutazione compatibilità edificio/funzione
SI
NO
CHECK LIST CATEGORIE DI INTERVENTO (elenco generale)
confronto ed esclusione categorie di intervento NON COMPATIBILI
CATEGORIE DI INTERVENTO COMPATIBILI
confronto ed esclusione categorie di intervento NON ADEGUATE ALL'USO
CATEGORIE DI INTERVENTO COMPATIBILI E ADEGUATE

3.2 ASSESSMENT PRESTAZIONALE DELLA FABBRICA

La prima fase di approccio alla fabbrica non può che essere legata alla conoscenza e alla determinazione delle sue prestazioni residue e peculiari.

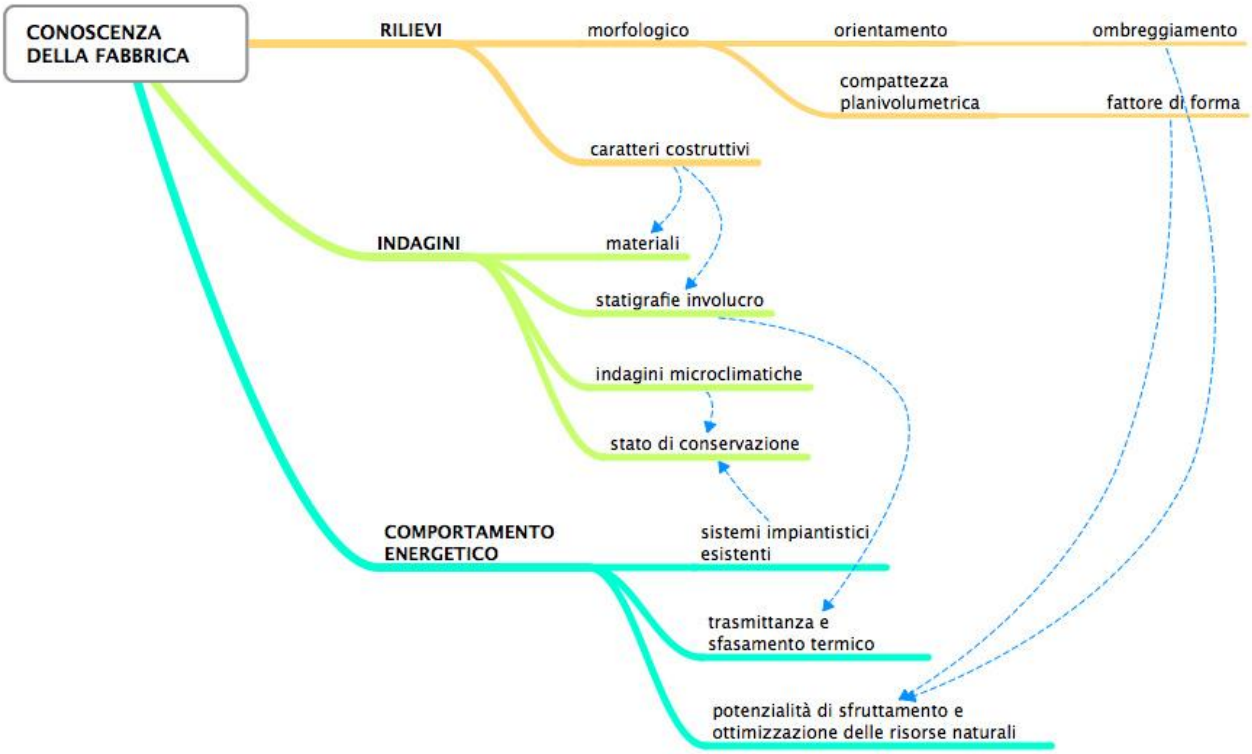
In questo caso la fase di assessment prestazionale è orientata ad acquisire l'insieme di elementi utili alla comprensione del comportamento energetico dell'edificio.

I principali elementi d'indagine sono la morfologia e l'orientamento dell'edificio ed i caratteri costruttivi dell'involucro. Risulta infine necessario investigare in merito alla presenza e alle caratteristiche di sistemi impiantistici esistenti al fine di verificarne l'efficienza e l'efficacia residue e le possibili trasformazioni e integrazioni.

La ricerca è condotta su un edificio di pregio storico ed è, quindi, fondamentale considerarne e rispettarne i vincoli costruttivi e morfologici ed i suoi caratteri peculiari. È per questo che assumono una grande importanza le indagini effettuate per la caratterizzazione materica dei manufatti (cfr. *Linea 1*), dato che permettono di capire quali sono le migliori condizioni ambientali per la conservazione, nonché i materiali compatibili in caso di intervento.

In questa prima fase convergono anche i risultati relativi allo studio delle dispersioni energetiche e del fabbisogno di energia dell'edificio, il cui comportamento termico deve essere studiato prima e dopo l'intervento proposto (cfr. *Linea 3*).

Al fine di rendere evidente i continui scambi di risultati tra le singole unità di ricerca e le loro linee di studio, si riporta il seguente schema che riassume quanto detto ed evidenzia il legame tra alcuni punti di "sotto-fasi" differenti. Tali correlazioni indicano come i vari momenti di ricerca non possano essere letti in maniera disgiunta tra loro in quanto strettamente interconnessi.



Ciò che viene qui trattato è volto a mettere in luce le caratteristiche costruttive della stessa, i materiali di cui essa è costituita al fine di ricostruire la stratigrafia dell'involucro.

Inoltre, per poter comprendere il comportamento dei componenti tecnologici oggetti di studio si farà riferimento anche alle indagini e ai dati ottenuti sul microclima interno ed esterno rispetto al quale tale componenti sono soggetti. Si rimanda, pertanto, alla descrizione generale del complesso architettonico della Villa Reale di Monza (cfr 1.2).

MORFOLOGIA E CARATTERI DISTRIBUTIVI

La conoscenza dell'assetto morfologico e distributivo della fabbrica è un obiettivo da perseguire nella fase di assessment prestazionale, in quanto può incidere in modo diretto o indiretto sulle prestazioni complessive dell'organismo e sulla sua risposta ai dati climatici esterni.

L'assetto morfologico è rilevante non solo in relazione alla collocazione al suolo dell'edificio e al suo orientamento solare prevalente, ma anche in relazione alla maggiore o minore compattezza planivolumetrica dell'insieme. Da ciò derivano tanto la presenza e l'eventuale rilevanza di ombreggiamenti su porzioni delle chiusure verticali, quanto più in generale il fattore di forma del corpo di fabbrica. Da quest'ultimo dipende a sua volta la maggiore o minore propensione dell'edificio alla dispersione del calore.

Benché sia evidente che confrontandosi con edifici esistenti, sovente di rilevanza storica, sia di norma precluso fare riferimento a strategie consuete di ottimizzazione sia in termini di protezione dell'involucro (ad esempio mediante sistemi esterni di ombreggiamento, fissi o mobili), sia in termini di captazione e guadagno gratuito (serre solari), la lettura analitica di questi aspetti rimane ugualmente significativa, dal momento che ad esempio il fattore di esposizione solare può determinare in condizioni estive scostamenti non trascurabili nel microclima interno di alcune porzioni dell'edificio e quindi richiedere una differente risposta impiantistica per garantire le condizioni di comfort interno richieste.

fig. 3.3.1 L'ala sud: il suo prospetto nord (a sinistra) e la cavallerizza (a destra), situata ad est rispetto al corpo dell'ala sud

SISTEMI TECNOLOGICI E COSTRUTTIVI

La conoscenza dei sistemi tecnologici e costruttivi della fabbrica e dei suoi principali sub-sistemi è evidentemente essenziale ai fini della comprensione del suo comportamento ambientale rispetto alle sollecitazioni esterne.

L’analisi tecnologica e prestazionale deve essere svolta su tutti i fronti dell’involucro: chiusure verticali, chiusure orizzontali (solai contro terra, coperture piane), chiusure inclinate. Essa è diretta a quantificare i valori di trasmittanza di ciascuno di questi elementi e degli eventuali ulteriori sub-sistemi tecnologici presenti (ad esempio chiusure trasparenti).

Risulta parimenti importante determinare il valore di sfasamento termico dell’involucro al fine di ottimizzare il comportamento dei sistemi tecnologici impiantistici. E infatti noto come le membrature murarie continue degli edifici storici, in ragione della loro elevata inerzia termica possano garantire una risposta prestazionale più che soddisfacente in condizioni estive.

È peraltro evidente che, solo la definizione delle funzioni ospitate dell’edificio, e quindi le esigenze generare dalle attività in esso svolte determinano il set di requisiti prestazioni e la risposta impiantistica richiesta. In particolare va osservato come destinazioni specifiche, quali quelle museali/espositive, richiedano il controllo attento di parametri termo-igrometrici differenti dalla sola temperatura, quali ad esempio umidità relativa e, talora densità di CO_2.

Tali aspetti, strettamente connessi alla conservazione dell’edificio e degli eventuali beni in esso contenuti, sono stati affrontati dettagliatamente nel cap.1.

ULTERIORI ELEMENTI DI CONOSCENZA

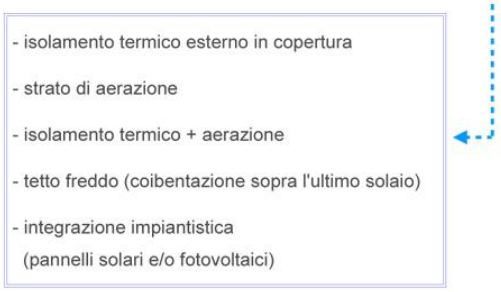
La fase di assessment prevede infine la caratterizzazione microclimatica interna dell’edificio (cfr. cap.1) e l’analisi del suo comportamento energetico prima degli interventi (cfr. cap.3).

3.3 VALUTAZIONE IMPATTO PRESTAZIONALE NUOVA FUNZIONE / CONTENITORE

Una volta approfondito il quadro conoscitivo della fabbrica in termini di conoscenza dei suoi caratteri costitutivi e morfologici, risulta necessario confrontare rispetto ad un ampia casistica di interventi possibili ai fini del miglioramento energetico-prestazionale sulla fabbrica, quelli effettivamente impiegabili sull'edificio storico esistente da analizzare.

- **Studio di fattibilità nuova funzione**

- **Strategie d'intervento possibili in base ai diversi componenti**
  - chiusure verticali opache
  - chiusure verticali trasparenti
  - chiusure orizzontali
  - **chiusure inclinate**
  - chiusure orizzontali contro terra



- **Matrici sinottiche**
  - classi di esigenze
    - requisiti per componenti
    - indicatori (*Linea 3*)
  - prestazioni / destinazioni d'uso

- **Valutazione prestazionale**
  - Definizione di requisiti quantitativi e qualitativi per indicatori di controllo

I dati raccolti nella fase di *Assessment prestazionale* costituiscono una sorta di analisi preliminare dello stato di fatto. Segue, dunque, la valutazione degli impatti che i possibili interventi e le azioni possono avere sul contenitore, partendo da un livello generale, in cui vengono considerate tutte le possibili strategie di miglioramento dell'efficientamento energetico di un edificio, fino a giungere alla definizione dei requisiti richiesti, al fine di garantire determinati livelli di prestazione e comfort ambientale, nonché la conservazione degli elementi storici (es. mobili lignei, tappezzerie, pavimentazioni).

É di assoluta importanza considerare in via preliminare le destinazioni d'uso previste per l'edificio (o per la sua porzione oggetto dell'intervento), in quanto, al variare di queste, mutano i parametri di comfort ambientale richiesti e quindi le prestazioni che devono essere fornite. Un altro fattore connesso alla destinazione d'uso è il numero di utenti presenti all'interno dell'ambiente, dato che questo può determinare un aumento cospicuo di CO_2 nell'aria, variazioni di umidità e temperatura, provocando cambiamenti anche significativi in termini non solo di comfort ma anche rispetto alla conservazione dei manufatti beni, sia immobili (ad esempio superfici decorate, tappezzerie, stucchi), sia mobili (arredi, oggetti esposti). Si ritiene quindi necessario svolgere una valutazione preliminare di compatibilità tra la nuova funzione da insediare e il contenitore edilizio, mettendo in evidenza lo scostamento prestazionale tra stato di fatto e destinazioni d'uso previste.

Al fine di elaborare gli interventi per il caso di studio previsto, in un primo momento si è scelto di considerare tutte le possibili strategie d'intervento volte ad apportare un miglioramento delle prestazioni dell'edificio, nonché l'ottimizzazione dell'uso di energia. Attraverso l'analisi delle relazioni tra azioni possibili e parametri di valutazione, quali obiettivi di sostenibilità, esigenze connesse all'uso, vincoli dell'edificio storico, si è creata la base per effettuare una selezione delle possibili proposte. Ogni intervento individuato presenta determinati requisiti da considerare in relazione alle esigenze, nonché da valutare sulla base di indicatori qualitativi e quantitativi opportunamente individuati (cfr. Linea 3). Le considerazioni sono sintetizzate per mezzo di matrici sinottiche e permettono di comprendere maggiormente l'ammissibilità delle azioni considerate.

Di grande importanza risultano gli interventi riguardanti l'involucro, anche se gli edifici di pregio storico presentano molti vincoli morfologici e tecnologici. Per questo motivo e poiché risulta essere uno dei punti di maggior criticità per quanto riguarda le dispersioni, si è scelto di approfondire lo studio delle chiusure inclinate, a partire dal rilievo degli strati esistenti e proponendone, nelle successive fasi, una riprogettazione ritenuta idonea in rapporto al caso di studio.

SOLUZIONI TECNOLOGICHE ORIENTATE ALL'EFFICIENZA ENERGETICA

Lo studio della morfologia dell'edificio e delle componenti ambientali è propedeutico ad ogni ragionamento progettuale. La fase di *assessment prestazionale* ha permesso di delineare un quadro complessivo dello stato di fatto, al fine di comprenderne punti di forza, debolezze, opportunità e minacce del complesso. In questo modo è possibile definire al meglio le strategie progettuali da mettere in atto.

Analisi SWOT in relazione alle finalità della ricerca

(forze = Strengths, debolezze = Weaknesses, opportunità = Opportunities, minacce = Threats)

FORZA	DEBOLEZZA
- Edificio di pregio storico - Grande parco in cui la Villa Reale è inserita	- Presenza di barriere architettoniche - Dispersioni termiche - Vincoli morfologici per gli interventi - Presenza di tecnologie e morfologia inadeguate alle esigenze attuali
OPPORTUNITÀ	**MINACCIA**
- Edificio che possiede spazi che possono essere utilizzati per finalità pubbliche (mostre, convegni...) - Possibilità di trarre guadagno dalle visite guidate all'interno dell'edificio, anche ai fini della manutenzione e della sostenibilità economica	- Inquinamento atmosferico - Parametri ambientali non adeguati alla conservazione dei materiali (degrado)

In seguito, con la valutazione degli impatti determinati da nuove possibili destinazioni d'uso, si possono stabilire definitivamente le strategie d'intervento idonee, definendo le azioni di progetto, correlate ai vincoli dell'edificio storico. Tuttavia, prima di intraprendere la fase progettuale si è ritenuto corretto prendere in esame le possibili soluzioni volte al miglioramento del comportamento energetico di un qualunque edificio, valutandole, poi, in relazione ai vincoli degli edifici storici, nonché applicati al caso di studio.

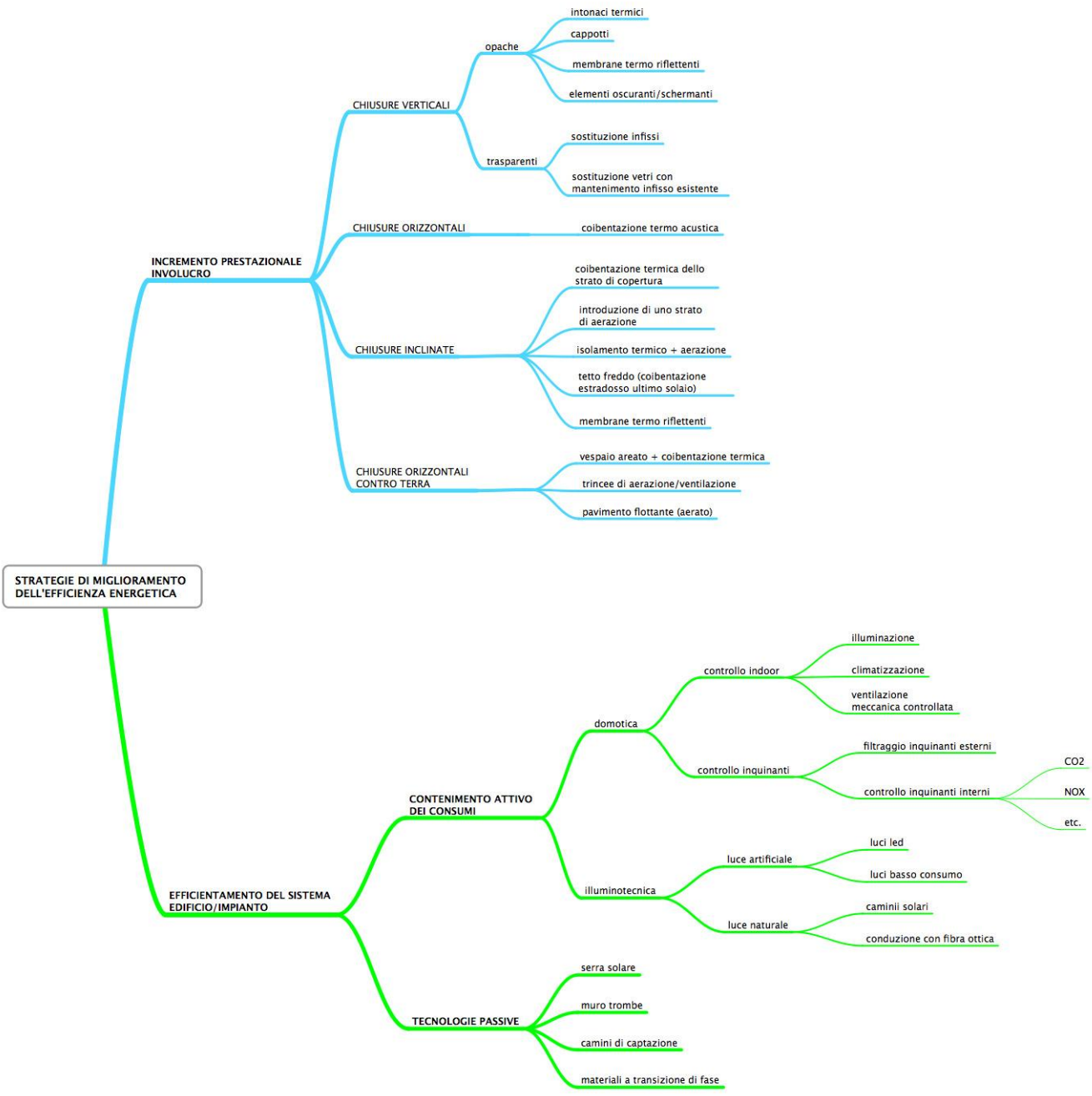
Le possibili azioni da mettere in atto per rendere le realizzazioni sostenibili sono riconducibili a due percorsi:

- Diminuzione della dispersione del calore con conseguente riduzione dell'energia consumata
- Investimento in sistemi per la produzione e lo sfruttamento di energia da fonti rinnovabili

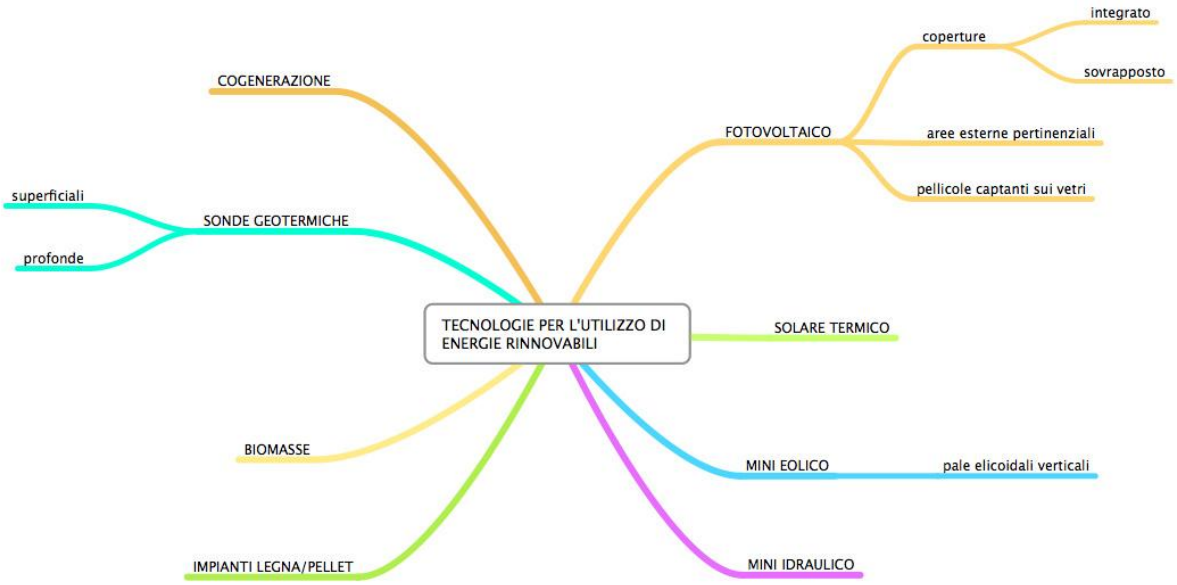
La prima delle due strategie può operare incrementando le prestazioni dell'involucro o migliorando l'efficienza energetica del sistema edificio-impianto.

Nel seguente schema sono riportati i possibili interventi suddivisi per i diversi componenti.

Schema generale delle possibili strategie di miglioramento dell'efficienza energetica di un edificio



Tecnologie per l’utilizzo di energie rinnovabili



OBIETTIVI DELLA SOSTENIBILITÀ E CLASSI DI ESIGENZA

Risulta, dunque, in prima analisi necessario stabilire quali siano le strategie possibili ai fini del miglioramento energetico per poi conseguentemente procedere con il confronto e l'eventuale esclusione delle categorie d'intervento possibili, al fine di individuare quelle compatibili con la fabbrica.

La valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio può essere accompagnata da una valutazione della sua "qualità ambientale", principio su cui si basano i più recenti sistemi di certificazione, i quali hanno lo scopo di *valutare le prestazioni energetico - ambientali di un edificio secondo criteri di sostenibilità ambientale e analizzando le sue caratteristiche durante il suo ciclo di vita*.

Le varie tipologie di certificazione si basano su sistemi di valutazione che prendono in esame il consumo delle risorse naturali (energia, acqua, territorio), i carichi ambientali prodotti (emissioni inquinanti, impatto sul territorio), il comfort e la qualità ambientale (indoor e outdoor), la flessibilità e la qualità del servizio. Anche se in Italia non esiste un sistema nazionale riconosciuto, tutte le Regioni hanno adottato il Protocollo ITACA, un sistema di valutazione della sostenibilità energetico - ambientale degli edifici introdotto nel 2004 dal Gruppo di Lavoro Interregionale in materia di Bioedilizia. Questo metodo consente di esprimere la sostenibilità con un punteggio da -1 a +5 e la valutazione avviene tramite schede organizzate in ambiti tematici.

Le aree di valutazione definite dal protocollo sono sette:

a. Qualità ambientale esterna (qualità degli spazi esterni, controllo fonti di inquinamento esterno)
b. Consumo delle risorse
c. Carichi ambientali
d. Qualità dell'ambiente interno
e. Qualità del servizio
f. Qualità della gestione
g. Mobilità sostenibile (sviluppo urbano).

Ciascuna di queste aree affronta un particolare aspetto della progettazione sostenibile. L'ultima tematica pone l'attenzione sul tema della mobilità in quanto fattore strategico per uno sviluppo sostenibile e risulta di minor interesse ai fini della ricerca svolta. In questo caso, quindi, nel proseguo della trattazione, quest'ultimo ambito tematico non verrà più preso in considerazione.

Al fine di comprendere come mettere a sistema queste aree con le scelte progettuali, è possibile, come si accennava precedentemente, fare ricorso ai criteri di approccio meta progettuale. In tal modo, ciascuna di queste aree è identificabile con una classe di esigenze, in cui sono contenute le tematiche cui progettista, costruttore e gestore di un opera sono chiamati ad affrontare.

Ad ogni classe di esigenza corrispondono classi di requisiti e singoli requisiti qualitativi e/o quantitativi, ossia qualità o condizioni che consentono il soddisfacimento degli obiettivi richiesti (esigenze).

I requisiti qualitativi sono relativi alle scelte progettuali e sono verificati quando viene riconosciuto in esse il raggiungimento dell'obiettivo che ci si era posti; i requisiti

quantitativi, invece, sono verificabili attraverso parametri quantitativi, ossia acquisendo dati numerici misurabili tramite strumenti di valutazione idonei.

Di seguito si riportano schematicamente i requisiti identificati per classe di requisiti e per classe di esigenze.

Tab. 3.3.1 - Elenco dei requisiti per classi di esigenze

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO
a. QUALITÀ AMBIENTALE ESTERNA	Aspetti termo-fluidodinamici	Controllo della temperatura superficiale
		Controllo dei flussi d'aria
	Comfort percettivo - visivo / integrazione con il contesto	Riconoscibilità dei caratteri del luogo
		Percezione e comunicazione multisensoriale
		Protezione del valore culturale dell'opera
	Controllo delle fonti di inquinamento atmosferico	Protezione da fonti inquinanti esterne all'area
		Protezione da fonti inquinanti interne all'area
	Inquinamento acustico	Protezione dal rumore esterno all'area
		Protezione dal rumore interno all'area
	Inquinamento elettromagnetico	Protezione da campi elettrici e magnetici a bassa frequenza
		Protezione da campi elettrici e magnetici ad alta frequenza
b. CONTENIMENTO DEL CONSUMO DELLE RISORSE	Riscaldamento ambienti	Isolamento termico
		Efficienza impianto termico
		Impiego di energie rinnovabili o assimilate
		Sistemi passivi
	Raffrescamento ambienti	Controllo degli apporti termici solari
		Controllo dell'inerzia termica
		Ventilazione attraverso condotti interrati
		Impiego di energie rinnovabili o assimilate
		Efficienza dell'impianto di climatizzazione
		Sistemi passivi
	Ventilazione	Efficienza impianto di ventilazione meccanica
		Ventilazione naturale
		Sistemi passivi (effetto camino)
	Produzione di acqua calda sanitaria	Impiego di energie rinnovabili o assimilate
		Efficienza dell'impianto si produzione dell'acqua calda sanitaria
	Produzione di energia elettrica	Impiego di sistemi fotovoltaici
		Impiego di sistemi di cogenerazione

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO
		Contenimento consumi (illuminotecnica – LED, basso consumo)
	Acqua potabile	Minimizzazione uso acqua potabile
		Sistemi di recupero delle acque meteoriche e/o delle acque grigie
	Materiali da costruzione	Consumi energetici di produzione degli elementi tecnici
		Consumi energetici dei trasporti
c. RIDUZIONE DEI CARICHI AMBIENTALI	Emissioni inquinanti in atmosfera	Controllo emissioni impianti termici
	Effluenti	Gestione delle acque reflue
	Emissioni di rumore	Controllo rumori impianti
	Minimizzazione dei rifiuti da C&D in fase di costruzione	Valutazione delle potenzialità di riciclo dei materiali
		Valutazione separabilità dei componenti
	Gestione dei rifiuti da C&D in fase di costruzione	Demolizione selettiva
		Impiego materiali inerti
	Controllo dei flussi di rifiuti solidi urbani (RSU)	Riduzione quantità di RSU destinati alla discarica
	Materiali da costruzione	Effetti ambientali per produzione di elementi tecnici
d. QUALITÀ AMBIENTE INTERNO	Comfort visivo	Illuminazione naturale
		Vista verso l'esterno
		Penetrazione diretta della radiazione solare
		Uniformità di illuminamento
		Oscurabilità
		Illuminazione artificiale
		Privacy
	Comfort acustico	Isolamento acustico in facciata
		Fono-isolamento delle partizioni interne
		Fono-isolamento da calpestio
		Fono-isolamento da rumore di tipo continuo
		Fono-isolamento da rumore di tipo discontinuo
	Comfort termico	Temperatura dell'aria nel periodo invernale
		Temperatura superficiale interna nel periodo invernale
		Indice di surriscaldamento nel periodo estivo
	Qualità dell'aria	Aerazione
		Umidità delle pareti

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO
		Umidità relativa
		Velocità dell'aria
		Ricambi d'aria
		Estrazione dell'aria
		Controllo degli agenti inquinanti (VOC, Radon, CO_2)
	Inquinamento elettromagnetico	Campi elettromagnetici a bassa frequenza
		Campi elettromagnetici ad alta frequenza
e. QUALITÀ DEL SERVIZIO	Sicurezza ambientale	Rispetto della normativa antincendio
		Sicurezza elettrica
		Sicurezza strutturale
		Protezione contro il furto e le intrusioni
		Sicurezza all'uso
	Controllo dei sistemi impiantistici	Gestione impianti di riscaldamento e ventilazione
	Tecnologie e materiali durevoli nel tempo	Utilizzo di materiali e tecnologie della tradizione costruttiva locale
		Utilizzo di tecnologie innovative
	Flessibilità / Adattabilità	Adattabilità dei sistemi tecnici
		Flessibilità degli spazi
	Visitabilità (o accessibilità)	Assenza di barriere architettoniche
	Monitoraggio sistema edificio-impianto	Controllo dei consumi (domotica)
f. QUALITÀ DELLA GESTIONE	Manutenzione edilizia ed impiantistica	Riduzione dei rifiuti da manutenzione
		Protezione dell'involucro edilizio
		Accessibilità degli impianti

MATRICE DI CORRELAZIONE TRA INTERVENTI POSSIBILI, AREE DI SOSTENIBILITÀ E VINCOLI DELL'EDIFICIO

Nel caso dell'edilizia storica va sottolineato che lo scopo non è quello di ottenere un risparmio energetico misurabile attraverso i parametri di legge stabiliti per le nuove costruzioni, ma piuttosto quello di adottare delle soluzioni tecnologiche che permettano un uso più razionale delle risorse, sfruttando meglio le potenzialità del luogo e contenendo i consumi.

L'efficientamento energetico di un edificio comporta, inoltre, l'attuazione di interventi progettuali che non risultano sempre proponibili ed attuabili su un edificio storico. Si è ritenuto, quindi, opportuno valutare le azioni possibili considerandole in relazione alle classi di esigenza individuate e stimandone l'ammissibilità nel caso di edifici storici.

Tale valutazione tra interventi possibili e le classi di esigenza precedentemente individuate risulta schematizzata nella seguente tabella che riporta le azioni possibili, rispetto ai singoli componenti e le classi di esigenza soddisfatte con una prima valutazione circa l'ammissibilità dell'intervento proposto in relazione al contenitore esistente.

Tab. 3.3.2

Legenda - classi di esigenze:

a. Qualità ambientale esterna (qualità degli spazi esterni, controllo fonti di inquinamento esterno)
b. Contenimento del consumo delle risorse
c. Riduzione dei carichi ambientali
d. Qualità dell'ambiente interno
e. Qualità del servizio
f. Qualità della gestione

Legenda - compatibilità intervento su edificio storico

● Molto limitata

●● Limitata

●●● Discreta

●●●● Elevata

	CATEGORIE D'INTERVENTO	CLASSI ESIGENZE						AMMISSIBILITÀ SU EDIFICIO STORICO
		a	b	c	d	e	f	
INCREMENTO PRESTAZIONALE DELL'INVOLUCRO	**Chiusure verticali opache**							
	Intonaci termici							●● Particolare attenzione all'uso di materiali specifici
	Coibentazione termica con “isolamenti a cappotto”							● Valutare rispetto vincoli e morfologia dell'edificio
	Utilizzo di materiali termo-riflettenti							●● Valutare in relazione a vincoli e morfologia
	Chiusure verticali trasparenti							
	Sostituzione degli infissi esterni con modifica di materiale o di tipologia di infisso							●●●● A meno che gli infissi non debbano essere mantenuti
	Sostituzione del solo vetro con eventuale modifica parziale dell'infisso							●●●● Rispetto ai vincoli degli infissi esistenti
	Chiusure orizzontali e/o inclinate							
	Introduzione di strato di coibentazione termica o termo-acustica nei solai interpiano							●●● Valutare rispetto alle caratteristiche dell'edificio
	Introduzione di strato di coibentazione termica nel solaio di copertura							●●● Valutare rispetto alle caratteristiche dell'edificio e ai vincoli dell'elemento
	Creazione di intercapedine per la ventilazione naturale delle coperture							●●● Valutare rispetto alle caratteristiche dell'edificio e ai vincoli dell'elemento
	Introduzione di materiali (guaine, materiali isolanti) con faccia termo-riflettente nelle coperture							●●● Valutare rispetto alle caratteristiche dell'edificio e ai vincoli dell'elemento
	Introduzione di guaine impermeabilizzanti e/o barriere al vapore nelle coperture							●●●● Valutare rispetto vincoli e caratteristiche dell’edificio
	Chiusure orizzontali contro terra							
	Rifacimento del solaio con la creazione di un vespaio aerato (se questo non già presente) e l'introduzione di strato di coibentazione termica							●● Valutare rispetto alle caratteristiche dell'edificio
	Realizzazione di trincee di aerazione/ventilazione							●●● Valutare rispetto ai vincoli dell'edificio
	Realizzazione di un'intercapedine aerata al di sotto del pavimento (pavimento galleggiante)							●●● Valutare rispetto caratteristiche elemento
	Introduzione di un sistema di produzione di energia elettrica mediante impianto fotovoltaico integrato in							●●● Valutare rispetto alle

	CATEGORIE D'INTERVENTO	CLASSI ESIGENZE						AMMISSIBILITÀ SU EDIFICIO STORICO
		a	b	c	d	e	f	
TECNOLOGIE RINNOVABILI	falda		■	■		■	■	caratteristiche edificio e contesto; difficilmente integrabile in edifici storici
	Introduzione di un sistema di produzione di energia elettrica mediante piccoli parchi fotovoltaici disposti in aree esterne pertinenziali		■	■		■	■	●●●● In presenza di aree pertinenziali idonee
	Impianto di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria con l'utilizzo di impianto a pannelli solari termici	■	■	■		■	■	●●● Valutare rispetto alle caratteristiche dell'edificio e del contesto; difficilmente integrabile in edifici storici
	Produzione di energia mediante sonde geotermiche superficiali	■	■	■		■		●●● Valutare caratteristiche dell'edificio e del sito
	Produzione di energia mediante sonde geotermiche profonde	■	■	■		■		●●● Valutare caratteristiche dell'edificio e del sito
	Realizzazione di impianto per la produzione di energia eolica (mini-eolico)	■	■	■				●● Valutare caratteristiche dell'edificio e del sito
	Realizzazione di impianto per la produzione di energia idraulica (mini-idraulico)	■	■	■				●● Valutare caratteristiche dell'edificio e del sito
	Sfruttamento delle biomasse per produrre energia	■	■	■		■		●●● Valutare caratteristiche dell'edificio
	Creazione di un impianto di riscaldamento con caldaia a legna o a pellet	■	■	■			■	●●●● Valutare in base alle caratteristiche dell'edificio
EFFICIENZA ENERGETICA	Utilizzo della domotica per il controllo dell'ambiente indoor (illuminazione, condizioni climatiche) e controllo delle emissioni inquinanti (CO_2, u.r.)	■	■		■	■	■	●●●●
	Sostituzione delle lampade esistenti con lampade a basso consumo o LED		■		■	■	■	●●●●
	Miglioramento di apporto di luce naturale mediante sistemi di conduzione della luce solare quali il camino solare o sistemi con fibra ottica		■		■	■	■	● Valutare in base alle caratteristiche dell'edificio
	Introduzione di elementi speciali per migliorare l'efficienza termica attraverso tecnologie passive (muro trombe, serra solare, camini di captazione)	■	■	■			■	● Quasi mai attuabili in edifici storici vincolati
	Utilizzo di materiali a transizione di fase per produrre riscaldamento e raffrescamento passivo	■	■	■			■	●● Poco attuabile in relazione ai vincoli di un edificio storico

VALUTAZIONE PRESTAZIONALE DELLE TECNOLOGIE PER L'EFFICIENTAMENTO DELL'INVOLUCRO

Componente fondamentale per il contenimento delle dispersioni termiche al fine di garantire la qualità dell'ambiente e ridurre i consumi di risorse, è sicuramente l'involucro: elemento di chiusura e confine fisico tra interno ed esterno, ma anche ambito tematico su cui poter esprimere e valutare la qualità architettonica di un edificio.
Lavorare sull'involucro di un edificio esistente ne aumenta il grado di complessità. È necessario infatti definire precise strategie di intervento in grado di rispondere in modo adeguato alle caratteristiche ed ai vincoli dell'edificio stesso.
A partire dalle precedenti considerazioni riguardanti gli interventi di miglioramento prestazionale dell'involucro, si è scelto di procedere ad una scala più operativa, mediante schede di valutazione per le categorie d'intervento relative ad ogni componente dell'involucro. Gli interventi sono, così, messi in relazione con i singoli requisiti, precedentemente delineati e divisi per classi di esigenze, evidenziando il legame e l'ammissibilità di ogni azione rispetto ai requisiti richiesti.

Matrici di relazione interventi sull'involucro/requisiti

Tab. 3.3.3 - chiusure verticali opache

Tab. 3.3.4 - chiusure verticali trasparenti

Tab. 3.3.5 - chiusure orizzontali

Tab. 3.3.6 - chiusure inclinate

Tab. 3.3.7 - chiusure contro terra

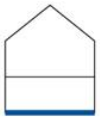
LEGENDA - simboli

Chiusure verticali opache

Chiusure verticali trasparenti

Chiusure orizzontali

Chiusure inclinate



Chiusure orizzontali contro terra

AMMISSIBILITÀ INTERVENTO SU EDIFICIO STORICO

●	Quasi mai ammissibile
●●	Proponibile in modo piuttosto limitato
●●●	Proponibile ma solo rispetto alle caratteristiche ed ai vincoli dell'edificio
●●●●	Ammissibile rispetto ai vincoli dell'edificio

CLASSI DI ESIGENZE

a. Qualità ambientale esterna

b. Contenimento del consumo delle risorse

c. Riduzione dei carichi ambientali

d. Qualità dell'ambiente interno

e. Qualità del servizio

f. Qualità della gestione

Tab. 3.3.3

	contenimento del consumo delle risorse				Qualità dell'ambiente interno								
	Riscaldamento ambienti		Raffrescamento ambienti		Comfort termico			Comfort acustico			Qualità dell'aria	
CHIUSURE VERTICALI OPACHE	ISOLAMENTO TERMICO	EFFICIENZA IMPIANTO TERMICO	CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA	EFFICIENZA IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE	TEMPERATURA DELL'ARIA (INVERNO)	TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA (INVERNO)	INDICE DI SURRISCALDAMENTO ESTIVO	ISOLAMENTO ACUSTICO IN FACCIATA	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE CONTINUO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE DISCONTINUO	UMIDITÀ DELLE PARETI	UMIDITÀ RELATIVA
intonaci termici												
coibentazione a "cappotto"												
Materiali termo-riflettenti												

GRADO DI RELAZIONE

Alto Medio Basso Praticamente nullo

Tab. 3.3.4

	Qualità ambiente esterno		Contenimento del consumo delle risorse				Qualità dell'ambiente interno											
	Comfort percettivo/ visivo		Riscaldamento ambienti		Raffrescamento ambienti		Comfort termico			Comfort acustico			Comfort visivo				Qualità dell'aria	
CHIUSURE VERTICALI TRASPARENTI	RICONOSCIBILITA' DEI CARATTERI DEL LUOGO	PROTEZIONE DEL VALORE CULTURALE DELL'OPERA	ISOLAMENTO TERMICO	EFFICIENZA IMPIANTO TERMICO	CONTROLLO DEGLI APPORTI TERMICI SOLARI	EFFICIENZA IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE	TEMPERATURA DELL'ARIA (INVERNO)	TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA (INVERNO)	INDICE DI SURRISCALDAMENTO ESTIVO	ISOLAMENTO ACUSTICO IN FACCIATA	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE CONTINUO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE DISCONTINUO	ILLUMINAZIONE NATURALE	VISTA VERSO L'ESTERNO	PENETRAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE DIRETTA	OSCURABILITA'	AERAZIONE	RICAMBI D'ARIA
Sostituzione degli infissi esterni																		
sostituzione del solo vetro con eventuale modifica parziale																		

GRADO DI RELAZIONE

Alto Medio Basso Praticamente nullo

Tab. 3.3.5

	contenimento del consumo delle risorse			Qualità dell'ambiente interno			
	Riscaldamento ambienti		Raffrescamento ambienti	Comfort termico		Comfort acustico	
CHIUSURE ORIZZONTALI	ISOLAMENTO TERMICO	EFFICIENZA IMPIANTO TERMICO	EFFICIENZA IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE	TEMPERATURA DELL'ARIA (INVERNO)	TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA (INVERNO)	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE CONTINUO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE DISCONTINUO
Strato di coibentazione termica o termo-acustica nei solai interpiano							

GRADO DI RELAZIONE

Alto Medio Basso Praticamente nullo

Tab. 3.3.6

	contenimento del consumo delle risorse				Qualità dell'ambiente interno					Qualità della gestione
	Riscaldamento ambienti		Raffrescamento ambienti		Comfort termico			Comfort acustico		Manutenzione edilizia
CHIUSURE INCLINATE	ISOLAMENTO TERMICO	EFFICIENZA IMPIANTO TERMICO	CONTROLLO DELL'INERZIA TERMICA	EFFICIENZA IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE	TEMPERATURA DELL'ARIA (INVERNO)	TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA (INVERNO)	INDICE DI SURRISCALDAMENTO ESTIVO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE CONTINUO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE DISCONTINUO	PROTEZIONE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO
introduzione di strato di coibentazione										
Creazione di intercapedine per la ventilazione naturale										
Introduzione di materiali con faccia termo-riflettente (guaine, isolanti)										
Introduzione di guaine impermeabilizzanti e/o barriere al vapore										

GRADO DI RELAZIONE

Alto Medio Basso Praticamente nullo

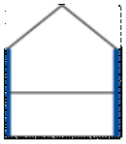
Tab. 3.3.7

	contenimento del consumo delle risorse				Qualità dell'ambiente interno					Qualità della gestione
	Riscaldamento ambienti		Raffrescamento ambienti		Comfort termico			Comfort acustico		Manutenzione edilizia
CHIUSURE CONTRO TERRA	ISOLAMENTO TERMICO	EFFICIENZA IMPIANTO TERMICO	VENTILAZIONE ATTRAVERSO CONDOTTI INTERRATI	EFFICIENZA IMPIANTO CLIMATIZZAZIONE	TEMPERATURA DELL'ARIA (INVERNO)	TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA (INVERNO)	INDICE DI SURRISCALDAMENTO ESTIVO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE CONTINUO	FONO-ISOLAMENTO DA RUMORE DISCONTINUO	PROTEZIONE DELL'INVOLUCRO EDILIZIO
Vespaio aerato e coibentazione termica										
Trincee di aerazione / ventilazione										
Intercapedine aerata al di sotto del pavimento (pavimento galleggiante, flottante)										

GRADO DI RELAZIONE

Alto Medio Basso Praticamente nullo

Schede di valutazione interventi – requisiti

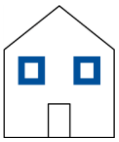
INCREMENTO PRESTAZIONALE INVOLUCRO		CHIUSURE VERTICALI OPACHE
INTONACI TERMICI	●●	
COIBENTAZIONE TERMICA "A CAPPOTTO"	●	
MATERIALI TERMO-RIFLETTENTI	●●	

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
CONTENIMENTO DEL CONSUMO DELLE RISORSE	Riscaldamento ambientale	**Isolamento termico**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - trasmittanza - conduttanza - escursioni termiche - verifica termo-igrometrica
		Efficienza impianto termico	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - rendimento di produzione - rendimento di distribuzione - rendimento di emissione - rendimento di regolazione
	Raffrescamento ambientale	**Controllo dell'inerzia termica**		- coefficiente di sfasamento medio (variazione della temperatura dell'aria interna in relazione alla temperatura esterna in un arco di tempo giornaliero)
		Efficienza impianto climatizzazione	- PPD (Percentage People Dissatisfied) - efficienza dell'impianto in base alla destinazione d'uso dell'edificio	- temperatura

Riferimenti normativi		
	Isolamento termico: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 6946 **Efficienza impianto termico**: L. 10 del 10/01/199, suoi decreti attuativi e norme UNI collegate **Inerzia termica**: UNI 10349: 1994/CE; UNI 10375	U limite = **0,34 W/m^{2}K** (dal 01/01/2010) Coefficiente di sfasamento medio delle chiusure opache **≥ 8 h**

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELL'AMBIENTE INTERNO	Comfort termico	**Temperatura dell'aria nel periodo invernale**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria negli spazi fruiti (20°-22° C) - trasmittanza termica - permeabilità all'aria
		Temperatura superficiale interna (inverno)	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura superficiale (al massimo inferiore di 3° C rispetto alla temperatura dell'aria) - trasmittanza termica - permeabilità all'aria
		Indice di surriscaldamento estivo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria nel periodo giugno/settembre (24°-28° C per almeno il 90% del tempo di occupazione) - temperatura dell'aria in ambienti non condizionati
	Comfort acustico	**Isolamento acustico in facciata**		- indice di valutazione dell'isolamento acustico in facciata normalizzato rispetto ad un tempo di riverberazione
		Fono-isolamento da rumore continuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow
		Fono-isolamento da rumore discontinuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A
	Qualità dell'aria	**Umidità delle pareti**		valore di umidità di parete
		Umidità relativa		U.R. (<70%)

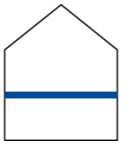
Riferimenti normativi	**Comfort termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 7730; UNI EN 27726 **Comfort acustico**: DPCM 5/12/97 **Qualità dell'aria**: UNI 10350, UNI EN ISO 7730	- Livello di pressione sonora ponderato A **< 35 dB(A)** - Indice valutazione isolamento acustico in facciata **≥ 42 dB**

INCREMENTO PRESTAZIONALE INVOLUCRO			**CHIUSURE VERTICALI TRASPARENTI** 
SOSTITUZIONE INFISSI ESTERNI CON MODIFICA DEL MATERIALE O DELLA TIPOLOGIA DI INFISSO		●●●●	
SOSTITUZIONE DEL VETRO CON EVENTUALE MODIFICA PARZIALE DELL'INFISSO		●●●●	
CLASSE DI	**CLASSE DI**	**REQUISITO**	
QUALITÀ DELL'AMBIENTE ESTERNO	**Comfort percettivo – visivo / integrazione con il contesto**	**Riconoscibilità dei caratteri del luogo**	- Analisi dei caratteri percettivi, prima e dopo l'intervento - Permanenza di caratteri del contesto
		Protezione del valore culturale	- Compatibilità / confronto di caratteristiche tecnico-costruttive e materiali di progetto con il contesto - Simulazione visiva degli effetti dell'intervento
CONTENIMENTO DEL CONSUMO DELLE RISORSE	**Riscaldamento ambientale**	**Isolamento termico**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - trasmittanza - conduttanza - escursioni termiche - verifica termo-igrometrica
		Efficienza impianto termico	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - rendimento di produzione - rendimento di distribuzione - rendimento di emissione - rendimento di regolazione
	Raffrescamento ambientale	**Controllo degli apporti termici solari**		- coefficiente di trasmissione solare - decremento dell'irradianza solare attraverso una chiusura trasparente
		Efficienza impianto climatizzazione	- PPD (Percentage People Dissatisfied) - efficienza dell'impianto in base alla destinazione d'uso dell'edificio	- temperatura

Riferimenti normativi	**Controllo degli apporti termici solari**: UNI 10349:1994/ce **Isolamento termico**: 2002/91/CE; D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009; UNI EN ISO 6946 **Efficienza impianto termico**: L. 10 del 10/01/199, suoi decreti attuativi e norme UNI collegate	Coefficiente di trasmissione solare medio per edifici non residenziali: - 0,6 elemento vetrato - 0,5 intera chiusura

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELL'AMBIENTE INTERNO	Comfort termico	**Temperatura dell'aria nel periodo invernale**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria negli spazi fruiti (20°-22° C) - trasmittanza termica - permeabilità all'aria
		Temperatura superficiale interna (inverno)	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura superficiale (al massimo inferiore di 3° C rispetto alla temperatura dell'aria) - trasmittanza termica - permeabilità all'aria
		Indice di surriscaldamento estivo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria nel periodo giugno/settembre (24°-28° C per almeno il 90% del tempo di occupazione) - temperatura dell'aria in ambienti non condizionati
	Comfort acustico	**Isolamento acustico in facciata**		- indice di valutazione dell'isolamento acustico in facciata normalizzato rispetto ad un tempo di riverberazione
		Fono-isolamento da rumore continuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow
		Fono-isolamento da rumore discontinuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A

	Comfort visivo	**Illuminazione naturale**		- fattore medio di luce diurna
		Vista verso l'esterno		- rapporto Area finestra/Area parete (A) in funzione della profondità dell'ambiente (P): A=20% →P<8m A=25% →P=8-11m A=30% →P=11-14 m A=35% →P>14m
		Penetrazione della radiazione solare diretta	Garantire la penetrazione della radiazione solare diretta negli ambienti interni	Angolo di incidenza della radiazione solare sulla finestra
		Oscurabilità	Garantire complete oscuramento degli ambienti interni (presenza di schermi oscuranti)	Misura in opera dell'illuminamento interno
	Qualità dell'aria	**Aerazione**	Portata d'aria di ricambio adeguata tramite la ventilazione naturale	- portata d'aria di ricambio - consumi energetici per la climatizzazione
		Ricambi d'aria		- numero di ricambi d'aria per unità di tempo
Riferimenti normativi	**Comfort termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 7730; UNI EN 27726 **Comfort acustico**: DPCM 5/12/97 **Comfort visivo**: D.M. San. 5/07/1975 circolare Min. LLPP.n.3151 del 22/05/1967			- Livello di pressione sonora ponderato A **< 35 dB(A)** - Indice valutazione isolamento acustico in facciata **≥ 42 dB** - Fattore medio luce diurna: **1%** - Rapporto Area finestra/Area parete (A) rispetto alla profondità dell'ambiente (P): A=20% →P<8m A=25% →P=8-11m A=30% →P=11-14 m A=35% →P>14m

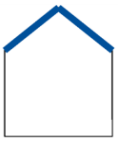
INCREMENTO PRESTAZIONALE INVOLUCRO			**CHIUSURE ORIZZONTALI** 
STRATO DI COIBENTAZIONE TERMO-ACUSTICA NEI SOLAI	●●●		

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
CONTENIMENTO DEL CONSUMO DELLE RISORSE	**Riscaldamento ambientale**	**Isolamento termico**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - trasmittanza - conduttanza - escursioni termiche - verifica termo-igrometrica
		Efficienza impianto termico	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - rendimento di produzione - rendimento di distribuzione - rendimento di emissione - rendimento di regolazione
	Raffrescamento ambientale	**Efficienza impianto climatizzazione**	- PPD (Percentage People Dissatisfied) - efficienza dell'impianto in base alla destinazione d'uso dell'edificio	- temperatura

Riferimenti normativi	**Isolamento termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 6946 **Efficienza impianto termico**: L. 10 del 10/01/199, suoi decreti attuativi e norme UNI collegate **Inerzia termica**: UNI 10349: 1994/CE; UNI 10375	U limite = **0,33W/m^{2}K** (dal 01/01/2010)

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELL'AMBIENTE INTERNO	Comfort termico	**Temperatura dell'aria nel periodo invernale**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria negli spazi fruiti (20°-22° C) - trasmittanza termica - permeabilità all'aria
		Temperatura superficiale interna (inverno)	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura superficiale (al massimo inferiore di 3° C rispetto alla temperatura dell'aria) - trasmittanza termica - permeabilità all'aria
	Comfort acustico	**Fono-isolamento da rumore continuo**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow
		Fono-isolamento da rumore discontinuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A

Riferimenti normativi	**Comfort termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 7730; UNI EN 27726 Comfort acustico: DPCM 5/12/97	Livello di pressione sonora ponderato A **< 35 dB(A)**

INCREMENTO PRESTAZIONALE INVOLUCRO		CHIUSURE INCLINATE
STRATO DI COIBENTAZIONE	●●●	
INTERCAPEDINE DI VENTILAZIONE	●●●	
MATERIALI TERMO-RIFLETTENTI	●●●	
GUAINE IMPERMEABILIZZANTI E/O BARRIERE AL VAPORE	●●●●	

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
CONTENIMENTO DEL CONSUMO DELLE RISORSE	Riscaldamento ambientale	**Isolamento termico**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - trasmittanza - conduttanza termica - escursioni termiche - verifica termo-igrometrica
		Efficienza impianto termico	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - rendimento di produzione - rendimento di distribuzione - rendimento di emissione - rendimento di regolazione
	Raffrescamento ambientale	**Controllo dell'inerzia termica**		- coefficiente di sfasamento medio (variazione della temperatura dell'aria interna in relazione a quella esterna in un arco di tempo giornaliero)
		Efficienza impianto climatizzazione	- PPD (Percentage People Dissatisfied) - efficienza dell'impianto in base alla destinazione d'uso	- temperatura

Riferimenti normativi	**Isolamento termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 6946	U limite = **0,3 W/m^{2}K** (dal 01/01/2010) Coefficiente di sfasamento medio

	Efficienza impianto termico: L. 10 del 10/01/199, suoi decreti attuativi e norme UNI collegate **Inerzia termica**: UNI 10349: 1994/CE; UNI 10375	delle chiusure opache **≥ 8 ore**

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELL'AMBIENTE INTERNO	**Comfort termico**	**Temperatura dell'aria nel periodo invernale**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria negli spazi fruiti (20°-22° C) - trasmittanza termica
		Temperatura superficiale interna (inverno)	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura superficiale (al massimo inferiore di 3° C rispetto alla temperatura dell'aria) - trasmittanza - permeabilità all'aria
		Indice di surriscaldamento estivo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria nel periodo giugno/settembre (24°-28° C per almeno il 90% del tempo di occupazione) - temperatura aria in ambienti non condizionati
	Comfort acustico	**Fono-isolamento da rumore continuo**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow
		Fono-isolamento da rumore discontinuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A

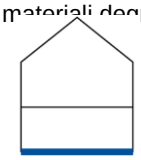
Riferimenti normativi	**Comfort termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 7730; UNI EN 27726 **Comfort acustico:** DPCM 5/12/97	Livello di pressione sonora ponderato A **< 35 dB(A)**

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELLA GESTIONE	**Manutenzione edilizia**	**Protezione dell'involucro edilizio**	- presenza elementi di protezione - verifica	- umidità interstiziale - analisi chimiche e mineralogiche dei

INCREMENTO PRESTAZIONALE INVOLUCRO	
VESPAIO AERATO E COIBENTAZIONE TERMICA	●●
TRINCEE DI AERAZIONE / VENTILAZIONE	●●●
INTERCAPEDINE AERATA AL DI SOTTO DEL PAVIMENTO	●●●
Riferimenti normativi	

CHIUSURE ORIZZONTALI CONTROTERRA

materiali degradati



componenti

ali e enti

al contesto

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
CONTENIMENTO DEL CONSUMO DELLE RISORSE	Riscaldamento ambientale	**Isolamento termico**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - trasmittanza termica parete - conduttanza termica - escursioni termiche - verifica termo-igrometrica
		Efficienza impianto termico	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura - rendimento di produzione - rendimento di distribuzione - rendimento di emissione - rendimento di regolazione
	Raffrescamento ambientale	**Ventilazione attraverso condotti interrati**	- realizzare tubazioni interrate per il passaggio dell'aria - riduzione del carico di raffrescamento tramite ventilazione da condotti interrati	Temperatura dell'aria in uscita dai condotti interrati
		Efficienza impianto climatizzazione	- PPD (Percentage People Dissatisfied) - efficienza dell'impianto in base alla destinazione d'uso dell'edificio	- temperatura

Riferimenti normativi	**Isolamento termico**: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 6946 **Efficienza impianto termico**: L. 10 del 10/01/199, suoi decreti attuativi e norme UNI collegate **Raffrescamento ambienti**: UNI 10349: 1994/CE	U limite = **0,33 W/m^{2}K** (dal 01/01/2010)

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELL'AMBIENTE INTERNO	Comfort termico	**Temperatura dell'aria nel periodo invernale**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria negli spazi fruiti (20°-22° C) - trasmittanza - permeabilità all'aria
		Temperatura superficiale interna (inverno)	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura superficiale (al massimo inferiore di 3° C rispetto alla temperatura dell'aria) - trasmittanza - permeabilità all'aria
		Indice di surriscaldamento estivo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- temperatura dell'aria nel periodo giugno/settembre (24°-28° C per almeno il 90% del tempo di occupazione) - temperatura dell'aria in ambienti non condizionati
	Comfort acustico	**Fono-isolamento da rumore continuo**	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow
		Fono-isolamento da rumore discontinuo	- PPD (Percentage People Dissatisfied)	- livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A

Riferimenti normativi		
	Comfort termico: 2002/91/CE D.Lgs 311/2006; D.P.R. 59/2009 UNI EN ISO 7730; UNI EN 27726 **Comfort acustico:** DPCM 5/12/97	Livello di pressione sonora ponderato A **< 35 dB(A)**

CLASSE DI ESIGENZE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITO	INDICATORE DI CONTROLLO	
			Qualitativo	Quantitativo
QUALITÀ DELLA GESTIONE	Manutenzione edilizia	**Protezione dell'involucro edilizio**	- presenza di elementi di protezione - verifica accessibilità - uso di materiali e tecnologie coerenti al contesto climatico	- umidità interstiziale - analisi chimiche e mineralogiche dei materiali degradati

Riferimenti normativi		

3.4 ASSESSMENT FUNZIONALE

LETTURA METAPROGETTUALE: IL CONCETTO DI QUALITÀ

La scelta e la determinazione dell'inserimento di una nuova funzione su un contenitore esistente porta con sé un ulteriore livello di complessità dettato sia dai vincoli propri della fabbrica sia dalla rispondenza al quadro esigenziale dell'utente.
Al fine di comprendere una modalità generale di azione, è possibile procedere attraverso l'articolazione metaprogettuale al problema e, dunque, alla definizione di un quadro di esigenze espresse dall'utenza, che vanno progressivamente a definire una strutturazione in requisiti e prestazioni oggettive e misurabili.
In termini ancora più generali, tale impostazione metodologica si basa sul concetto stesso di controllo della qualità del progetto, intendendo essa stessa come la misura del grado di rispondenza dei requisiti alla prestazioni del progetto.
Al fine di poter meglio delineare i requisiti del progetto rispettoso sia della nuova funzione sia della fabbrica esistente, può risultare utile attenersi alla definizione e articolazione del concetto di qualità in:

- funzionale/spaziale: intesa come fruibilità, adeguatezza e sicurezza degli spazi
- ambientale: requisiti di benessere
- tecnologica: requisiti tecnologici di durabilità, manutenibilità e sicurezza all'uso

Così come verrà successivamente illustrato nel proseguo della trattazione.

DEFINIZIONE DELLE ESIGENZE AI FINI DELLA CONSERVAZIONE

Una volta stabilito quali siano le caratteristiche specifiche della fabbrica (cfr cap. 3.2) e definite le classi di esigenza per la sostenibilità in termini generali (cfr cap. 3.3), risulta necessario confrontare le soluzioni possibili per l'esistente con una specifica destinazione d'uso.

Quest'ultima deve essere verificata e validata sulla base dell'analisi degli impatti che la nuova funzione avrà sul contenitore. Risulta chiaro, dunque, che tale valutazione debba essere svolta, caso per caso, nel rispetto delle specificità dell'esistente.

Nel caso specifico si farà riferimento, nella determinazione degli impatti, alla simulazione rispetto al caso di studio della Villa della funzione museale. Al fine però, di non rendere limitativo tale analisi, è possibile procedere con un metodo esportabile, ricorrerendo a schematizzazioni riferibili ad una casistica più ampia, in cui prevedere l'ambito di interesse della soluzione proposta (chiusure verticali esterne, chiusure orizzontali esterne, etc.) attraverso l'elaborazione di dettagli costruttivi in grado di illustrare le tecnologie costruttive impiegabili e le azioni da mettere in atto.

In particolare, a titolo esemplificativo del metodo proposto, si è scelto di approfondire lo studio delle coperture, rispetto al quale, nella sezione ad esso dedicata, si riporta lo schema impiegato e le ragioni legate alle scelta delle soluzioni progettuali.

Inoltre, nel capitolo riguardante la *Linea 3*, sono, quindi, valutati gli interventi qui proposti su un modello del caso di studio, in modo da verificare il miglioramento in ambito energetico dell'edificio, nonché monitorarne il funzionamento.

Il caso di studio su cui si incentra la ricerca è il primo piano nobile dell''ala sud della Villa Reale di Monza (cfr cap. 1.2-1.3). I locali della reggia saranno impiegati soprattutto a mostre permanenti e temporanee, ma anche a sale per convegni, uffici, e rappresentanza di ministeri ed eventi internazionali quali l'Expo 2015.

Di primaria importanza risulta essere, attualmente, la mostra sulla regina Margherita, prevista per il mese di Febbraio 2012. L'esposizione sarà organizzata proprio al primo

piano nobile dell'ala sud della reggia, ossia nei locali che hanno già subito operazioni di restauro e che sono, quindi, reputate idonee per accogliere un evento di questo tipo. Tuttavia esistono delle criticità e delle situazioni di degrado attivo dei materiali (cfr *Linea 1*), nonché il problema del dispendio di energia e la conseguente necessità di aumentare l'efficienza energetica dell'edificio.

È per questo che, per l'elaborazione della fase progettuale di questa ricerca, si è presa in considerazione la destinazione d'uso espositiva dell'opera, senza tuttavia tralasciare eventuali cambiamenti futuri di destinazione ed operando, così, secondo una logica di adattabilità e reversibilità degli interventi proposti.

Sui parametri microclimatici ambientali di tali locali, svolge un'importante influenza la conservazione preventiva, intesa come l'insieme dei comportamenti e delle precauzioni tecniche, da mettere in atto con continuità, volti a prevenire i danni e a rallentare il degrado evitandone anche l'insorgere.

La cura deve avvenire sul manufatto architettonico, ma anche sulle collezioni in esso contenute, che, a seconda del tipo materiale e dello stato in cui vertono, possiedono differenti esigenze microclimatiche.

È, dunque, opportuno considerare le principali minacce ambientali che possono mettere a rischio la conservazione, nonché i parametri termo-igrometrici indicati da prescrizioni e normative di riferimento. Le condizioni dell'edificio e dei suoi impianti sono importanti quanto le procedure di pulizia o di manutenzione programmata delle sale in cui sono custoditi gli oggetti in esposizione. È, però, evidente che si devono definire le problematiche principali da affrontare, in modo da comprendere i fattori potenzialmente più dannosi.
A questo proposito si deve far riferimento ai contenuti elaborati nell'ambito della *Linea 1* (cfr cap.2), andando a definire, sulla base della caratterizzazione materica, il degrado eventualmente riscontrato, nonché un'analisi dei rischi potenziali per i manufatti presi in esame.
Il risparmio energetico, infatti, non deve impedire la corretta conservazione dei materiali, bensì favorirla mediante mezzi più efficienti e funzionali in base al contesto.
In particolare, negli ambienti museali ed espositivi, è di grande rilevanza tecnica il controllo della qualità dell'aria. Questo deriva dal settore igienico, ma controllare la qualità dell'aria non significa soltanto contenere la concentrazione di inquinanti, ma soprattutto conoscere il danno che ciascun inquinante può produrre sul singolo oggetto presente ed esposto (scolorimenti, corrosione, attacchi acidi…). Concentrazioni del tutto inferiori a quelle dannose per la salute umana, possono provocare danni irreversibili al patrimonio storico ed artistico, costringendo i restauratori a mettere in atto costosi interventi di restauro. È a questo proposito che le analisi e gli studi svolti nell'ambito della *Linea 1* assumono grande importanza e permettono di capire quali condizioni microclimatiche e quale tipo di impiantistica e/o interventi risultino adeguati all'ambiente riscontrabile nell'ala sud della Villa Reale.
Si è ritenuto opportuno riportare di seguito una tabella che riassume l'analisi dei rischi sulla base della destinazione d'uso di riferimento (tab. 3.5.1).

Dall'analisi si evince che la Conservazione Preventiva, intesa come un insieme globale di interventi tecnici ed attività volte a migliorare lo stato conservativo dei beni siti nel luogo, nonché dell'ambiente circostante che li ospita, attraverso la gestione e la pianificazione delle risorse materiali, umane e temporali a disposizione, deve avvenire tramite ripetute azioni programmate a basso costo, che risultano anche meno invasivi nei confronti dell'opera rispetto ai grandi interventi di restauro.

Tab. 3.4.1 - Analisi dei rischi in base alla destinazione d’uso espositiva

Minaccia	Sorgente	Danno	Cause frequenti	Azione preventiva
UMIDITA' RELATIVA	umidità relativa troppo alta o troppo bassa	muffe, corrosione, infragilimento	cambiamento meteorologico/ climatico	monitoraggio termoigrometrico
			presenza di condensa, infiltrazioni d'acqua	introdurre sistemi di controllo attivo e passivo dell'umidità relativa
	rapide variazioni di umidità relativa	fessurazione, raggrinzimento, deformazione	ventilazione inadeguata, pulizia ad umido dei pavimenti	migliorare la ventilazione
			presenza di condensa superficiale, provenienza di umidità dal suolo	intervenire sull'involucro edilizio
TEMPERATURA	temperatura elevata o bassa	aumento del degrado; infragilimento	riscaldamento o controllo e regolazione della temperatura inadeguati	monitoraggio microclimatico, migliorare sistemi di regolazione della temperatura
			cambiamenti climatici	
	rapide variazioni di temperatura	fessurazione, raggrinzimento, deformazione	illuminazione	sistema di illuminazione a bassa dissipazione di energia
			isolamento termico insufficiente	migliorare l'isolamento
			regolazione del riscaldamento insufficiente	controllare la temperatura con sistemi di condizionamento o migliorare la regolazione del riscaldamento
LUCE	luce intensa, luce a lunghezza d'onda corta (ultravioletto)	fading, decolorazione, infragilimento, distruzione	luce naturale ed artificiale non dosata, oggetti in posizione errata, sorgenti di luce artificiale non appropriate, mancanza di filtri e tendaggi	misurare l'intensità della luce ed il livelo di ultravioletti, inserire filtri e tengarggi, ridurre l'illuminamento in fase di esposizione

Minaccia	Sorgente	Danno	Cause frequenti	Azione preventiva
INFESTAZIONI	uccelli	imbrattamento degli oggetti	fori e passaggi nell'involucro dell'edificio	curare manutenzione dell'involucro
	roditori	oggetti rosi o divorati	materiali attrattivi o cibo nei materiali esposti	inserire trappole
	insetti lepidotteri, tarme, scarafaggi	oggetti imbrattati, rosi, danneggiati in superficie	pulizia insufficiente, mancato controllo delle acquisizioni	isolare gli oggetti infestati, ispezionare le acquisizioni
	muffe	danneggiamento superficiale	umidità relativa elevata	evitare formazione di aree umide, mantenere i magazzini al freddo e isolarli, ispezionare frequentemente ed etichettare i materiali a rischio
	funghi			
INQUINANTI	areiformi, acidi, particolati, sporco, polvere	degrado dei materiali	prossimità alle strade	pulizia regolare di aree espositive e magazzini, moitoraggio ambientale, griglie o bussole per l'ingresso del pubblico, tappeti vinilici per il trattenimento delle polveri
			mancanza di filtrazione dell'aria	uso degli apparecchi di filtrazione
			chiusura inadeguata di porte e finestre, manutenzione inadeguata	curare la manutenzione dell'edificio
			uso di prodotti chimici usualmente non presente in ambiente	ustilizzare materiali e procedure approvati
			visitatori	ridurre il contatto con gli oggetti
			immagazzinamento inadeguato	imballare gli oggetti nei depositi
	materiali utilizzati per i depositi e gli elementi di esposizione	decolorazione, corrosione, danneggiamento fisico		usare solo materiali approvati e testati per una determinata applicazione, se possibile testare i materiali conosciuti, sigillare, ricoprire o ventilare per mitigare i possibili effetti dannosi

Minaccia	Sorgente	Danno	Cause frequenti	Azione preventiva
DISASTRI	inondazioni	ruggine, dissolvimenti di inchiostri e pigmenti, muffe, deformazioni, impregnazione, aumento di volume, disintegrazione	inondazioni esterne, perdite da tubazioni, infiltrazioni dal tetto, impianto antincendio	formulare un "Disaster Plan" che includa le procedure di manutenzione e i controlli di manutenzione interni ed esterni; addestrare, controllare e motivare il personale
	incendi	bruciature, incinerazione, deposito chimico	guasti elettrici, fulmini, cause accidentali e dolo	
PERSONE	addetti, intrusi	rotture, abrasioni, furti	manipolazioni non necessarie o indebite, manipolazioni non corrette	istruire gli addetti, protezione adeguata contro le intrusioni (sistemi antifurto)
	visitatori	degrado dei materiali, rotture, abrasioni, furti	aumento di temperatura, inquinanti, grado igrometrico, manipolazioni indebite degli oggetti esposti	ottimizzare la gestione dei flussi e del percorso di visita, prevenire la possibilità che i visitatori tocchino gli oggetti

Una prima causa di inquinanti è l'ambiente esterno, come il traffico delle aree urbane, l'inquinamento industriale e la presenza di fumi e particolato; alle fonti esogene si aggiungono le sorgenti interne, dovute ai materiali edilizi ed agli arredi (collanti, vernici, pareti umide) e soprattutto ai visitatori, al personale ed alla gestione delle varie attività che si svolgono normalmente in un edificio espositivo (metabolismo degli occupanti, processi di combustione, igiene personale, pulizia dei locali). Ovviamente a ciò si sommano le emissioni contaminanti degli impianti.

Gli effetti che gli inquinanti hanno sui materiali sono funzione della temperatura e dell'umidità relativa: la reattività chimica e la velocità di attacco degli inquinanti risultano fortemente condizionate dai valori di U.R. superiori a 45%-50% e dalla presenza di vapore acqueo in prossimità della superficie degli oggetti.

Una delle maggiori fonti di inquinamento è l'anidride carbonica (CO_2), legata soprattutto alla presenza di visitatori ed, eventualmente, ai processi di combustione. La quantità di CO_2 rilasciata dal corpo umano dipende dal livello di metabolismo energetico e varia al variare dell'attività fisica, dell'età, del sesso e della massa corporea. Per concentrazioni al di sotto di 10.000-15.000 ppm, l'anidride carbonica non risulta tossica, ma il valore massimo ammissibile è posto a 5.000 ppm. Essa, inoltre, in presenza di acqua reagisce con il carbonato di calcio presente in materiali quali pietre calcaree ed intonaci (affreschi). Eventuali concentrazioni elevate di CO_2 vanno ridotte con la rimozione o la riduzione delle fonti (molto difficile nel caso di visitatori), o intervenendo sulla ventilazione.

Non è da trascurare, poi, il particolato aerodisperso, ossia il materiale particellare disperso nell'aria, che deriva esternamente da tutte le principali fonti di inquinamento atmosferico ed internamente dalla combustione e dalle attività antropiche, oltre che

dagli arredi e da tutti quei materiali che, con il degrado, si scompongono in polvere o perdono microfibre. La pericolosità del particolato per gli uomini è dovuta alla sua capacità di adsorbire gas e vapori tossici sulle superfici delle particelle, contribuendo ad aumentare le concentrazioni di inquinanti atmosferici. Il materiale particellare ha, poi, spiccate capacità catalitiche e, in particolari situazioni, può dar luogo a formazione di acidi. L'aumento della presenza di particolato avviene durante le ore di apertura al pubblico ed è imputato alla presenza di visitatori, ma anche al funzionamento di impianti di riscaldamento, condizionamento e deumidificazione. Infine, va tenuto in considerazione che le particelle minerali generalmente presenti nella polvere possono diventare chimicamente attive, soprattutto in presenza di acqua e, poiché possono contenere uova di insetti, spore di miceti e di batteri, con le condizioni termo igrometriche adeguate (temperatura compresa tra 20°-30° C ed umidità superiore al 65%), possono favorire lo sviluppo degli agenti di degrado biologico.

Si è ritenuto corretto riportare l'elenco dei maggiori danni indotti dagli inquinanti sui materiali maggiormente riscontrabili nei locali dell'edificio di riferimento (tab. 3.5.2). Nella tabella sottostante appaiono anche tipi di inquinanti che non sono stati presi in considerazione in modo dettagliato, dato che non risultano tema principale della ricerca, si è ritenuto, tuttavia, corretto citarli e non rischiare superficialità o parvenza di errore, mancando di inserirli come elementi che possono compromettere la qualità dell'aria.

Tab. 3.4.2 - Danni indotti dalla presenza di inquinanti e altri fattori ambientali nei materiali

Materiale	Tipo di danno	Inquinanti	Altri fattori ambientali
metalli	corrosione, opacizzazione	ossidi di zolfo e azoto, solfuro di idrogeno, cloruri, particolato, ozono	umidità
tessuti (tappezzerie)	riduzione resistenza meccanica, insudiciamento	ossidi di zolfo e azoto, ozono, particolato	umidità, luce, uso, lavaggio
pitture	scolorimento, insudiciamento	ossidi di zolfo, solfuri di idrogeno, aerosol alcalini, ozono, radiazione solare, particolato, microrganismi	umidità, radiazione solare
pietra, marmo, intonaco	deterioramento, imbrattamento, sgretolamento	ossido di zolfo, acido nitrico, ossidi di azoto, particolato	umidità
affreschi	sgretolamento	acido solforico, acido di zolfo	umidità, radiazione solare
legno, mobili di legno	infragilimento	ozono	umidità, luce, radiazione solare

L'ambito VI del D.M. 10/05/2001 (MM.BB.CC. 2001) prescrive gli intervalli di valori dei parametri ambientali per la conservazione di diverse categorie di opere esposte, riprendendo in parte quanto previsto dalla norma UNI 10829 (Luglio 1999):

- valori termo-igrometrici
- valori raccomandati di concentrazione degli inquinanti aerodispersi
- valori di esposizione a fonti luminose
- uniformità di illuminamento
- esposizione energetica di luce annuale e si componente UV e radianza totale
- controllo di luce naturale.

Qui di seguito, nello schema 3.5.3 si riportano gli intervalli di valori delle variabili termo-igrometriche indicati come ottimali a seconda del materiale. Sono riportati solamente i materiali presenti nei locali della reggia di Monza in cui si prevede l'applicazione dell'intervento ed alcuni eventuali materiali che potrebbero essere qui esposti.

Tab. 3.4.3 - Parametri termo-igrometrici ottimali per materiale, fonti: UNI 1999 e Ministero dei Beni Culturali

Materiale	Fonte	UR (%)	$\Delta(UR)_{max}$	t (°C)	Δt_{max} (°C)
bronzo	MM.BB.CC. 2001	**< 55**			
	UNI 1999	**< 50**			
marmi e pietre	MM.BB.CC. 2001	**45-60**		**≤30**	
	UNI 1999	**20-60**	**±10**	**15-25**	
legno	MM.BB.CC. 2001	**40-65**		**19-24**	
	UNI 1999	**45-60**	**±4**	**19-24**	**±1,5**
legno dipinto	MM.BB.CC. 2001	**45-65**		**19-24**	
	UNI 1999	**50-60**	**±4**	**19-24**	**±1,5**
metalli e leghe levigati, ottone, argento, peltro, piombo, rame	MM.BB.CC. 2001	**< 45**			
	UNI 1999	**< 50**			
mobili con intarsi e lacche, lacche orientali	MM.BB.CC. 2001	**50-60**		**19-24**	
	UNI 1999	**50-60**	**±4**	**19-24**	**±1,5**
pitture su tela	MM.BB.CC. 2001	**35-60**		**19-24**	
	UNI 1999	**40-55**	**±6**	**19-24**	**±1,5**
seta	MM.BB.CC. 2001	**50-60**		**19-24**	
	UNI 1999	**30-50**	**±6**	**19-24**	**±1,5**
porcellane, ceramiche, terracotta	MM.BB.CC. 2001	**20-60**			
	UNI 1999	non rilevante	**±10**	non rilevante	non rilevante
tessuti, tappeti, arazzi, tappezzeria in sotffa	MM.BB.CC. 2001	**40-60**			
	UNI 1999	**30-50**	**±6**	**19-24**	**±1,5**
acquerelli, disegni, pastelli, stampe	MM.BB.CC. 2001	**50-60**		**19-24**	
	UNI 1999	**45-60**	**±2**	**19-24**	**±1,5**
libri e manoscritti	MM.BB.CC. 2001	**50-60**		**19-24**	
	UNI 1999	**50-60**	**±5**	**13-18**	**±1,5**

Sempre in riferimento alla norma UNI 10829 (Luglio 1999), si prescrivono anche i valori di illuminazione opportuni ai fini della conservazione dei beni storico-artistici. In particolare devono essere valutati i seguenti parametri:

- il massimo valore di Illuminamento (E), che, misurato in lux, esprime il rapporto tra il flusso luminoso irradiato e la superficie illuminata

- la quantità di radiazione ultravioletta massima (UV_{max})
- la dose di luce annuale massima, ossia la massima quantità di luce che l'oggetto può ricevere nell'arco di un anno (LO_{max}).

Tab. 3.4.4 - Parametri illuminotecnici ottimali per materiale secondo la norma UNI 10829, 1999

Materiale	E_{max} (lux)	UV_{max}	LO_{max} (lux ora/anno)
metalli, leghe, metalli levigati, argento, ferro, bronzo, rame, stagno, peltri, piombo, acciaio	non rilevante	-	-
pietre	non rilevante	-	-
legno, oggetti di vimini, oggetti in legno non dipinto	**150**	**75**	**500,000**
legno dipinto	**50**	**75**	**200,000**
tessuti, tappeti, tendaggi, arazzi, tappezzeria in sotffa, seta, materiali in fibra naturale, manufatti in carta, cartapesta	**50**	**75**	**200,000**
pitture su tela a olio, tempere	**150**	**75**	**500,000**
disegni, acquerelli, pastelli e simili su supporto cartaceo	50	**74**	**200,000**
porcellane, ceramiche, terracotta	non rilevante	-	-
pittura murale, affreschi	non rilevante	-	-
documenti archivistici su carta o pergamena, manoscritti, stampe	**150**	**75**	-
legature di libri con pelle o pergamena	**50**	**75**	**200,000**

CONDIZIONI DI BENESSERE INDOOR PER L'UTENZA

Dopo aver considerato i valori ottimali dei parametri microclimatici per la conservazione dei beni culturali, è doveroso tener conto delle condizioni di benessere per l'utenza, riferendosi anche alla destinazione d'uso dei locali. Intendendo infatti il benessere come stato dell'ambiente adatto alla vita, alla salute e allo svolgimento delle attività degli utenti, si comprende come tale parametro risulti strettamente legato all'utente e in particolare alle azioni che lo stesso può svolgere all'interno dello spazio destinato ad una sua specifica funzione.

Avvalendosi inoltre della definizione di benessere proposta dall'Organizzazione Mondiale della Sanità – OMS, come "lo stato di benessere fisico, mentale e sociale e non semplicemente l'assenza di malattie o menomazioni", si comprende come esso sia da intendersi come un fattore tale per cui un soggetto esprime soddisfazione nei confronti delle condizioni che lo circondano.

Il benessere racchiude tutti gli aspetti legati alla salute fisica, alla condizione psicologica ed al rapporto uomo-contesto.

È importante, pertanto, migliorare la qualità degli ambienti costruiti, avendo cura di adottare soluzioni utili ad evitare la possibilità di insorgenza di stati di malessere nelle persone che usufruiranno gli spazi.

La maggioranza della popolazione vive in ambienti confinati. Lo stato della qualità dell'aria negli ambienti interni è meno considerato rispetto alle ricerche effettuate sull'inquinamento degli ambienti esterni, tuttavia si tratta di un problema rilevante per la salute delle persone.

Risulta molto difficile quantificare gli effetti dell'inquinamento e dalla cattiva qualità dell'aria indoor sulla salute, dato che ogni individuo reagisce in modo diverso in relazione anche allo stati di stress e di discomfort personale, ma i principali sintomi osservati sono:

- problemi respiratori
- irritazione alla cute e alle mucose
- effetti sul sistema nervoso
- disturbi cardiovascolari
- effetti al sistema gastrointestinale
- effetti sul sistema riproduttivo
- infezioni ed intossicazioni,

La cattiva qualità dell'aria è dovuta ad un'alta concentrazione di inquinanti ed il rischio dipende dalla concentrazione e dalla permanenza della persona nell'ambiente (esposizione).

I disturbi dovuti alla cattiva qualità dell'aria indoor sono stati definiti "sindrome dell'edificio malato" , riconosciuta dall'Organizzazione Mondiale della Sanità. Questa sindrome deriva dall'uso, soprattutto nelle nuove costruzioni, di prodotti di sintesi immessi sul mercato (vernici, lacche, truciolare, alcuni tipi di intonaco...), dal cattivo uso dell'impianto di riscaldamento e dalla presenza di scarsa ventilazione e ricambi d'aria.

In un ambiente chiuso gli inquinanti prodotti all'interno si sommano a quelli provenienti dall'esterno raggiungendo concentrazioni da 10 a 100 volte superiori rispetto a quelle esterne. Le persone aumentano le concentrazioni di sostanze tossiche anche solo attraverso il loro stesso metabolismo.

È necessario, al fine di risolvere o quantomeno attenuare questo problema, garantire un'adeguata pulizia degli ambienti e l'uso corretto della ventilazione provvedendo all'ottimale ricambio d'aria in ogni luogo in cui si soggiorna.

Al benessere degli spazi interni, assieme agli aspetti di salubrità degli ambienti, concorrono anche le corrette condizioni di benessere psico-fisico.

Le caratteristiche che determinano il comfort indoor possono essere divise tra quantitative (qualità dell'aria, inquinamento elettromagnetico, radon, qualità dell'illuminazione, rumorosità) e qualitative, ossia misurabili solamente tramite l'esperienza personale diretta.

I requisiti di benessere che permettono di definire la qualità ambientale, come si evince anche da quanto detto precedentemente e, soprattutto, nei paragrafi riguardanti la definizione dei requisiti per classi di esigenze (cfr. par. 3.3, tab. 3.3.1 e schede di valutazione interventi-requisiti), sono principalmente i seguenti:

- benessere termo-igrometrico (velocità dell'aria, umidità relativa, temperatura)
- benessere visivo (quantità e qualità della luce presente)
- benessere acustico (protezione nei confronti di rumori fastidiosi)
- benessere respiratorio - olfattivo
- benessere tattile
- benessere psicologico
- benessere antropodinamico

Il benessere termo-igrometrico è raggiungibile solo in una stretta fascia di valori di temperatura, umidità e velocità dell'aria. La conoscenza dei parametri ambientali non è sufficiente per valutare in modo completo lo stato di soddisfazione di un individuo in un determinato ambiente e luogo. La sensazione di benessere, infatti, è legata anche all'attività fisica svolta dal soggetto ed alle caratteristiche di isolamento termico del vestiario.

Gli individui hanno, infatti, uno scambio termico con l'ambiente esterno. Per i soggetti acclimatati con attività sedentaria, lo scambio termico con l'irraggiamento esterno può essere definito come:

- potenza termica scambiata per irraggiamento 40%
- potenza termica scambiata per convezione 25÷30%
- potenza termica scambiata attraverso evaporazione 20÷25%
- potenza termica scambiata per conduzione trascurabile.

Bisogna considerare, inoltre, il fatto che, anche quando le condizioni microclimatiche possono considerarsi ottimali, esiste comunque una certa percentuale di persone insoddisfatte (PPD), dato che la sensazione umana rispetto ai parametri termici non è la stessa per tutti, ed è necessario analizzare qual è la massima percentuale di persone che ritengono confortevoli una serie di condizioni microclimatiche ambientali.

Per valutare correttamente le condizioni microclimatiche di un ambiente bisogna tenere conto, da un lato, dell'equilibrio termico del corpo umano e, dall'altro, dei parametri termo-igrometrici ambientali. È da notare, poi, come il comfort dipende termicamente

da due temperature: temperatura dell'aria e temperatura media radiante dell'involucro dell'ambiente considerato. È possibile raggiungere una condizione di benessere con diverse combinazioni delle due.

I sistemi di riscaldamento tradizionali influiscono sulla temperatura dell'aria, i sistemi radianti a parete, a pavimento o a soffitto innalzano, invece, la temperatura radiante, diminuendo quella dell'aria. Ragionamenti dello stesso tipo possono essere svolti anche per la velocità dell'aria e per l'umidità relativa.

Quando sono fissate l'attività del soggetto, il suo abbigliamento ed un determinato microclima, è possibile definire il PMV (Predicted Mean Value), ossia la valutazione del giudizio che una persona darebbe riguardo le condizioni termo-igrometriche dell'ambiente, variando un parametro termo-igrometrico e mantenendo costanti gli altri. È, così, interessante constatare il valore di temperatura considerato ottimale da un certo numero di soggetti posti in ambienti a condizioni microclimatiche controllate.

Del PMV sono suggeriti i limiti di accettabilità in ambienti civili: per un valore di - 0,5 < PMV< + 0,5, corrisponde statisticamente una percentuale di persone insoddisfatte minore del 10%. Tuttavia il valore del PMV che rientra in questo intervallo è una condizione necessaria ma non sufficiente a stabilire il comfort ambientale. Esiste, infatti, la possibilità che vi siano alcuni fenomeni, in alcune zone dell'ambiente, che generano discomfort locale:

- elevata differenza verticale della temperatura
- pavimento troppo caldo o troppo freddo
- presenza di correnti d'aria
- elevata asimmetria della temperatura media radiante.

In particolare la presenza di correnti d'aria è influenzata dal valore massimo e dalle fluttuazioni di velocità istantanea. Sono meglio tollerate le correnti d'aria calda, rispetto quelle d'aria fredda, e le parti del corpo che risentono maggiormente sono la testa, il collo, le spalle e le caviglie.

È importante, poi, tenere sotto controllo il gradiente di temperatura, dato che l'aria tende a stratificarsi con l'aria più calda vicina al soffitto e quella più fredda al pavimento. Le parti del corpo a differente temperatura possono far percepire una situazione di disagio agli utenti.

Il discomfort dovuto alla temperatura del pavimento viene valutata anche per persone che indossano scarpe. In questo caso la sensazione termica non è dovuta al materiale del pavimento ma al tipo di calze e scarpe indossate.

Infine è da considerare la differenza di temperatura radiante da parte delle superfici. La sensazione di discomfort, in questo caso, è soprattutto percepibile in inverno dove sono presenti superfici vetrate di notevole dimensione.

Nel caso di edifici storici è necessario tener conto di quanto detto e dei parametri necessari alla conservazione degli oggetti contenuti e del manufatto architettonico (cfr Condizioni microclimatiche negli ambienti espositivi). È necessario ottenere il benessere e la sicurezza degli occupanti (addetti ed utenti) e gestire la conservazione degli oggetti di interesse storico-artistico.

Le norme non pongono molta differenza in termini di comfort tra edifici nuovi ed edifici storici.

Con attività leggera, ossia sedentaria, si considerano i seguenti valori di comfort:

- temperatura operativa compresa tra 18° - 23° C nel periodo invernale
- temperatura operativa compresa tra 23° - 26° C nel periodo estivo
- umidità relativa compresa tra 30%-70%

- velocità dell'aria inferiore a 0,2 m/s
- temperatura di pavimento compresa tra 19° - 26° C (fino a 29° C per pavimenti radianti).
- l'eventuale asimmetria in direzione orizzontale della temperatura radiante dovuta a superfici fredde e calde (ad esempio finestre, radiatori ecc.) deve essere inferiore a 10°C (la misura viene riferita a una piccola superficie planare posta a 0,6 m dal pavimento)
- l'eventuale asimmetria in direzione verticale della temperatura radiante, dovuta in particolare all'irradiazione del 'Pavimento e del soffitto, deve essere inferiore a 5° C (la misura viene riferita a una piccola superficie planare parallela ai piani emittenti, posta a 0,6 m dal pavimento).

Negli edifici storici sussiste maggiore possibilità di discomfort localizzato dovuto a elementi quali:

- pareti poco isolate e, di conseguenza, basse temperature interne e bassa temperatura radiante
- pavimenti poco isolati e pavimento freddo, nonché elevato gradiente verticale di temperatura
- pareti fredde che causano correnti discendenti con discomfort localizzato
- livelli di umidità nell'involucro per risalita capillare o perdite
- possibilità di condensa superficiale nei punti freddi della parete
- spifferi dovuti alla scarsa tenuta dei serramenti antichi.

Lo spessore elevato della massa muraria, invece, rappresenta una risorsa. In inverno grazie all'inerzia termica, facilita il riscaldamento dell'edificio, in estate, invece, garantisce sfasamento e attenuazione delle oscillazioni di temperatura esterna.

Per quanto riguarda la ventilazione, che, come già detto, risulta essere fondamentale per la salubrità dell'ambiente indoor, essa può essere naturale o forzata, ossia regolata da meccanismi impiantistici.

La ventilazione naturale può essere utilizzata per garantire i corretti ricambi d'aria, ma anche come mezzo di climatizzazione nel periodo estivo. L'immissione e l'estrazione di aria sono generate dalle differenze di pressione dovute alla differenza di temperatura tra interno ed esterno e dall'azione del vento. Essa può avvenire in modo controllato e può essere favorita o inibita in funzione delle scelte progettuali.

I dispositivi bioclimatici di ventilazione naturale sono utilizzati nell'architettura storica per la climatizzazione dell'ambiente, specialmente nei climi caldi (es. Palazzo della Zisa a Palermo, Palazzo Madama a Roma, le masserie pugliesi). Oggi è possibile implementare la ventilazione con dispositivi meccanici di ventilazione utilizzando infissi, camini e aperture con dispositivi di apertura meccanici controllati da sensori di anidride carbonica.

La ventilazione permette, inoltre, di controllare la concentrazione di vapore, prevenendo la formazione di un ambiente ideale alla proliferazione di microorganismi (muffe, colonie fungine), i quali causano la creazione di un ambiente malsano, e limita la concentrazione di gas infiammabili, esplosivi o asfissianti e di composti chimici.

Un fattore importante nella valutazione della qualità dell'aria è, quindi, anche l'umidità relativa, elemento a cui il nostro corpo è sensibile e che è ancora più significativo nel caso di edifici storici, come messo in evidenza anche in precedenza. Livelli troppo alti di umidità relativa portano alla proliferazione di muffe e batteri, ma, d'altra parte, livelli troppo bassi creano situazioni di disagio legati a sensazioni di secchezza delle mucose ed eccessiva traspirazione. I valori ottimali di umidità relativa sono compresi fra il 35% e il 60%, ma sono tollerabili percentuali fino a 80%.

La norma UNI EN ISO 13788, che risulta essere in linea con le regole del risparmio energetico, pone come limite di umidità relativa sulle superfici interne 80%, poiché a

questo valore e ad una temperatura maggiore o uguale di 20°C si raggiunge la condizione critica per lo sviluppo delle muffe.

La norma UNI EN 15251 stabilisce le indicazioni di umidificazione e deumidificazione in relazione alla destinazione d'uso dell'edificio ed alla presenza di persone.

Tab. 3.4.5 – Prescrizioni per l'umidità relativa stabilite dalla norma UNI EN 15251

Tipo di edificio	categoria	umidità relativa di progetto per deumidificazione (%)	umidità relativa di progetto per umidificazione (%)
spazi dove i criteri di umidità sono imposti per la presenza di persone	I	50	30
	II	60	25
ambienti speciali (musei, chiese, ecc.) possono richiedere altri limiti	III	70	20
	IV	> 70	<20

Importante per il benessere psico-fisico è, poi, la qualità della luce, perché contribuisce a creare sensazione di accoglienza e piacevolezza. In particolare è fondamentale l'azione esercitata dai colori e dalla luce sulla psiche umana. La luce naturale è in grado di ottenere maggiori livelli di benessere rispetto a quella artificiale, che permette una migliore visione dei colori e permette di ridurre il consumo energetico.

Per la verifica del livello di luce naturale si fa riferimento al fattore di luce diurna F, che dipende dalle relazioni geometriche tra punto considerato all'interno dell'ambiente e volta celeste. Tale fattore è definito come il rapporto tra l'illuminamento E, che si realizza su una superficie orizzontale posta all'interno dell'ambiente considerato grazie alla luce proveniente dalla volta celeste (non si considera la radiazione diretta proveniente dal sole), e quello che contemporaneamente si ha su una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione, E0.

Il fattore F consente di valutare la capacità delle aperture trasparenti e dell'involucro di uno spazio chiuso di garantire condizioni di illuminazione naturale confortevole e dipende da:

- area delle aperture finestrate
- coefficiente di trasmissione nel visibile del materiale trasparente delle finestre
- area dei diversi elementi che costituiscono l'involucro (pareti, pavimenti, arredi, ecc)
- coefficiente di riflessione nel visibile delle superfici interne del locale
- presenza di ostruzioni che limitano la vista della volta celeste
- stato di manutenzione delle superfici vetrate e delle superfici interne.

L'area della finestratura è determinata come 1/8 della superficie della pianta, ma negli edifici storici questo non può essere sempre garantito.

Il sistema vetrato utilizzato deve possedere un'elevata trasmissione nel visibile e si può utilizzare un valore di soglia pari a 0,65-0,7.

L'illuminazione naturale non può, tuttavia, sostituire l'illuminazione artificiale, per cui è consigliabile utilizzare lampade ad elevata efficienza con spettro di emissione vicino a quello della luce naturale.

Tab. 3.4.6 – Fattore medio di luce diurna F consigliato

Ambito	F_{mld}
locali di residenza	0.02
palestre, refettori	0.02
scale, servizi igienici, spogliatoi	0.01
aule, laboratori	0.03
degenza, ambulatori, diagnostica	0.03
edilizia pubblica sovvenzionata	0.06
In termini generali	
F < 0,3 %	insufficiente
0,3% < F < 2%	discreto
2% < F < 4%	buono
4% < F	ottimo

Il benessere per l'utenza comprende, infine, anche la qualità acustica. La qualità di vita all'interno di un edificio, infatti, dipende anche dal comfort acustico garantito rispetto le sorgenti sonore interne ed esterne.

Nel caso degli edifici storici, un possibile punto critico per i rumori aerei è la copertura, poiché strutture leggere come quelle in legno raggiungono facilmente bassi valori di isolamento acustico. In questo caso occorre aumentare la massa per unità di superficie, utilizzando espedienti come il doppio tavolato o guaine contenenti piombo, e sigillarne le discontinuità. Un altro punto debole sono le aperture presenti nell'involucro (finestre e porte) e va fatta attenzione alle capacità di fono isolamento di serramenti e vetri.

Per quanto riguarda le strutture con attività ricreative, il requisito acustico richiesto è un indice di potere fonoisolante (DW) per le partizioni esterne pari a 42 Db.

CONGRUENZA TRA ESIGENZE DI CONSERVAZIONE DI BENESSERE

Al fine di proporre delle soluzioni progettuali consapevoli e compatibili sia con la fabbrica esistente, sia con la funzione proposta, risulta in ultimo necessario procedere mediante la lettura di categorie d'intervento compatibili con la fabbrica confrontandole ed eventualmente escludendole con quelle non adeguate all'uso, con lo scopo di delineare solo ed esclusivamente soluzioni progettuali compatibili e adeguate.

La matrice qui riportata mostra la correlazione tra i parametri idonei alla conservazione dei materiali del manufatto architettonico e degli oggetti contenuti in esso e i parametri che definiscono il benessere per gli addetti e l'utenza che fruiscono l'edificio.

Tab. 3.4.7 – Matrici di congruenza tra i fattori ambientali per la conservazione dei materiali e le condizioni di benessere per gli individui

		PRINCIPALI ESIGENZE DI CONSERVAZIONE				
		legno (pavimentazioni, intarsi, arredi d'epoca, elementi strutturali)	tappezzerie in seta e in velluto	marmi e pietre	pitture su tela	libri e manoscritti
BENESSERE INDOOR	TERMO - IGROMETRICO e qualità dell'aria	Ur = 45-60 %, t = 19°-24° C	Ur = 30%-50%, t = 19°-24° C	Ur = 30%-60%, t = 15°-25° C	Ur = 40%-55%, t = 19°-24° C	Ur = 50%-60%, t = 13°-18° C
	VISIVO	E_{max} = 150 lux	E_{max} = 50 lux	E_{max} non rilevante	E_{max} = 150 lux	E_{max} = 50 lux
	ACUSTICO					

Legenda

Alto Medio Basso

3.5 AZIONI PROGETTUALI

Il presente capitolo intende illustrare, senza alcuna pretesa di completezza, un'esemplificazione delle modalità di approccio metodologico al progetto.
Risulta chiaro come la determinazione delle soluzioni progettuali compatibili e adeguate, discenda strettamente, innanzitutto, dai vincoli della fabbrica esistente ed, in secondo luogo, dalla scelta della specifica destinazione proposta, messa a sistema in modo trasversale con le esigenze di sostenibilità energetica.
In questa ultima fase del lavoro svolto nell'ambito della *Linea 2* (cfr par. 1.1), sono proposti alcuni possibili interventi, allo scopo di definire un metodo dimostrativo della ricerca.
Le azioni progettuali descritte derivano dallo studio svolto, illustrato nei capitoli precedenti e sono, quindi, ipotizzate per gli elementi dell'involucro esterno, ossia ciò che in un manufatto architettonico influisce maggiormente al suo comportamento in fatto di dispersioni di energia.
La metodologia di studio e progetto viene svolta con maggior dettaglio sulle partizioni inclinate, con l'elaborazione di alcune differenti possibili soluzioni ritenute idonee al caso esaminato.
La possibilità di realizzazione di un progetto comprende anche la sfera economica. Nell'ambito della progettazione sostenibile, infatti, si inserisce sempre anche l'esigenza di *sostenibilità economica* di un intervento.
Una valutazione dei costi, tuttavia, deve essere supportata da studi approfonditi e specifici al riguardo e rappresenta uno sviluppo successivo a quanto di questa ricerca.
Nel realizzare le proposte progettuali si sono, comunque, tenuti in considerazione i fattori di fattibilità economica e di facilità di attuazione e manutenzione.

POSSIBILITÀ DI INTERVENTO SULLE CHIUSURE VERTICALI

Sia per il controllo dell'umidità, così come per la riduzione dei consumi di risorse energetiche, le strategie progettuali propongono interventi che incidono sui materiali di cui si compongono gli elementi dell'involucro esterno dell'edificio.

Nel caso di un progetto di recupero/restauro, tutto questo si traduce in una modifica dell'esistente mediante l'aggiunta di nuovi materiali. Questa azione è da valutarsi caso per caso, in relazione alle caratteristiche dell'edificio su cui si deve intervenire.

In particolare risultano di notevole incisività gli interventi che interessano il paramento murario (chiusure verticali opache) e nella seguente tabella vengono evidenziate le strategie progettuali proponibili sulle chiusure verticali opache al fine di raggiungere alcuni obiettivi di sostenibilità (classi di esigenza, cfr par. 3.4), in relazione ai vincoli dell'edificio.

Ogni edificio possiede delle proprie caratteristiche peculiari ed è vincolato da limiti differenti.

Le murature possono presentare particolari trattamenti superficiali che, per la propria particolarità e per la storicità, sono considerate beni da proteggere e da mantenere in opera.

Un semplice esempio è dato dalla presenza di pitture murali, affreschi o decorazioni, non per forza coeve con la costruzione dell'opera architettonica, ma di realizzazione antica, considerate di pregio dagli esperti del settore. In casi come questo non è, pertanto, proponibile una soluzione che prevede l'inserimento di coibentazione termica che, sovrapponendosi al paramento murario, ne nasconderebbe la facciata.

La pareti in laterizio della reggia di Monza presentano limiti di questo tipo, sia esternamente, sia internamente, dove i paramenti risultano in molti casi rivestite da tappezzerie di seta.

Nella maggior parte dei casi, però, gli edifici del passato presentano buone caratteristiche di inerzia termica grazie al notevole spessore dei muri che possono, così, favorire il riscaldamento nel periodo invernale e contrastare il surriscaldamento estivo. Risulta molto importante, ad ogni modo, il controllo dell'umidità e della velocità dell'aria per impedire il ristagno di umidità nei pori del materiale e per mantenere una buona qualità dell'aria indoor.

Un punto critico delle chiusure verticali è determinato dalle aperture. Le chiusure verticali trasparenti non solo risultano essere punti di dispersione energetica, ma sono anche causa di discomfort a causa della temperatura radiante differente rispetto a quella delle partizioni opache. Non è di poca importanza, perciò, ipotizzare un intervento idoneo per migliorare, nel rispetto dei vincoli storici, la coibentazione dei telai e delle parti vetrati delle finestre.

Qualora risulti possibile la sostituzione degli infissi si può prevedere l'inserimento di serramenti di nuova costruzione, con maggiore coibenza termica e che utilizzino materiali idonei all'integrazione con il manufatto storico. In caso contrario può essere valutata la sola sostituzione delle parti vetrate, con l'inserimento di un vetrocamera.

Tab. 3.5.1 – Tabella riassuntiva delle possibilità di intervento sul paramento murario di un edificio storico

	CLASSI DI ESIGENZA

	consumo delle risorse (RIDUZIONE DEI CONSUMI)	**qualità dell'ambiente interno** (QUALITÀ DELL'ARIA)
parti del paramento murario su cui è possibile intervenire	STRATEGIE PROGETTUALI	
	Isolamento termico	controllo umidità
Entrambe le superfici	isolamento “a cappotto” + termo-intonaco + contropareti interne + pannelli isolanti	diffusore al vapore
Solo parete esterna	isolamento “a cappotto” + termo-intonaco	intonaco o termo-intonaco
Solo superficie interna	contropareti interne + pannelli isolanti + termo-intonaco	diffusore al vapore + intonaco deumidificante / termoisolante
Impossibilità di intervento sia sulla superficie esterna, sia sulla superficie interna		ventilazione naturale e/o meccanica

fig. 3.6.1 Una finestra della Villa Reale ed un suo dettaglio. Le dimensioni del telaio sono idonee all’inserimento di un doppio vetro

POSSIBILITÀ DI INTERVENTO SULLE CHIUSURE INCLINATE E SCHEDE PROGETTUALI

Nell’ultima fase della *linea 2* si è deciso di sviluppare l’approccio al progetto sulle chiusure inclinate, creando delle schede progettuali in cui viene descritto il tipo di intervento, riportando una valutazione schematica qualitativa delle prestazioni ed

evidenziando il miglioramento per ciò che concerne la riduzione delle dispersioni energetiche, e di conseguenza dei consumi, attraverso indicatori quantitativi (trasmittanza termica e sfasamento termico).

La fase progettuale si fonda sulle fasi precedentemente analizzate, sintetizzando ed utilizzando i dati raccolti ed elaborati fino alla formulazione di azioni che possono essere applicate concretamente al caso di studio.

In ogni scheda è riportato un dettaglio costruttivo esemplificativo della stratigrafia che compone l'elemento considerato e riprogettato.

Tale metodologia può essere applicata anche per gli interventi progettuali relativi agli altri elementi dell'involucro esterno e, risulta, pertanto rappresentare la prosecuzione di quanto illustrato nei precedenti capitoli, nonché un modello di lavoro.

È stato ritenuto opportuno introdurre le schede progettuali relative alle partizioni inclinate, riportare una breve introduzione che permette una migliore comprensione delle azioni proposte.

La Villa Reale di Monza possiede una copertura discontinua a falde con struttura portante lignea.

Le coperture discontinue, dal punto di vista della metodologia di controllo del comportamento termo-igrometrico, possono essere individuate e classificate in quattro schemi funzionali:

- coperture non isolate e non ventilate

- coperture non isolate e ventilate

- coperture isolate e non ventilate (*tetto caldo*)

- coperture isolate e ventilate (*tetto freddo*).

Nel caso in cui la copertura risulta essere ventilata, è presente uno strato di aerazione che ha lo scopo di migliorare il comportamento termo-igrometrico complessivo, avendo proprietà di coibentazione e di controllo dell'umidità.

Se l'ambiente sottotetto risulta essere chiuso ed abitabile, la copertura non risulta essere aerata e si può inserire uno strato di coibentazione termica in falda. In questo caso si è soliti parlare di *tetto caldo*. Uno dei vantaggi di questo tipo di copertura sta proprio nel fatto che l'ambiente sottotetto può essere utilizzato.

Vi sono, poi, delle coperture aerate che presentano isolamento termico all'estradosso dell'ultimo solaio dell'edificio (tetto freddo). L'isolamento termico permette di raggiungere un valore richiesto di resistenza termica globale, mentre lo strato di ventilazione contribuisce a regolare le caratteristiche igrotermiche della copertura. Tale strato è, in questo caso, sempre disposto immediatamente sopra l'isolante e può essere realizzato sia mediante lo spazio sottotetto, sia ricavato con un'apposita intercapedine ventilata a spessore costante, inclinata e disposta a ridosso della struttura portante (aerazione sotto-tegola).

In regime estivo, la ventilazione favorisce anche lo smaltimento del calore accumulato per irraggiamento.

Non di poca importanza è il ruolo dell'aerazione sotto-tegola, dato che permette l'eliminazione dell'umidità e consente di prevenire e minimizzare il fenomeno della gelività che si verifica in inverno, a causa del congelamento dell'acqua contenuta nei pori di materiali come il laterizio e le pietre calcaree, usati per la realizzazione delle tegole.

La presenza di lastre porta-coppo, sebbene permetta una più semplice posa del manto di copertura, nonché favorirne l'impermeabilizzazione, può impedire una corretta micro-ventilazione e, di conseguenza, sfavorire l'asciugatura delle tegole umide.

L'attuale copertura della Reggia di Monza è ventilata, ma non isolata, ed caratterizzata da un manto costituito da lastre porta-coppo di fibrocemento-amianto su cui risultano posati i coppi di laterizio. Il canale di gronda è ottenuto ed impermeabilizzato con una lamiera metallica e risulta nascosto dalla parete esterna della reggia, che si prolunga a formare un muretto di coronamento, come visibile nelle immagini (cfr dettaglio costruttivo scheda Ci.00).

Per migliorare il benessere termico e favorire il risparmio energetico è doveroso contribuire al miglioramento della capacità isolante e si può, quindi, proporre l'inserimento di uno strato di coibentazione termica all'estradosso dell'ultimo solaio (cfr scheda Ci.01) o in falda (cfr scheda Ci.02 e successive).

Dovendo provvedere allo smantellamento ed alla bonifica delle lastre contenenti amianto si può facilmente proporre l'inserimento di uno strato di isolamento termico in falda. Il riposizionamento della copertura di laterizio deve avvenire su appositi listelli di legno di ventilazione, in modo da garantire il movimento dell'aria sotto le tegole. Come già spiegato, infatti, questo accorgimento contribuisce al controllo dell'umidità ed alla manutenzione del manto di laterizio, contrastando il fenomeno della gelività nel periodo invernale e prevenendo fatturazioni e rotture del materiale. È tuttavia possibile inserire uno strato di isolamento sull'ultimo solaio, scegliendo la soluzione del *tetto freddo*.

Nelle schede progettuali sono stati, pertanto, analizzati e valutati differenti casi di intervento possibili, ritenuti adeguati anche in termini di fattibilità.

La normativa impone che gli elementi dell'involucro abbiano un valore massimo di trasmittanza termica U (W/m^2K) in relazione alla fascia climatica di appartenenza. Il calcolo della trasmittanza è importante per il controllo del benessere in regime invernale e, per quanto riguarda le coperture, il valore limite è di 0,3 W/m^2K in fascia climatica E, di cui Monza fa parte.

Accanto a questo parametro è corretto tener presenti il valore di sfasamento termico, utile al fine di valutare e garantire il benessere in regime estivo.

fig. 3.6.2 Immagini della copertura dell'Ala Sud. Un dettaglio del manto di coppi e del canale di gronda (a sinistra); un'immagine del sottotetto (in alto).

Tab. 3.6.3 – Fasce climatiche italiane

	A	< 600 GG
	B	601 – 900 GG
	C	901 – 1400 GG
	D	1404 – 2100 GG
	E	2101 – 3000 GG
	F	> 3000 GG

Tab. 3.6.4 – Conduttività termica dei materiali isolanti utilizzati in edilizia

materiale isolante	conduttività termica λ (W/mK)
argilla espansa	0,09
canapa	0,045
cellulosa in fiocchi / pannelli di cellulosa	0,04
fibre di cocco	0,045
gomma	0,2
lana di pecora	0,04
lana di roccia	0,04
lana di vetro	0,04
materassino in lino	0,04
paglia / pannelli di paglia	0,09
pannelli di canna / canneto	0,055
pannelli di legno compensato	0,45
pannelli di polistirene con cemento	0,07
pannelli di sughero espanso	0,045
pannelli di trucioli di legno	0,16
pannelli di fibre di legno pressate	0,04
pannelli in calcio silicato	0,06
pannelli in fibre minerali	0,045
pannelli in lana di legno mineralizzata	0,09
pannelli porosi in fibra di legno	0,045
perlite espansa	0,05
polietilene espanso in lastre	0,04
polistirene espanso sinterizzato	0,03
polistirene estruso in lastre	0,035
poliuretano	0,03
sughero (granuli)	0,05
vermicuilite espansa	0,07
vetro cellulare	0,045

Le schede riportate qui di seguito rappresentano alcune soluzioni in grado di soddisfare le esigenze richieste.
La ricerca ha deciso di sviluppare il progetto delle chiusure inclinate, delineando e descrivendo la metodologia da perseguire.
Si è scelto di riportare una valutazione dei requisiti in modo sintetico mediante rappresentazione grafica. Per ogni soluzione viene riportato il dettaglio costruttivo esemplificativo con la relativa spiegazione della stratigrafia, nonché la descrizione. Infine si riporta un esempio di calcolo in cui, scegliendo i materiali da inserire e gli spessori relativi, viene ottenuto il valore della trasmittanza della copertura, allo scopo di verificare che le soluzioni proposte rispondono a quanto prescritto dalle norme di riferimento. Si riporta, infine, lo sfasamento termico ottenuto mediante specifico programma di calcolo

Nota: i valori riportati nelle schede sono esemplificativi di alcuni prodotti edilizi. Per calcoli puntuali si deve far riferimento alle caratteristiche tecniche dello specifico prodotto scelto.

Simbologia

Tipologie di prestazioni

Attenzione al comportamento della struttura e dei materiali in relazione alla radiazione solare (isolamento dal caldo, surriscaldamento dei materiali)

Attenzione all'isolamento dal freddo con particolare attenzione ai ponti termici

Verifica termo-igrometrica

Attenta valutazione degli aspetti legati al controllo della ventilazione intesa come infiltrazione d'aria attraverso la struttura

Facilità di manutenzione

Valutazione

● assente

●● poco

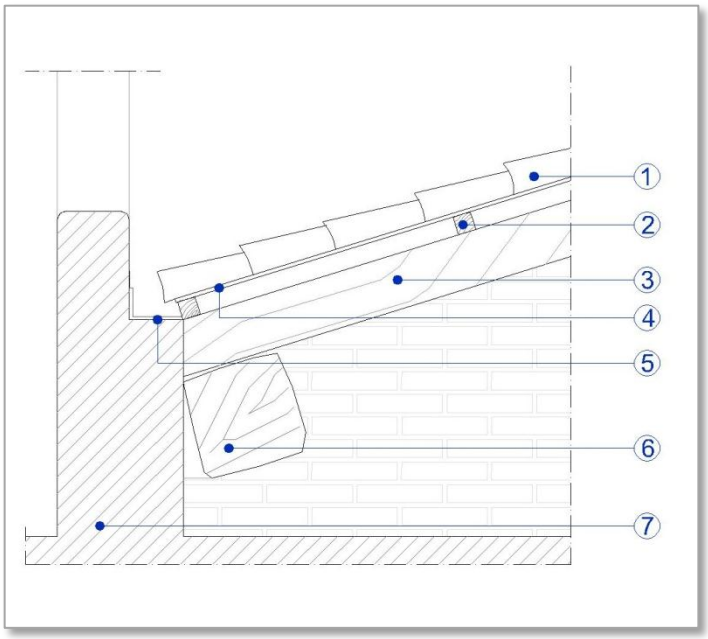
●●● buono

●●●● ottimo

SCHEDA Ci.00

Descrizione: stato di fatto della copertura attualmente in opera. Copertura aerata non isolata, con manto in coppi di laterizio posati su lastre ondulate di fibrocemento-amianto.

Dettaglio costruttivo – scala 1:20



1) MANTO DI COPERTURA IN COPPI DI LATERIZIO
2) LISTELLO DI LEGNO
3) TRAVE DI LEGNO
4) LASTRA PORTA-COPPO ONDULATA IN FIBROCEMENTO E AMIANTO
5) CANALE DI GRONDA IN LAMIERA METALLICA
6) TRAVE DI LEGNO
7) MURO PERIMETRALE IN LATERIZIO

OSSERVAZIONI:

IL solaio confinante con il sottotetto è, nella maggior parte dei casi, in laterizio pieno (volte) intonacato all'intradosso. Non disponendo di un suo rilievo, si utilizzano valori approssimati.

Con sottotetto aerato non riscaldato, per il calcolo della trasmittanza della copertura si considera l'ultimo solaio (l'apporto della falda viene considerato, in questo caso, ininfluente).

●● ●● ●● ●●● ●●

Calcolo di trasmittanza e Sfasamento termico

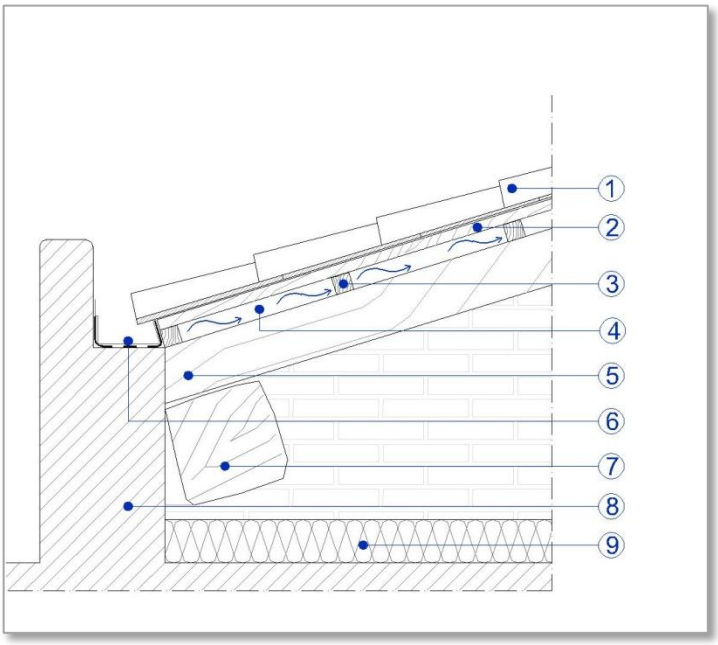
strato	spessore (cm)	conduttività λ (W/mK)	resistenza R (m^2K/W)	riferimento normativo
resistenza termica superficiale interna	-	-	0.125	UNI 6946
intonaco di calce	1	0.9	0.01	UNI 10351
laterizio pieno	12	0.8	0.15	UNI 10351
soletta in calcestruzzo	4	0.19	0.21	UNI 6946
coefficiente liminare esterno	-	-	0.04	UNI 6946
Resistenza totale R_{tot}			0.54	m^2K/W

U (W/m^2K) = $1/R_{tot}$	**1.85**
Sfasamento termico	**5h 18'**

SCHEDA Ci.01

Descrizione: copertura ventilata con isolamento termico sull'estradosso dell'ultimo solaio.

Dettaglio costruttivo – scala 1:20



1) MANTO DI COPERTURA IN COPPI IN LATERIZIO
2) LISTELLO DI LEGNO SP. 3 CM
3) LISTELLO LIGNEO DI VENTILAZIONE SP. 5 CM
4) **STRATO DI AERAZIONE SOTTOTEGOLA**
5) TRAVE DI FALDA IN LEGNO
6) CANALE DI GRONDA
7) TRAVE IN LEGNO
8) MURO PERIMETRALE IN LATERIZIO
9) **ISOLAMENTO TERMICO**

VANTAGGI: non è necessario riprogettare gli strati della falda

SVANTAGGI: tetto freddo, sottotetto non utilizzabile

●●● ●● ●●● ●●●● ●●●

Esempio con isolamento costituito da pannelli in fibre di legno pressate (densità 45 Kg/m3)

strato	spessore (cm)	conduttività λ (W/mK)	resistenza R (m^2K/W)	riferimento normativo
resistenza termica superficiale interna	-	-	0.125	UNI 6946
intonaco di calce	1	0.9	0.01	UNI 10351
laterizio pieno	12	0.8	0.15	UNI 10351
soletta in calcestruzzo	4	0.19	0.21	UNI 6946
pannello isolante in fibre di legno pressate (densità 45 Kg/m^3)	12	0.038	3.16	UNI 10351
coefficiente liminare esterno	-	-	0.043	UNI 6946
Resistenza totale R_{tot}			3.70	m^2K/W

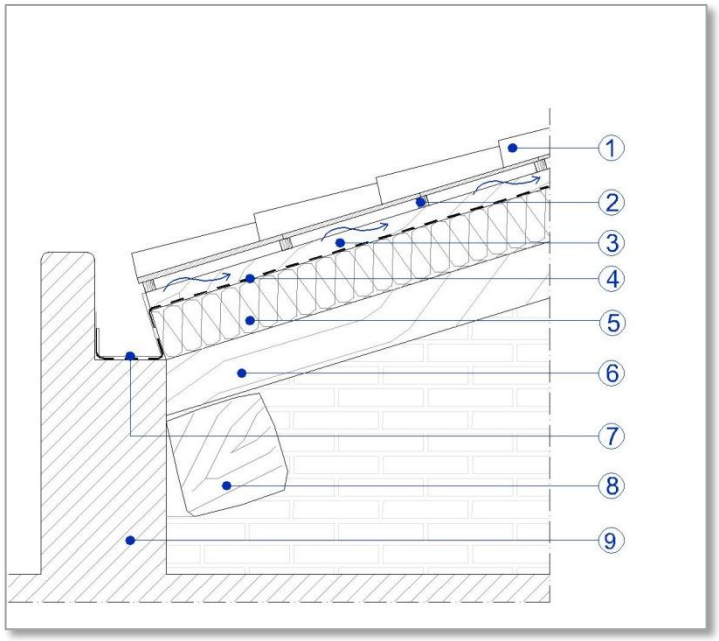
RISULTATI

U (W/m^2K) = $1/R_{tot}$	0.27	ΔU = 1.58
U (W/m^2K) Stato di fatto	1.85	
Sfasamento termico	8h 30'	Δfi = 3 h 18'
Sfasamento t. stato di fatto	5h 18'	

SCHEDA Ci.02

Descrizione: copertura ventilata con isolamento termico in falda. In questo caso è opportuno prevedere un'adeguata tenuta al vento del sottotetto mediante sua chiusura rispetto l'esterno ed inserire coibentazione termica delle pareti esterne del sottotetto.

Dettaglio costruttivo – scala 1:20



1) MANTO DI COPERTURA IN COPPI IN LATERIZIO
2) LISTELLO DI LEGNO SP. 3 CM
3) LISTELLO LIGNEO DI VENTILAZIONE SP. 5 CM
4) **GUAINA IMPERMEABILIZZANTE TRASPIRANTE**
5) **STRATO DI ISOLAMENTO TERMICO**
6) TRAVE DI FALDA IN LEGNO
7) CANALE DI GRONDA
8) TRAVE IN LEGNO
9) MURO PERIMETRALE IN LATERIZIO

VANTAGGI: tetto caldo, possibilità di utilizzare il sottotetto, eliminazione dei ponti termici

SVANTAGGI: maggiori costi di realizzazione rispetto al precedente (Ci.01) perché è necessario riprogettare la falda

●●● ●●● ●●●● ●●●● ●●●●

Esempio con isolamento costituito da pannelli in fibre di legno pressate (densità 230 Kg/m3)

strato	spessore (cm)	conduttività λ (W/mK)	resistenza R (m^2K/W)	riferimento normativo
resistenza termica superficiale interna	-	-	0.125	UNI 6946
pannello in fibre di legno pressate (densita 230 Kg/m^3)	12	0.05	2.4	UNI 10351
foglio in polietilene 1,6 mm	0.16	0.15	0.011	UNI 10351
camera di ventilazione	8	0.09	0.89	UNI 6946
coppi in laterizio	1	0.55	0.02	UNI 10351
coefficiente liminare esterno	-	-	0.043	UNI 6946
Resistenza totale R_{tot}			3.49	m^2K/W

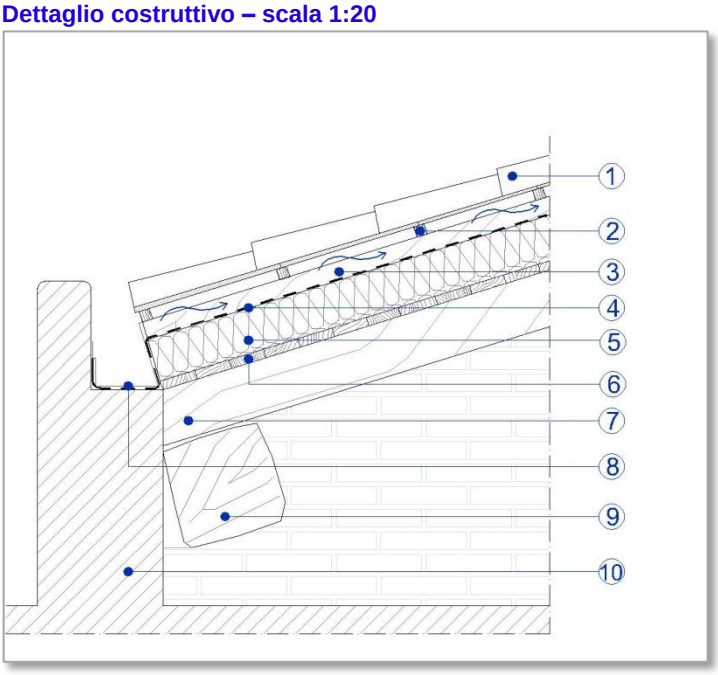
RISULTATI

U (W/m^2K) = $1/R_{tot}$	**0.29**	**ΔU = 1,56**
U (W/m^2K) stato di fatto	**1.85**	
Sfasamento termico	**7h 10'**	**Δfi = 2h 8'**
Sfasamento t. stato di fatto	**5h 18'**	

SCHEDA Ci.03

Descrizione: copertura ventilata con isolamento termico in falda posato su assito ligneo. In questo caso è opportuno prevedere un'adeguata tenuta al vento del sottotetto mediante sua chiusura rispetto l'esterno ed inserire coibentazione termica delle pareti esterne del sottotetto.

Dettaglio costruttivo – scala 1:20



1) MANTO DI COPERTURA IN COPPI IN LATERIZIO
2) LISTELLO DI LEGNO SP. 3 CM
3) LISTELLO LIGNEO DI VENTILAZIONE SP. 5 CM
4) **GUAINA IMPERMEABILIZZANTE TRASPIRANTE**
5) **STRATO DI ISOLAMENTO TERMICO**
6) ASSITO IN LEGNO, PERLINA DI SP. 2,5 CM
7) TRAVE DI FALDA IN LEGNO
8) CANALE DI GRONDA
9) TRAVE IN LEGNO
10) MURO PERIMETRALE IN LATERIZIO

VANTAGGI / **SVANTAGGI**: come Ci.02

●●● ●●● ●●●● ●●●● ●●●●

Esempio con isolamento costituito da pannelli di lana di roccia (densità 150 Kg/m^3)

strato	spessore (cm)	conduttività λ (W/mK)	resistenza R (m^{2}K/W)	riferimento normativo
resistenza termica superficiale interna	-	-	0.125	UNI 6946
assito ligneo (perline di abete)	2.5	0.12	3.00	UNI 10351
pannello in lana di roccia (densità 150 Kg/m^3)	14	0.038	3.68	UNI 10351
foglio di polietilene 1,6 mm	0.16	0.15	0.01	UNI 10351
camera di ventilazione	8	0.09	0.89	UNI 6946
coppi in laterizio	1	0.55	0.02	UNI 10351
coefficiente liminare esterno	-	-	0.043	UNI 6946
Resistenza totale R_{tot}			7.77	m^{2}K/W

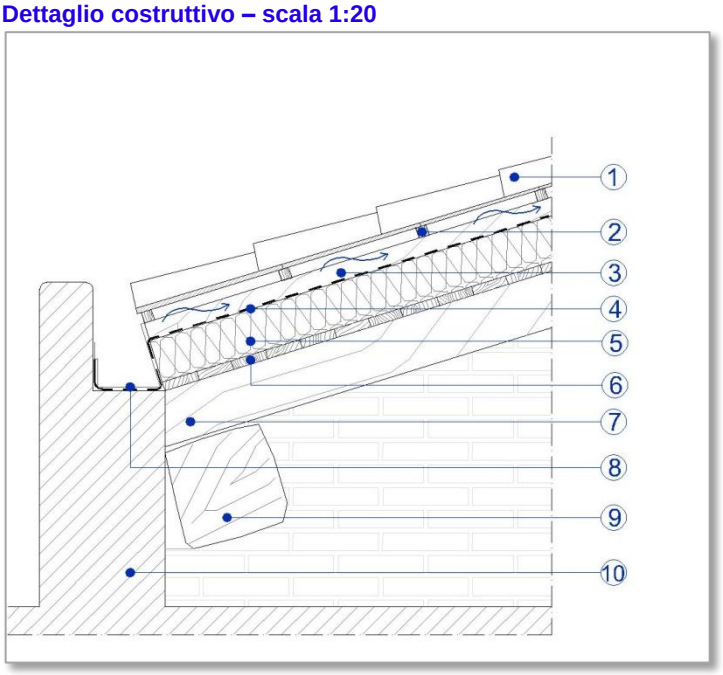
CONCLUSIONI

U (W/m^{2}K) = 1/R_{tot}	**0.13**	**ΔU = 1,72**
U (W/m^{2}K) Stato di fatto	**1.85**	
Sfasamento termico	**7h 14'**	**Δfi = 2h 4'**
Sfasamento t. stato di fatto	**5h 18'**	

SCHEDA Ci.04

Descrizione: copertura ventilata con isolamento termico in falda e guaina impermeabilizzante termo-riflettente. In questo caso è opportuno prevedere un'adeguata tenuta al vento del sottotetto mediante sua chiusura rispetto l'esterno.

Dettaglio costruttivo – scala 1:20



1) MANTO DI COPERTURA IN COPPI IN LATERIZIO
2) LISTELLO DI LEGNO SP. 3 CM
3) LISTELLO LIGNEO DI VENTILAZIONE SP. 3 CM
4) **GUAINA IMPERMEABILIZZANTE TERMO-RIFLETTENTE**
5) **STRATO DI ISOLAMENTO TERMICO**
6) ASSITO IN LEGNO, PERLINA DI SP. 2,5 CM
7) TRAVE DI FALDA IN LEGNO
8) CANALE DI GRONDA
9) TRAVE IN LEGNO
10) MURO PERIMETRALE IN LATERIZIO
11) **STRATO DI ISOLAMENTO TERMICO**

VANTAGGI / SVANTAGGI: come Ci.02 e Ci.03

●●●● ●●● ●●●● ●●●● ●●●●

Esempio con isolamento costituito da lana di roccia e guaina traspirante in fibre di polietilene metallizzata sulla faccia rivolta verso l'intercapedine d'aria

strato	spessore (cm)	conduttività λ (W/mK)	resistenza R (m^2K/W)	riferimento normativo
resistenza termica superficiale interna	-	-	0.125	UNI 6946
assito ligneo (perline di abete)	2.5	0.12	3.00	UNI 10351
pannello in lana di roccia (densità 150 Kg/m^3)	14	0.038	3.68	UNI 10351
guaina termo-riflettente in fibre di polietilene	0.7	0.00434	1.61	UNI 10351
intercapedine d'aria	8	0.09	0.89	UNI 6946
coppi in laterizio	1	0.55	0.02	UNI 10351
coefficiente liminare esterno	-	-	0.043	UNI 6946
Resistenza totale R_{tot}			9.37	m^2K/W

U (W/m^2K) = $1/R_{tot}$	**0.11**	**ΔU=1,74**
U (W/m^2K) Stato di fatto	**1.85**	
Sfasamento termico	**8h 01'**	**△fi = 2h 43'**
Sfasamento t. stato di fatto	**5h 18'**	

3.6 CONCLUSIONI

PROSPETTIVE E SVILUPPO DELLA RICERCA

La ricerca svolta ha consentito di verificare la complessità metodologica, operativa e tecnologica del tema, ma anche di apprezzarne la centralità nella più generale prospettiva della individuazione di strategie per una valorizzazione sostenibile ed energeticamente orientata del patrimonio edilizio storico esistente.

Numerose appaiono comunque le frontiere di ulteriore approfondimento dei temi fin qui affrontati. Tra queste, meritano un riferimento almeno le seguenti:

1. L'ampliamento dell'indagine ad ulteriori nodi tecnologici
   - nella ricerca svolta, è stata esemplificata la lettura tecnologica e la proposta di soluzione progettuale per il sistema tecnologico delle chiusure inclinate. Un possibile sviluppo della ricerca potrebbe prevedere l'ampliamento dello spettro tecnologico di indagine, includendo gli altri nodi tecnologici che nel presente rapporto sono affrontati solo in forma sintetica, quali ad esempio, le chiusure verticali opache e trasparenti e gli orizzontamenti contro terra;
   - l'ampliamento della ricerca ad altri nodi tecnologi potrebbe consentire l'approfondimento e la sperimentazione di una più ampia gamma di materiali e tecniche costruttive;
   - la possibilità di applicare la simulazione dell'intera procedura ad una porzione sufficientemente complessa di sistemi e subsistemi tecnologici e spaziali consentirebbe di ottenere risultati sistemici maggiormente significativi in termini di modellazione dell'incremento di efficienza energetica del complesso.
2. L'integrazione nell'analisi e nella valutazione comparativa di possibili strategie alternative della dimensione economica dell'intervento potrebbe contribuire a rendere operativi gli strumenti definiti nella ricerca
3. La definizione di modelli per la valutazione predittiva di impatto tra funzione e contenitore, qui collocata al margine della ricerca, potrebbe divenire invece centrale, in una seconda fase di lavoro, consentendo l'integrazione delle scelte di ottimizzazione energetica con le modalità di valutazione comparativa di tra le diverse opzioni funzionali nel caso di un riuso di un contenitore edilizio storico.

3.6 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

AA. VV., Manuale di progettazione edilizia, vol. 4, Milano 1999

C. Benedetti, *Costruire in legno. Edifici a basso consumo energetico*, Bozen - Bolzano University Press, Bolzano, 2009

V. D'Agostino, *Condizioni microclimatiche e di qualità dell'aria negli ambienti museali*, tesi di dottorato in Conservazione integrata dei Beni Culturali ed Ambientali, Università degli Studi di Napoli Federico II, XVIII ciclo, 2002-2005

Environment Park, *Requisiti per la sostenibilità ambientale degli edifici*

ENEA (Ente per le Nuove Tecnologie e l'Ambiente), *L'impegno ENEA per i Beni Culturali*, 2006

G. V. Fracastoro, Fisica Tecnica Ambientale, Otto Editore, Politecnico di Torino, dip. Energetica, 2003

ITACA (Istituto per la Trasparenza, l'Aggiornamento e la Certificazione degli Appalti), Gruppo di Lavoro Interregionale in materia di Bioedilizia, *Protocollo ITACA per la valutazione della qualità energetica ed ambientale di un edificio. Le aree di valutazione e le schede*,Roma, 2004

Linee guida nazionali per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati, 2001

Metadistretto veneto della Bioedilizia, Metadistretto veneto dei Beni Culturali, A.T.T.E.S. Edilizia Storica e Sostenibilità Ambientale, Venezia, 2010

Normativa (D.Lgs energetica, etc)

Norme UNI:

UNI 10829:1999, Beni di interesse storico artistico. Condizioni ambientali di conservazione, Misurazioni ed analisi

UNI 10969:2002, Beni culturali – Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni

UNI EN ISO 13786:2008 Prestazione termica dei componenti per l'edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo

UNI EN ISO 13788:2003, Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia (Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo)

UNI EN 15251:2008, Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

P.L. Maggi*, Il processo edilizio,* UTET…

Rockwool*, Tetti in legno ad elevate prestazioni*, Milano

http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/tecnici.htm

http://www.reggiadimonza.it/

http://www.docet.itc.cnr.it/

http://www.cened.it/cenedhome

http://www.taed.unifi.it/fisica_tecnica/dispense/verifica%20termoigrometrica.pdf

4. LINEA 3

SUPPORTO ALL'INDIVIDUAZIONE DI UN SISTEMA DI INDICATORI IN GRADO DI VALUTARE LO STATO DELL'EDIFICIO IN TERMINI DI EFFICIENZA ENERGETICA E QUALITÀ DELL'AMBIENTE INTERNO

Gruppo di lavoro

Ing. Sergio Olivero

Ing. Federico Stirano

Ing. Diego Donfrancesco

Dott.sa Roberta Sabbatelli

4.1 DEFINIZIONE DEI REQUISITI

4.2 SISTEMA DI INDICATORI

4.3 COMPORTAMENTO TERMICO

4.4 CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE

4.1 DEFINIZIONE DEI REQUISITI

INTRODUZIONE

L'efficienza energetica applicata agli edifici di elevato valore artistico e culturale rappresenta una forte sfida che dovrà essere affrontata nel prossimo futuro per poter garantire la sostenibilità economica e ambientale dei processi di gestione di tali strutture. La recente crisi economica ha, infatti, ridotto notevolmente le risorse economiche a disposizione degli Enti di gestione, in particolare per quanto riguarda i contributi pubblici. È necessario quindi individuare soluzioni che permettano di ridurre i consumi attuali e di sfruttare le risorse naturali disponibili, garantendo allo stesso tempo la corretta conservazione del valore artistico e culturale degli edifici e delle opere d'arte presenti al loro interno.

In questo filone di ricerca, ENEA, in collaborazione con alcune Università e Istituti di ricerca, ha proposto una serie di iniziative volte a realizzare all'interno del Parco della Villa Reale di Monza uno studio analitico delle possibili azioni che si possono intraprendere. Lo scopo finale è la realizzazione di alcuni dimostratori che consentiranno di evidenziare quali possono essere gli interventi da effettuare, come ad esempio la realizzazione di sistemi di generazione basati su energie rinnovabili (fotovoltaico, idroelettrico, uso di biomasse, geotermico, ecc.), insieme ai possibili interventi di restauro sostenibile per aumentare l'efficienza energetica e ridurre i consumi del sistema edificio, sempre all'interno dei vincoli normativi.

Per poter valutare i possibili vantaggi che si possono ottenere dall'adozione delle soluzioni identificate, è necessario definire un insieme di **indicatori prestazionali** in grado di fornire una valutazione degli ambienti interni cercando il giusto compromesso tra le diverse esigenze: efficienza energetica, comfort ambientale e corretta conservazione delle opere d'arte presenti. Questo documento descrive un sistema di indicatori prestazionali per la Villa Reale di Monza, coerente con approcci sviluppati nell'ambito del 7° Programma Quadro di ricerca della Comunità Europea.

L'applicazione dell'insieme di indicatori alla Villa Reale di Monza permetterà di validare il sistema in un contesto storico-culturale ad alto valore aggiunto, con un interesse particolare verso il Primo Piano Nobile dell'Ala Sud. È stata scelta quest'area poiché è quella ad uno stadio di restauro più avanzato ed è praticamente pronta per ospitare mostre (sia permanenti sia temporanee) aperte al pubblico. I risultati ottenuti in questa parte dell'edificio potranno essere utilizzati per identificare le priorità di intervento nel completamento delle opere di restauro e nella progettazione ed esecuzione dei lavori nelle rimanenti aree ancora da restaurare.

La prima azione da svolgere è quindi quella di capire nel dettaglio qual è il contesto di lavoro e, soprattutto, quali sono i requisiti prestazionali richiesti. Il Capitolo 0 descrive il contesto fornendo alcuni cenni storici e una descrizione delle necessità in termini di efficienza energetica, analizzando i dati a disposizione relativi anche agli impianti attualmente presenti. Il Capitolo 0 contiene la descrizione del sistema di indicatori utilizzato per la valutazione delle ambiente interno della Villa Reale. Per ogni indicatore è fornita la sua descrizione, la sua importanza nel contesto dei beni culturali, le modalità di valutazione e, ove possibile, una caratterizzazione dei livelli prestazionali che si possono raggiungere.

Il Capitolo 0 estende il sistema di indicatori con alcuni parametri specifici relativi al comportamento termico del primo piano nobile dell'ala sud della Villa Reale di Monza. Il capitolo contiene la descrizione delle caratteristiche di un modello tri-dimensionale che può essere utilizzato per analizzare in dettaglio il comportamento termico, consentendo inoltre di effettuare alcune simulazioni per comprendere l'impatto dell'uso di soluzioni innovative sul comportamento globale. Il Capitolo 0 illustra la valutazione attuale del Primo Piano Nobile dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza secondo il sistema di indicatori definito, validando ed ottimizzando il sistema al contesto degli edifici di pregio con forte interesse storico e culturale. In questo capitolo è anche compresa un'analisi dettagliata delle condizioni microclimatiche che si trovano all'interno dei vari ambienti sulla base dei dati di monitoraggio raccolti e messi a disposizione del personale del Consorzio che attualmente gestisce la Villa.

Infine, il Capitolo 0 illustra alcune priorità di intervento per migliorare le prestazioni dell'ambiente interno, fornendo anche spunti e specifiche tecniche che potranno essere utilizzate all'interno dei capitolati di gara quando dovranno essere emessi i bandi relativi alle opere di miglioramento ambientale o come linee guida nella definizione dei lavori da eseguire nelle altre aree della Villa che non sono ancora state sottoposte a interventi di restauro.

DEFINIZIONE DEI REQUISITI

Lo studio del contesto di applicazione è essenziale per la valutazione prestazionale del sistema edificio e per la definizione dei requisiti di efficienza energetica. A tale scopo il paragrafo si propone di analizzare le informazioni relative alla storia dell'edificio, agli oggetti e agli elementi architettonici con valore storico culturale in essi contenuti, alle caratteristiche dell'edificio e degli impianti e alle modalità di impiego. Le informazioni ottenute permetteranno di individuare e studiare, attraverso il confronto con la normativa vigente, i parametri che influiscono sulla qualità dell'edifici.

Per quanto riguarda l'identificazione della tipologia e i caratteri dell'edificio, nonché la valutazione delle modalità d'impiego che esso può avere, si fa riferimento ai contenuti del capitolo 1.

STRUTTURA E IMPIANTI DELL'ALA SUD

L'ala Sud della Villa Reale di Monza (Figura 1) è composta da un piano terreno e due piani nobili intervallati da altrettanti piani ammezzati, impiegati in passato dalla servitù. Le stanze sono molto luminose grazie alla presenza di numerose finestre presenti a distanze regolari. La maggior parte delle finestre affacciano sui lati nord e sud mentre alcune altre affacciano sui lati ovest, tra cui la grande finestra del corridoio del primo piano nobile, ed est.

Figura 1: Ala Sud della Villa Reale di Monza

Non ci sono altri edifici nelle immediate vicinanze oltre a quelli appartenenti al complesso monumentale della Villa. Lo stesso complesso però, essendo composto da tre elementi posti perpendicolarmente tra loro (forma a U), in alcune ore della giornata crea ombre sull'Ala Sud della Villa. Vi sono inoltre alcune piante poste nella parte retrostante dell'edificio che, in alcune ore della giornata, fanno ombra su alcune finestre dell'Ala Sud della Villa.

In via generale la Lombardia, regione nella quale è situata Monza, può essere identificata come un clima temperato continentale dove gli inverni sono abbastanza piovosi e rigidi, le mezze stagioni umide, brevi e miti e le estati afose e temporalesche.

Monza può essere classificata come zona climatica E (www.tuttitalia.it) secondo il D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993 e successive modifiche ed integrazioni. Tale decreto permette di stabilire la durata giornaliera di attivazione ed i periodi di accensione degli impianti termici, secondo la zona climatica di appartenenza, allo scopo di contenere i consumi di energia. In particolare per Monza il periodo di accensione degli impianti termici è permesso dal 15 ottobre al 15 aprile, salvo ampliamenti disposti dal Sindaco, per un massimo di 14 ore giornaliere.

Relativamente agli impianti termici della Villa Reale, sono presenti sistemi di ventilazione a pavimento in prossimità delle finestre dell'edificio (Figura 2) e un sistema di monitoraggio continuo della temperatura per controllare la ventilazione e il riscaldamento dell'edificio.

Non è presente un controllo attivo dell'umidità ma recentemente è stato attivato il teleriscaldamento che ha permesso di diminuire indirettamente la percentuale di umidità presente nell'edificio e le conseguenze associate (muffe, ecc.).

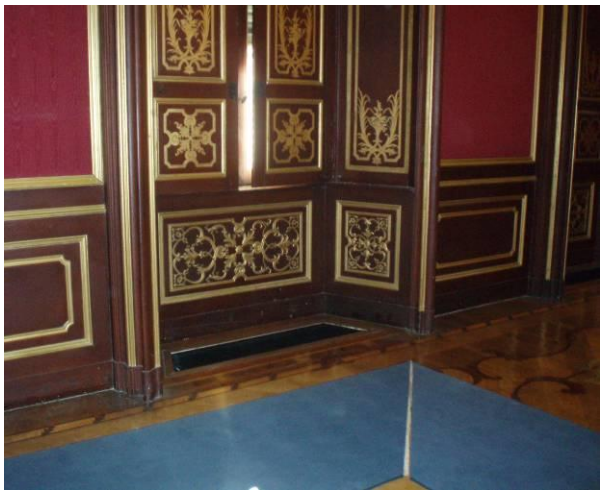


Figura 2: Sistema di ventilazione a pavimento

4.1 SISTEMA DI INDICATORI

INTRODUZIONE

Spesso, quando si va valutare la qualità di un edificio, si prendono in considerazione solamente gli aspetti di maggior interesse legati alle destinazione d'uso. Questo approccio presenta però la forte controindicazione di tralasciare le eventuali conseguenze che scelte e soluzioni per il miglioramento di un singolo aspetto possono avere sulle prestazioni complessive della struttura. È necessario perciò identificare un sistema di indicatori che tenga in considerazione tutti i principali aspetti relativi alle prestazioni qualitative di un edificio, fornendo una visione globale che può essere d'aiuto per chi ha la responsabilità della gestione di una struttura nell'identificare quali possono essere i punti critici e le priorità di intervento.

Il discorso è particolarmente importante in edifici di pregio con una forte rilevanza storica e culturale, in quanto, in questi casi, sono presenti forti vincoli e limitazioni sulle possibili azioni che si possono effettuare. Una visione d'insieme permette quindi di determinare in modo corretto quali sono gli interventi migliorativi possibili che non compromettono le caratteristiche di unicità e di pregio dell'edificio. Il caso della Villa Reale, con la sua importanza dal punto di vista culturale rappresenta un contesto ideale per la definizione e lo sviluppo di un tale sistema di indicatori, sulla base dei requisiti descritti nel Capitolo 0.

A livello italiano, un esempio di sistema di indicatori prestazionali per gli edifici è rappresentato dal **protocollo ITACA**, il cui piano nazionale è stato approvato il 21 aprile 2011. Tale protocollo si propone di eseguire una valutazione della sostenibilità energetico e ambientale degli edifici, attraverso una serie di criteri (chiamati anche tematiche di valutazione), per ognuno dei quali sono stati definiti modalità di valutazione e livelli prestazionali. Le categorie principali sulle quali si articola il protocollo ITACA sono:

- *Qualità del sito*, attraverso la quale si analizzano le caratteristiche del luogo in cui è stato costruito (o sarà costruito) l'edificio.
- *Consumo di risorse*, che valuta l'impatto dell'edificio dal punto di vista energetico e di consumo di risorse (acqua, materiali utilizzati per la costruzione, ecc.) in confronto con le prestazioni dell'involucro per quanto riguarda i comportamenti termici.
- *Carichi ambientale*, analizzando le emissioni e la produzione di rifiuti durante la fase operativa dell'edificio, valutando quindi l'impatto sull'ambiente circostante.
- *Qualità ambientale indoor*, verificando i parametri ambientali relativi al comfort delle persone all'interno dei locali che costituiscono l'edificio.
- *Qualità del servizio*, che permette di valutare aspetti maggiormente relativi alla gestione dell'edificio tramite l'utilizzo di sistemi automatici e il mantenimento delle prestazioni dell'involucro nel tempo (aspetti di tipo manutentivo).

Il protocollo ITACA è nato principalmente per edifici di tipo residenziale, sia considerando quelli di nuova costruzione, sia per quanto riguarda la ristrutturazione di quelli già esistenti. Nell'ultimo piano nazionale è stata estesa la sua applicazione anche agli edifici ad uso ufficio e in un prossimo futuro, l'approccio sarà esteso anche ad altre tipologie (scuole, aree industriali ed edifici commerciali).

Un altro approccio sviluppato in Italia è quello proposto dall'**Agenzia CasaClima**, che ha lo scopo di promuovere l'adozione di metodologie di costruzione in grado di fornire una risposta alle esigenze di risparmio energetico e protezione ambientale. Questo sistema definisce una serie di criteri di valutazione delle metodologie e dei materiali adottati durante la fase di costruzione o di restauro dell'edificio, arrivando a definire classi prestazionali sulla base dell'Efficienza Energetica dell'Involucro e fornire una certificazione energetica.

Tuttavia questi approcci sono stati sviluppati tenendo in considerazione principalmente i contesti di tipo residenziale oppure terziario, mentre sono escluse le problematiche relative agli edifici storico-culturali soggetti ai vincoli relativi alla conservazione del patrimonio, sia per quanto riguarda la struttura delle costruzioni, sia per quanto concerne le opere d'arte e altri oggetti di valore presenti all'interno dell'edificio.

Un sistema di indicatori più ad ampio spettro è rappresentato dall'approccio orientato ai Key Indoor Performace Indicator (KIPI), sviluppato anche nell'ambito della ricerca europea (7° Programma Quadro). Questo approccio è stato sviluppato tenendo in considerazione la possibile applicazione a diverse tipologie di edificio (uffici, residenziale, ospedali, ecc.) e il tema dell'efficienza energetica è affrontato solo marginalmente in quanto sono evidenziati alcuni aspetti, tralasciando però il tema dei consumi. Tuttavia, la capacità di affrontare in modo globale le problematiche relative alle prestazioni di un edificio permettono di usare questo approccio come base di sviluppo per il nuovo sistema di indicatori che sarà utilizzato all'interno del processo di valutazione, adattandolo al contesto in esame, selezionando gli indicatori maggiormente pertinenti al contesto degli edifici storico-culturali e integrandolo con indicatori specifici riguardanti l'efficienza energetica.

Questo capitolo si occupa di definire gli indicatori prestazionali sulla base del KIPI frame work, mentre il capitolo 0 descriverà in modo dettagliato il processo di definizione degli indicatori relativi al comportamento termico dell'edificio.

DEFINIZIONE INDICATORI

Si possono identificare due principali categorie di indicatori prestazionali:

1. **Qualità ambientale**. Questa categoria comprende tutti i parametri che influiscono sulla qualità dell'aria e il comfort ambientale, declinato sia per quanto riguarda il benessere delle persone sia per la corretta conservazione del patrimonio artistico e il valore culturale. Gli indicatori specifici all'interno di questa categoria sono:

    a. Temperatura
    b. Umidità relativa
    c. Presenza di gas
    d. Illuminazione
    e. Comfort acustico

2. **Safety**. Questa categoria si riferisce a quegli aspetti che rendono l'ambiente sicuro, garantendo un'adeguata protezione delle opere contenute all'interno, il rispetto delle normative nazionali relative a edifici che possono essere aperti al pubblico (come il caso degli edifici di pregio ospitanti mostre temporanee) e sicurezza contro furti o vandalismi. Gli indicatori specifici all'interno di questa categoria sono:

    a. Sicurezza ambientale
    b. Rispetto della normativa
    c. Livello di protezione del valore culturale
    d. Sicurezza materiale

3. **Gestione dell'edificio**. La terza categoria si riferisce principalmente ad aspetti gestionali, che possono favorire la fruizione da parte del pubblico dell'edificio, insieme ad alcuni aspetti che riguardano maggiormente la manutenzione.

    a. Accessibilità
    b. Orientamento
    c. Versatilità
    d. Servizi e affini
    e. Facilità di pulizia
    f. Facilità di manutenzione

In Figura 3 è mostrata una rappresentazione grafica degli indicatori definiti. Nei capitoli successivi, saranno analizzati in maggior dettaglio i diversi indicatori, e, per ognuno di essi, sarà fornita una breve descrizione associata alla motivazione per cui l'indicatore è stato scelto e la sua importanza all'interno del processo di valutazione della qualità dell'edificio.

Figura 3: Sistema di indicatori prestazionali per la valutazione dell'edificio

QUALITÀ AMBIENTALE

Gli aspetti della qualità ambientale prendono in considerazione la valutazione di diversi parametri riguardanti il comfort e la salubrità degli ambienti. Il primo aspetto fondamentale in questo ambito è la valutazione delle grandezze termo igrometriche (temperatura e umidità relativa) che hanno una forte influenza sul comfort delle persone che si trovano all'interno dell'edificio, ma che rivestono una fondamentale importanza nella definizione di un ambiente adatto alla corretta conservazione di opere d'arte. Per garantire un ambiente confortevole per le persone, si devono considerare altri due fattori ulteriori: il livello di illuminazione e la quantità di rumore presenti. Luci e suoni sono infatti due possibili sorgenti di disturbo per chi deve trascorrere tempo in un ambiente confinato. Inoltre, un'eccessiva illuminazione potrebbe causare danni significativi alle opere d'arte. Ultimo aspetto da valutare, ma non meno importante degli altri, è la qualità dell'aria, intesa soprattutto come analisi della presenza di gas nocivi o infiltrazioni dall'ambiente esterno.

Temperatura

Uno dei parametri più intuitivi che consentono di ottenere una valutazione della qualità ambientale e del relativo comfort è la **Temperatura** che si può riscontrare nei vari locali. La temperatura riveste un ruolo primario per la valutazione del benessere delle persone che si trovano all'interno dell'edificio: una temperatura troppo alta oppure troppo bassa, oltre a rappresentare un potenziale problema per la salute, potrebbero avere influenza sull'umore, non consentendo di fruire appieno delle potenzialità del patrimonio artistico presenti. Allo stesso tempo la temperatura è uno dei principali parametri da tenere in considerazione quando si va a valutare la congruità di un ambiente per ospitare opere d'arte.

Nel caso delle persone, è necessario garantire che la temperatura sia mantenuta all'interno dell'intervallo di comfort nei momenti in cui esse sono presenti all'interno dei diversi locali Questo discorso, però, non vale quando ci si riferisce alle opere d'arte, che sono posizionate nei vari ambienti per lunghi periodi di tempo (nel caso di collezioni permanenti si può parlare anche di anni). In questo caso, è necessario garantire non solo che i valori di temperatura siano all'interno di determinati intervalli (che variano a seconda della tipologia di opera), ma anche che non ci siano sbalzi significativi nel tempo di questa grandezza (l'entità ammissibile di sbalzo, oltre che dalla tipologia di opera, è determinata anche dal suo stato di conservazione). Inoltre, è necessario ricordare che spesso si deve trovare un compromesso tra i differenti requisiti imposti dalle normative per una corretta conservazione, i quali in alcuni casi sono incompatibili tra tipologie di opere diverse.

È possibile valutare la temperatura in modalità qualitativa andando a considerare la percentuale di persone non soddisfatte (PPD – Percentage of People Dissatisfied). Questa modalità permette di avere una valutazione di massima della condizione presente, permettendo di scoprire se esistono criticità e andando ad effettuare analisi più accurate in un secondo momento per determinare con precisione quali sono le eventuali problematiche presenti. Se si tratta di valutare un ambiente in cui sono presenti opere d'arte, è necessario fare misurazioni più precise per verificare il rispetto dei vincoli normativi. Esistono diverse modalità per misurare questo dato.

- *Dispositivi portatili stand-alone*. Questi dispositivi permettono di eseguire misurazioni molto puntuali riguardo i valori di temperatura presenti nell'ambiente, nelle diverse aree di interesse, semplicemente spostando lo strumento per la rilevazione. Questo approccio permette di effettuare solamente misure puntuali e fortemente dipendenti dalle condizioni in cui si stanno effettuando le misurazioni.

- *Datalogger*. I datalogger sono in grado di misurare periodicamente la temperatura nel punto in cui sono posizionati e memorizzare il valore in una memoria interna. I dati potranno poi essere recuperati in un secondo momento per essere analizzati. Tramite questi strumenti è possibile ricreare un profilo temporale dell'andamento della temperatura nel lungo periodo, scoprendo però eventuali criticità che si sono verificate durante la misura con un certo ritardo.

- *Reti di sensori wireless*. Il sistema di misurazione più recente è basato su dispositivi alimentati a batteria, in grado di misurare la temperatura e trasmettere il dato via radio a un centro di controllo remoto, permettendo di avere un monitoraggio in tempo reale. Presso il centro di controllo sarà possibile effettuare analisi più approfondite (in modo simile a ciò che avviene con l'utilizzo dei datalogger), ma soprattutto reagire prontamente a possibili problemi che si potranno verificare.

Per valutare in modo opportuno questo indicatore, è necessario definire i livelli prestazionali. In Tabella 2 sono rappresentati tali livelli, sia nel caso di una valutazione qualitativa (basata su PPD), sia nel caso di misurazioni effettuate (indipendentemente dallo strumento utilizzato per raccogliere i dati).

Tabella 2: Livelli prestazionali per l'indicatore Temperatura

Livello	Valutazione Qualitativa (PPD)	Valutazione Quantitativa (Misurazioni)	
		Valori	Escursioni termiche
A	PPD <= 1%	Tutti i valori di temperatura all'interno dei limiti normativi	Assenza di brusche escursioni termiche
B	PPD <= 5%	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 5%	Presenza di isolate escursioni termiche (meno di una al mese)
C	PPD <= 10%	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 10%	Presenza di periodiche escursioni termiche (a cadenza mensile)
D	PPD <= 20%	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 20%	Presenza di periodiche escursioni termiche (a cadenza settimanale)
E	Altro	Scostamento dai limiti normativi superiore al 20%	Presenza di periodiche escursioni termiche (a cadenza giornaliera)

Umidità Relativa

Oltre alla temperatura, un altro parametro fondamentale per la valutazione della qualità ambientale all'interno dell'edificio è rappresentato dall'**Umidità Relativa**. Questo parametro può avere un forte impatto sulla sensazione di benessere delle persone, soprattutto nelle stagioni più calde, dove un elevato valore di umidità relativa rende difficoltosa la traspirazione. In particolare, con elevati livelli d umidità relativa, la temperatura percepita da chi si trova nell'edificio risulta essere decisamente superiore alla temperatura reale (misurata), diminuendo il comfort ambientale. Nelle stagioni fredde, invece, un ambiente troppo umido può avere conseguenze sulla salute.

L'umidità relativa ha anche una forte influenza sulle condizioni di conservazione del patrimonio artistico presente in un edificio. In questo caso, un'umidità relativa troppo alta può provocare l'insorgenza di muffe (su arredi, dipinti, tappezzerie, ecc.) oppure di efflorescenze su elementi strutturali, quali pareti. Anche un tasso troppo basso di umidità, però, potrebbe avere conseguenze sulle opere, in quanto si rischierebbe di renderle troppo "secche" e quindi molto fragili, aprendo la via a possibili danneggiamenti fisici (es. presenza di micro-fratture che possono preludere a danni strutturali maggiori). Come nel caso della temperatura, è quindi necessario fare in modo che l'umidità relativa di un ambiente sia compatibile con le caratteristiche del patrimonio artistico presente al suo interno, tenendo in debita considerazione il comfort delle persone.

I sistemi di valutazione dell'umidità relativa sono praticamente gli stessi utilizzati per la valutazione della temperatura, sia per quanto riguarda la valutazione qualitativa tramite l'analisi della PPD, sia per quanto riguarda una misurazione effettiva della percentuale di umidità relativa presente nei diversi locali. Infatti, lo sviluppo tecnologico recente ha portato a integrare all'interno dello stesso strumento sensori di temperatura e di umidità relativa, fornendo all'utilizzare finale un dispositivo compatto e a basso costo in grado di effettuare con una sufficiente precisione le misurazioni

richieste. Questi sensori integrati possono poi essere inseriti nelle stesse tipologie di strumenti di misura descritti nel paragrafo 0 relativamente alla temperatura: dispositivi stand-alone, data logger, reti wireless di sensori.

I livelli prestazionali relativi alla valutazione dell'umidità relativa sono schematizza in Tabella 3.

Tabella 3: Livelli prestazionali per l'indicatore Umidità Relativa

Livello	Valutazione Qualitativa (PPD)	Valutazione Quantitativa (Misurazioni)	
		Valori	Escursioni igrometriche
A	PPD <= 1%	Tutti i valori di umidità relativa all'interno dei limiti normativi	Assenza di brusche escursioni igrometriche
B	PPD <= 5%	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 5%	Presenza di isolate escursioni igrometriche (meno di una al mese)
C	PPD <= 10%	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 10%	Presenza di periodiche escursioni igrometriche (a cadenza mensile)
D	PPD <= 20%	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 20%	Presenza di periodiche escursioni igrometriche (a cadenza settimanale)
E	Altro	Scostamento dai limiti normativi superiore al 20%	Presenza di periodiche escursioni igrometriche (a cadenza giornaliera)

Presenza di Gas

Mescolati nell'aria si possono trovare numerosi gas, che potrebbero rappresentare un pericolo per le persone e per le opere d'arte. Ciò potrebbe accadere se la loro concentrazione supera determinati livelli che favoriscano reazioni chimiche in grado di sviluppare componenti nocivi e corrodere o danneggiare i materiali costituenti le opere. È necessario quindi valutare la **Presenza di Gas** all'interno dei diversi locali per garantire la sicurezza di opere e visitatori.

I gas principali da considerare sono l'anidride solforosa (SO_2) e il biossido di azoto (NO_2), anche se altri gas potrebbero rappresentare una minaccia per il patrimonio artistico (es. formaldeide). La scelta di considerare SO_2 e NO_2 è dettata principalmente dalla considerazione che si tratta di due contaminanti molto comuni, soprattutto in zone dove l'inquinamento atmosferico esterno presenta valori particolarmente elevati. La Villa Reale di Monza, pur essendo immersa in un parco naturale, si trova in un'area fortemente industrializzata, pertanto il rischio di infiltrazioni dall'esterno di gas nocivi è una minaccia da considerare per valutare la conservazione delle opere.

Esiste poi una seconda motivazione, molto più pratica: in commercio è facile trovare strumentazione in grado di fornire una valutazione sufficientemente accurata della concentrazione di questi gas nell'aria a costi contenuti, mentre è molto più difficile compiere valutazioni accurate su composti organici volatili, quali la formaldeide. In futuro, si potrà provvedere ad una revisione di questo indicatore, andando a considerare anche altre tipologie di gas attualmente non valutate, per meglio venire incontro alle esigenze finali della valutazione.

Oltre alle misurazioni, è possibile stimare il pericolo derivante dalla presenza di tali gas nei diversi locali andando a verificare la presenza di possibili sorgenti o infiltrazioni di gas dall'esterno e verificare la presenza di accorgimenti e/o impianti tecnologici in grado di modificare la loro concentrazione. Ad esempio, la prassi di aprire periodicamente le finestre può rappresentare un metodo efficace per la riduzione della concentrazione di gas pericolosi nell'ambiente se sono presenti sorgenti interni, mentre, in caso di forte inquinamento esterno, l'apertura potrebbe risultare dannosa.

Un discorso a parte la merita l'anidride carbonica (CO_2). In alte concentrazioni, anch'essa può rappresentare un pericolo per la corretta conservazione delle opere d'arte presenti. Anche in questo caso valgono gli stessi principi descritti per le atre tipologie di gas, ma bisogna ricordare

che l'anidride carbonica è uno dei prodotti di scarto della respirazione umana, per cui è possibile tenere sotto controllo questo parametro limitando in modo opportuno la presenza dei visitatori all'interno dell'edificio. Lo studio del numero ottimale di visitatori rappresenta un interessante argomento di ricerca, che esula dal contesto in esame in questo progetto.

I livelli prestazionali relativi alla valutazione della presenza di gas, con riferimento a quanto descritto in precedenza, sono schematizzati in Tabella 4. Come nei casi di temperatura e umidità relativa è possibile fare una valutazione qualitativa (basata sulla percezione delle persone e sull'analisi dei sistemi di ventilazione)

Tabella 4: Livelli prestazionali per l'indicatore Presenza di Gas[1]

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Nessun reclamo. Ottimi sistemi di riciclo aria e ventilazione. Assenza di possibili formazioni o infiltrazioni di gas nocivi	CO_2 < 750 ppm SO_2 < 0,1 ppm[2] NO_2 < 2 ppm[3]
B	Numero di reclami contenuto. Sistema di ventilazione adeguato. Sporadica presenza di gas nocivi.	CO_2 < 900 ppm SO_2 < 0,4 ppm NO_2 < 5 ppm
C	Numero di reclami solo accettabile. Sistema di ventilazione sufficiente. Basso rischio di formazione o infiltrazione di gas.	CO_2 < 900 ppm SO_2 < 2,5 ppm NO_2 < 10 ppm
D	Significativa presenza di reclami. Sistema di ventilazione non sufficiente. Medio rischio di formazione o infiltrazione di gas.	CO_2 < 1200 ppm SO_2 < 4 ppm NO_2 < 20 ppm
E	Elevata presenza di reclami. Assenza di un sistema di ventilazione. Alto rischio di formazione o infiltrazione di gas	CO_2 > 1200 ppm SO_2 < 10 ppm NO_2 < 30 ppm

All'interno della tabella sono indicati i livelli per ogni differente aspetto. Il livello finale per l'indicatore sarà il valor medio tra le valutazioni ottenute singolarmente.

Illuminazione

Un aspetto molto importante per la corretta conservazione del patrimonio artistico (soprattutto per quanto riguarda gli oggetti mobili, arredi e altre opere d'arti presenti all'interno di edifici di pregio) è rappresentato dal livello di **Illuminazione**. Oltre alla luce visibile, si deve considerare anche il possibile impatto delle radiazioni ultraviolette ed infrarosse sui diversi materiali.

Spesso gli impianti di illuminazione presenti negli edifici non sono stati studiati e progettati tenendo conto delle esigenze di conservazione del patrimonio culturale. Tali impianti presentano al loro interno lampade che garantiscano una buona illuminazione per le persone, ma che, sul lungo periodo, possono provocare danni agli oggetti o ad altri elementi con valore artistico all'interno dell'edificio. Si possono verificare danni importanti visibili a occhio nudo (ad esempio scolorimento), oppure si possono innescare processi "nascosti", quali reazioni chimiche in grado di danneggiare la struttura dei materiali, che portano a rilevare il danno quando ormai la situazione è irrimediabilmente compromessa.

La valutazione del livello di illuminazione non si può basare solamente sull'analisi degli impianti, ma deve tenere in considerazione anche la quantità di luce naturale presente nelle varie stanze. Se da un lato la presenza di ampie vetrate permette di ridurre i consumi per illuminare i locali, le

[1] Valori risultanti da una media settimanale

2 I limiti sono tratti dal Progetto Europeo del 5 Programma Quadro "Preventive Conservation Strategies for Protection of Organic Objects in Museums, Historic Buildings and Archives"

3 I limiti sono tratti dal Progetto Europeo del 5 Programma Quadro "Preventive Conservation Strategies for Protection of Organic Objects in Museums, Historic Buildings and Archives"

stesse possono rappresentare un potenziale pericolo se le opere d'arte presenti in tali spazi sono particolarmente sensibili.

Si sta diffondendo una maggiore sensibilità al problema, tanto che nella progettazione dei percorsi espositivi sono introdotti studi di illuminotecnica per capire quali possono essere le soluzioni migliori coniugando le esigenze espositive con le esigenze di corretta conservazione degli oggetti.

Questo indicatore si può quindi quantificare valutando il livello di illuminazione presente nei diversi locali, verificando che i valori ottenuti siano compresi negli intervalli previsti dalle normative per la conservazione delle opere presenti all'interno delle stanze. Tale misurazione si può effettuare mediante sonde apposite, cercando di posizionarle il più possibile nelle vicinanze delle opere. A questa valutazione deve essere affiancata una valutazione di tipo maggiormente qualitativa in grado di valutare l'impianto di illuminazione presente (tipologia di lampade, presenza di filtri di protezione contro gli ultravioletti, ecc.), la presenza e la procedura di apertura delle finestre per una valutazione dell'impatto della luce naturale.

La Tabella 5 contiene una descrizione dei livelli prestazionali per quanto riguarda la valutazione del livello di illuminazione all'interno di edifici di pregio contenente opere d'arte e altri oggetti di elevato valore storico e culturale.

Tabella 5: Livelli prestazionali per l'indicatore Illuminazione

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Sistema di illuminazione ottimizzato per le esigenze espositive. Presenza di filtri in grado di schermare UV e IR da lampade e dall'esterno. Assenza di luce solare diretta su oggetti fotosensibili	Valori di illuminazione all'interno dei limiti normativi
B	Sistema di illuminazione con filtri in grado di schermare UV e IR da lampade. Luce solare diretta su oggetti fotosensibili molto limitata nel tempo.	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 5%
C	Sistema di illuminazione senza filtri in grado di schermare UV e IR da lampade e dall'esterno. Luce solare diretta su oggetti fotosensibili limitata nel tempo.	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 10%
D	Sistema di illuminazione inadatto alle esigenze espositive. Presenza quasi costante di luce solare diretta su oggetti fotosensibili.	Scostamento dai limiti normativi inferiore al 20%
E	Sistema di illuminazione assente o fortemente inadatto. Nessun controllo sulla luce solare in entrate nei locali	Scostamento dai limiti normativi superiore al 20%

All'interno della tabella, per quanto riguarda la valutazione qualitativa, sono indicati i livelli per ogni differente aspetto. Il livello finale per l'indicatore sarà il valor medio tra le valutazioni ottenute singolarmente.

Comfort Acustico

Il **Comfort Acustico** riveste un'importanza marginale per quanto riguarda la conservazione del patrimonio artistico. Assume invece un ruolo fondamentale nella determinazione di un ambiente confortevole per le persone che lavorano all'interno dell'edificio o lo visitano, in quanto la rumorosità degli ambienti può causare un disturbo e limitare la produttività delle persone (in caso di lavoratori) o la fruizione del patrimonio culturale (nel caso di visitatori di mostre temporanee o permanenti).

In particolare, si possono considerare la presenza di possibili sorgenti esterne di rumore e analizzare quanto possono influire sul comfort interno. Alcuni esempi di sorgenti rumorose che possono creare disturbo all'interno di un edificio sono infrastrutture di trasporto (strade, aeroporti, ferrovie, ecc.), lavori pubblici che prevedano l'utilizzo di macchinari rumorosi (martello pneumatico, ecc.) oppure la presenza di strutture che normalmente non rappresentano un disturbo, ma che in casi particolari possono creare forti impatti acustici. È il caso dell'Autodromo Internazionale presente all'interno del Parco della Villa Reale di Monza, soprattutto nei giorni in cui sono in programma competizioni motoristiche.

Oltre alle possibili sorgenti esterne, devono essere valutate anche la presenza di possibili elementi presenti all'interno di un edificio in grado di causare un rumore fastidioso per le persone. Il caso tipico è rappresentato dagli impianti di ventilazione e/o condizionamento dell'aria che, nei momenti di funzionamento, potrebbero risultare rumorosi e compromettere la corretta fruizione da parte del pubblico del patrimonio artistico (ad esempio, la mancata comprensione delle spiegazioni delle guide). In alcuni casi, potrebbero essere allestite mostre con percorsi multimediali disturbati dalla presenza di rumori di sottofondo (esterni o derivanti dagli impianti esterni), ma che potrebbero anche diventare a loro volta fastidiosi, nel caso in cui i contenuti audiovisivi fossero trasmessi a un volume inappropriato all'ambiente.

Questo indicatore può essere valutato in modo qualitativo analizzando la presenza di possibili sorgenti rumorose esterne ed interne all'edificio insieme alle proprietà di isolamento acustico degli infissi e degli impianti presenti. In parallelo è possibile valutare il comfort acustico analizzando qual è la percentuale di persone non soddisfatte, con le stesse modalità come si può procedere per la valutazione qualitativa della temperatura.

In Italia sono presenti alcune normative che regolano l'inquinamento acustico e la determinazione e la gestione del rumore ambientale. In particolare, si deve fare riferimento al D.Leg. n. 194 del 19 agosto 2005 relativo alla "Attuazione della direttiva 2002/49/CE per la determinazione e alla gestione del rumore ambientale" e alla legge n.447 del 26/1995, e successive modificazioni che rappresenta la Legge Quadro sull'inquinamento acustico. Queste normative, insieme al DPCM del 14/11/1997 ("Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore"), e al Decreto del Ministero dell'Ambiente del 16/03/1998 ("Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico"), permettono di identificare quali sono i valori limiti che non devono essere superati. È stata altresì introdotta una classificazione delle aree urbane a seconda della tipologia di costruzione e attività che sono svolte, e per ognuna di queste classi sono stati definiti limiti differenti. Quando si procede a una valutazione quantitativa del rumore presente all'interno di un edificio, è necessario quindi prima procedere all'identificazione della classe urbana e successivamente procedere a opportune misurazioni per verificare il pieno rispetto dei limiti richiesti. Le normative si riferiscono a livelli continui equivalenti di pressione sonora ponderata "A", utilizzando quindi l'unità di misura dB(A).

La Tabella 6 descrive i livelli prestazionali definiti per quanto riguarda questo indicatore.

Tabella 6: Livelli prestazionali per l'indicatore Comfort Acustico

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Assenza di sorgenti esterne di rumore. Ambiente perfettamente insonorizzato. Impianti a bassissime emissioni di rumore. PPD <= 1%	Valori di rumore all'interno dei limiti normativi
B	Presenza di occasionali rumori che non disturbano le attività nell'edificio. Impianti adeguatamente insonorizzati. PPD <= 5%	Scostamento dai limiti normativi inferiore a 1 dB(A)
C	Presenza accettabile di rumorosità proveniente dall'esterno. Insonorizzazione degli impianti presente, ma da migliorare. PPD <= 10%	Scostamento dai limiti normativi inferiore a 3 db(A)

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
D	Presenza di sorgenti di rumore sia esterne che interne. Scarsa insonorizzazione degli impianti presenti. PPD <= 20%	Scostamento dai limiti normativi inferiore a 5 db(A)
E	Presenza di forti sorgenti di rumore sia esterne che interne. Difficoltà a comprendere il parlato all'interno dell'edificio Altro	Scostamento dai limiti normativi inferiore a 10 db(A)

All'interno della tabella sono indicati i livelli per ogni differente aspetto. Il livello finale per l'indicatore sarà il valor medio tra le valutazioni ottenute singolarmente.

SAFETY

Il capitolo 0 presenta una descrizione di indicatori prestazionali relativa alla qualità ambientale che deve essere garantita per assicurare la corretta conservazione del patrimonio artistico e il comfort delle persone, aumentando il livello di fruizione dell'edificio. Quando si parla di qualità ambientale, però, è necessario considerare anche altri aspetti, tra i quali la sicurezza gioca un ruolo importante. In questo caso, si parla di sicurezza soprattutto come Safety, andando a valutare i danni accidentali a persone e oggetti che si possono avere all'interno dell'edificio. Inoltre, è fondamentale garantire che le normative riguardanti gli edifici pubblici siano rispettate (sistema elettrico, sistema anti-incendio, ecc.). Un aspetto specifico che riguarda il patrimonio artistico è l'analisi dell'organizzazione degli spazi espositivi, non solo dal punto di vista delle condizioni ambientali descritte precedentemente, ma valutando la presenza di accorgimenti atti a prevenire danni accidentali da parte dei visitatori. Anche la presenza di protocolli di manutenzione e gestione del patrimonio rappresenta uno strumento con cui accrescere il livello di Safety di un edificio.

Ultimo punto, ma non meno importante, riguarda la sicurezza contro furti o atti vandalici contro il patrimonio. Questo è un tema particolarmente complesso che esula dal contesto di questo documento, per cui l'analisi si limiterà semplicemente alla verifica della presenza di adeguati sistemi di allarme e protocolli di interventi, senza addentrarsi nella valutazione della loro efficacia.

Sicurezza Ambientale

Uno degli aspetti che contribuisce maggiormente a incrementare la fruizione dell'edificio è un ambiente sicuro nel senso che non presenti rischi per l'incolumità delle persone che si trovano a lavorare al suo interno oppure che siano semplicemente visitatori. Con ambiente sicuro si intende un luogo in cui non siano presenti, ad esempio, rischi di scivolamenti e/o cadute, oppure che non siano presenti ostacoli che possano costituire un inciampo. Da notare che in questo indicatori non sono considerati ostacoli considerate comunemente come barriere architettoniche, in quanto la loro analisi sarà oggetto dell'indicatore "Accessibilità" descritta nel Paragrafo 0. In questo contesto si fa riferimento al Decreto Legislativo n.81 del 09/04/2008 "Testo unico in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro", che regola le condizioni ambientali per garantire la sicurezza dei lavoratori, ma le cui disposizioni possono essere attuate per garantire anche la sicurezza dei visitatori.

Questo indicatore può essere valutato tramite un'accurata ispezione dei locali in esame, andando a identificare quali possono essere i possibili elementi a cui bisogna porre particolare attenzione. In particolare, è necessario considerare:

- Scale e gradini. I gradini delle scale devono presentare una superficie piana, non scivolosa e con un'altezza adeguata in modo da non costituire una difficoltà per le diverse persone che hanno accesso ai locali dell'edificio. Le scale devono essere accompagnate da un corrimano che faciliti sia la salita sia la discesa. Eventuali gradini singoli presenti devono essere ben segnalati per evitare cadute accidentali.

- Pavimenti. La pavimentazione deve essere il più possibile senza sconnessioni in grado di costituire un intralcio alla normale camminata delle persone.

- Elementi architettonici. Gli elementi architettonici all'interno dell'edificio, inclusi i soffitti, non devono comprendere parti pericolanti che potrebbero cadere e danneggiare sia le persone che si trovassero a transitare in quel momento, sia eventuali oggetti d'arte presenti.

- Oggetti appesi. Questa categoria comprende gli oggetti appesi alle pareti o posti su sostegni quali mensole o similari, che potrebbero rappresentare un rischio per le persone o per gli altri oggetti in caso di caduta, ma che non sono correlati alla struttura dell'edificio.

La

Tabella 7 contiene i livelli prestazionali per una valutazione qualitativa dell'indicatore Sicurezza Ambientale. Data la tipologia di indicatore, in questo caso risulta praticamente impossibile andare a definire una valutazione quantitativa a causa dei numerosi aspetti da andare a verificare, che comporterebbero un notevole aggravio di lavoro per il valutatore, senza fornire un reale vantaggio al processo di identificazione delle problematiche presenti.

Tabella 7: Livelli prestazionali per l'indicatore Sicurezza Ambientale

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Assenza di rischi in nessuna categoria	-
B	Presenza di rischi minori in una categoria	-
C	Presenza di rischi minori in almeno due categorie	-
D	Presenza di rischi importanti in una categoria e rischi minori nelle altre	-
E	Presenza di rischi importanti in almeno due categorie	-

Rispetto della Normativa

Uno degli aspetti più importanti per la sicurezza delle persone e degli oggetti conservati all'interno degli edifici di pregio è il **Rispetto delle Normative** vigenti, soprattutto per quanto riguarda gli impianti installati. Questo aspetto assume un'importanza ancora maggiore nel caso di edifici aperti al pubblico, come nel caso di musei o spazi per mostre temporanee, ma anche all'uso di edifici di pregio come sede di uffici pubblici.

Le categorie principali di normative da considerare sono:

- Normativa Antincendio: per quanto riguarda gli edifici storici, si fa riferimento al Decreto Ministeriale n.569 del 20/05/1992 "Norme di sicurezza antincendio per gli edifici storici e artistici destinati a musei, gallerie, esposizioni e mostre" e al Decreto del Presidente della Repubblica n.418 del 30/06/1995 "Norme di sicurezza antincendio per gli edifici di interesse storico-artistico destinati a biblioteche ed archivi", a seconda della destinazione d'uso finale. Per disposizioni più di carattere generale, non coperte dai Decreti citati in precedenza, si può deve fare riferimento al Decreto Ministeriale del 10/03/1998, "Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro".

- Presenza e segnalazione delle uscite di sicurezza: le uscite di sicurezza e i relativi percorsi per raggiungerli devono essere adeguatamente segnalati in modo da consentire la rapida evacuazione dell'edificio in caso di necessità. Le uscite di sicurezza devono essere realizzate in conformità alla normative vigenti (Decreto Legislativo n.81 del 09/04/2008 e successive integrazioni e modifiche, in aggiunta al Decreto Ministeriale del 10/03/1998, già citato in precedenza).

- Sicurezza elettrica: un'altra normativa fondamentale nell'ambito della gestione degli edifici riguarda gli impianti elettrici, a partire dalla legge quadro n.46 del 05/03/1990, e delle sue successive modifiche ed integrazioni fino a giungere al Decreto del ministero dello sviluppo economico n.37 del 22/01/2008.

- Sicurezza strutturale: molto importante è anche la normativa riguardante la sicurezza strutturale dell'edificio, come ad esempio la parte riguardante il calcolo dei carichi (Decreto Ministeriale del 16/01/1996 e successive modificazioni e integrazione) e quella relativa alla sicurezza costruttiva in zone sismiche.

A seconda delle possibili destinazione d'uso dei locali, con riferimento in particolare alla fornitura di servizi al pubblico, si dovrà poi tener conto delle normative specifiche. Ad esempio, la presenza di eventuali punti di ristoro richiede il rispetto delle normative di igiene e sicurezza alimentari che regolamentano la somministrazione di cibi e bevande al pubblico. In alcuni casi potrebbe essere utile andare a verificare la rispondenza alla normativa riguardante l'elettrosmog, non tanto per quanto riguarda il controllo delle emissioni, ma per verificare l'eventuale inquinamento elettromagnetico proveniente da sorgenti esterne, localizzate nei pressi dell'edificio.

La valutazione di questo indicatore si basa quindi sulla verifica che l'edificio sia rispondente alle tre categorie principale identificate in precedenza, e a tutte quelle specifiche relative ai diversi servizi presenti. La

Tabella 8 contiene la descrizione dei livelli prestazionali per questo indicatore.

Tabella 8: Livelli prestazionali per l'indicatore Rispetto della Normativa

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Tutte le normative applicabili sono rispettate con valori molto superiori a quelli richiesti	-
B	Tutte le normative applicabili sono rispettate	-
C	Le normative relative alle categorie principali sono rispettate. Livelli leggermente sotto il limite per le altre normative specifiche	-
D	Livelli leggermente sotto il limite per almeno una normativa principale	-
E	Almeno una normativa principale non rispettata	-

Protezione del Valore Culturale

Uno degli aspetti più importanti da valutare quando si vuole analizzare la qualità dell'ambiente presente all'interno di un edificio di pregio è il livello di **Protezione del Valore Culturale**.

Nel capitolo 0 sono stati considerati i parametri fisici e chimici (temperatura, umidità relativa, illuminazione, gas) che impattano sulla corretta conservazione delle opere d'arte e della struttura stessa dell'edificio. Tali indicatori tengono anche in considerazione il comfort delle persone, andando a definire un compromesso accettabile con i requisiti di corretta conservazione del patrimonio artistico. Questo indicatore riprende il concetto applicandolo specificatamente alle opere d'arte, estendendo l'approccio per esaminare altri aspetti:

- Disposizione delle opere: è necessario andare ad analizzare come sono posizionati gli oggetti nei locali accessibili al pubblico, soprattutto in occasioni di esposizioni temporanee e permanenti. Si vuole valutare il livello di rischio di danni accidentali da parte delle persone al patrimonio artistico. Un esempio di protezione è l'utilizzo di cordoni per evitare che qualcuno si possa avvicinare troppo agli oggetti e rovinarli involontariamente.

- Protocolli di movimentazione: può capitare che le opere d'arte riportino danni quando vengono spostate da un locale all'altro, per cui è importante andare a valutare se esistono

procedure definite per la movimentazione degli oggetti, con particolare riferimento alle norme in corso di discussione a livello europeo. Il lavoro del Working Group 5 all'interno del TC 346 è proprio focalizzato sulla definizione di uno standard CEN (Comité Européen de Normalisation) relativo all'imballaggio e al trasporto degli oggetti.

- Vibrazioni: alcune tipologie di opere d'arte sono particolarmente suscettibili a vibrazioni, a seconda del materiale con cui sono state realizzate e, soprattutto, dal loro grado di conservazione. È quindi indispensabile considerare se all'esterno o all'interno dell'edificio si possono avere delle sorgenti di vibrazioni in grado di arrecare un danno agli oggetti di valore. Un esempio tipico è il passaggio di mezzi pubblici su rotaia (tram, treni, ecc.) nelle vicinanze.

Insieme a questi aspetti, si deve valutare l'esistenza di protocolli codificati per la verifica periodica del patrimonio artistico, in grado di garantire un intervento rapido in caso di riscontro di qualche criticità, per poter limitare le conseguenza e arrivare ad una condizione di danno irreversibile.

Data la natura di questo indicatore, la valutazione può solamente essere di tipo qualitativo, mediante un'analisi critica delle possibili cause che possono arrecare un danno alle opere. La

Tabella 9 riassume i livelli prestazionali identificati per questo indicatore.

Tabella 9: Livelli prestazionali per l'indicatore Protezione del Valore Culturale

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Non sono presenti criticità. Le contromisure adottate sono ottimali. Presenza e totale applicazione di protocolli di gestione	-
B	Possibili criticità limitate in una categoria. Buone contromisure adottate. Presenza di protocolli ma a volte non applicati	-
C	Possibili criticità in almeno due categorie. Contromisure appena sufficienti. Protocolli di gestione incompleti e poco applicati	-
D	Forti criticità in almeno due categorie. Contromisure inadeguate. Protocolli di gestione fortemente incompleti e non applicati	-
E	Forti rischi in tutte le categorie. Nessuna contromisura adottata. Protocolli di gestione non esistenti.	-

All'interno della

Tabella 9 sono indicati i livelli per ogni differente aspetto. Il livello finale per l'indicatore sarà il valor medio tra le valutazioni ottenute singolarmente.

Sicurezza Materiale

Quando si parla di sicurezza, si deve considerare anche la protezione contro azioni volontarie contro il patrimonio artistico, quali furti e atti di vandalismo. Si parla quindi di **Sicurezza Materiale**, atta a garantire tramite opportune misure la protezione delle opere d'arte per evitarne il trafugamento o anche solo l'ingresso non autorizzato di persone in aree dell'edificio non accessibili.

Esistono diverse misure per rendere maggiormente sicuro un ambiente. Un tipico esempio è rappresentato dalla presenza nei diversi locali di sensori volumetrici in grado di rilevare la presenza non autorizzata di persone all'interno degli ambienti monitorati, oppure l'installazione di un sistema di videosorveglianza a circuito chiuso. Si possono prevedere anche soluzioni più complesse come l'installazioni di sensori per verificare la corretta chiusura di porte e finestre rivolte all'esterno, fino a giungere all'utilizzo di dispositivi associati ad ogni opera in grado di monitorare

anche i loro più minimi spostamenti e generare un allarme in caso questi spostamenti non fossero autorizzati. I supporti tecnologici forniscono un valido aiuto, ma qualsiasi sia la soluzione scelta, la presenza umana rimane un fattore fondamentale. Per questo motivo è necessario predisporre delle procedure precise riguardo la regolamentazione degli accessi ai locali e del controllo degli apparati tecnologici utilizzati come ausilio (sensoristica, videosorveglianza, ecc.).

Una corretta valutazione del livello di sicurezza di un edificio non si limita solamente a una mera analisi delle misure adottate per prevenire la presenza non autorizzate di persone all'interno per compiere furti e/o atti di vandalismo contro il patrimonio artistico. È necessario compiere un'adeguata analisi dei rischi nella quale si vanno ad esaminare tutte le possibili minacce e le vulnerabilità presenti per comprendere quali possono essere le misure di sicurezza da adottare per azzerare il rischio finale. Tuttavia, questo documento non vuole proporre una metodologia per condurre l'analisi dei rischi, ma verificare se tale analisi è stata compiuta e se, sulla base di tali risultati, sono state prese le adeguate contromisure.

I livelli prestazionali indicati per questo indicatore sono riassunti all'interno della Tabella 10, dove sono rappresentati separatamente le condizioni riguardanti le soluzioni adottate per proteggere l'ambiente interno da intrusioni esterne e l'esecuzione di un'opportuna analisi dei rischi. Il punteggio finale sarà la media tra i punteggi ottenuti separatamente dalle due valutazioni.

Tabella 10: Livelli prestazionali per l'indicatore Sicurezza Materiale

Livello	Valutazione Qualitativa		Valutazione Quantitativa
	Analisi dei rischi	Contromisure	
A	L'Analisi del rischio evidenzia che vengono adottate alcune misure di sicurezza. Tali misure sono superiori a quanto richiesto dall'analisi	Finestre e porte d'ingresso a prova di effrazione. Sistemi di allarme e monitoraggio collegati alla polizia locale o sicurezza privata	-
B	L'Analisi del rischio evidenzia che vengono adottate alcune misure di sicurezza. Tali misure sono adeguate a quanto richiesto dall'analisi	Finestre e porte d'ingresso a prova di effrazione. Presenza di un sistema di allarme.	-
C	L'Analisi del rischio evidenzia che vengono adottate alcune misure di sicurezza. Tali misure sono inferiori a quanto richiesto dall'analisi	Finestre e porte d'ingresso a prova di effrazione.	-
D	L'Analisi del rischio evidenzia che vengono adottate alcune misure di sicurezza. Non sono adottate misure di sicurezza.	Porte d'ingresso a prova di effrazione.	-
E	Nessuna analisi effettuata, né misure di sicurezza adottate	Nessuna contromisura adottata.	-

GESTIONE DELL'EDIFICIO

La terza categoria riguarda aspetti legati maggiormente alla gestione dell'edificio, più che relativi alle prestazioni sia in termini di qualità ambientale che di sicurezza. È importante però esaminare questi aspetti in quanto permettono da un lato di aumentare la fruizione da parte del pubblico e quindi di incrementare le entrate, dall'altro consentono di valutare l'impatto di capitoli di spesa importanti, quali pulizia e manutenzione degli impianti, sia sulla sostenibilità economica della struttura, sia sulla conservazione del patrimonio artistico.

L'accessibilità all'edificio da parte di tutte le tipologie di utenti, incluse le persone con disabilità o semplicemente con difficoltà motorie, nelle aree autorizzate è uno dei requisiti fondamentali per poter ospitare esposizioni temporanee o permanenti ed essere aperto al pubblico. Altri aspetti molto importanti per la fruizione del patrimonio riguardano l'orientamento all'interno dell'edificio, cioè la capacità per i visitatori di trovare facilmente il percorso e la propria destinazione in piena autonomia e la presenza di servizi aggiuntivi (ad esempio punti ristoro, bookshop, laboratori didattici, ecc.) che consentano di creare un ambiente confortevole e rilassante e aiutare a diffondere la cultura.

Dal punto di vista più strettamente gestionale, è utile capire l'impatto di eventuali interventi sull'edificio sulla sua versatilità, cioè sulla possibilità di ospitare destinazioni d'uso differenti al suo interno senza la necessità di dover fare modifiche strutturali e garantendo un alto livello qualitativo dell'ambiente. Gli ultimi due indicatori di questa categoria riguardano due aspetti maggiormente legati alla gestione ordinaria dell'edificio: la facilità di pulizia, dove si analizzano i prodotti utilizzati e la loro piena compatibilità con i materiali e le opere presenti all'interno, e la facilità di manutenzione, valutando la durata nel tempo degli impianti tecnologici e la semplicità di intervento in caso di malfunzionamento.

Accessibilità

Uno degli aspetti più importanti per gli edifici in genere è rappresentato dall'**Accessibilità**. Questo è particolarmente vero per gli edifici aperti al pubblico, dove è fondamentale garantire a tutti la possibilità di accedere ai vari locali e ai servizi, indipendentemente dalle condizioni di mobilità della persona. Lo stesso discorso vale per gli edifici di pregio nel quale può trovar sede un museo oppure dove si possono organizzare mostre e/o esposizioni temporanee.

Gli edifici storici sono stati costruiti in un periodo in cui il problema dell'accessibilità non era considerato una priorità e, solitamente, presentano gradini, scale e altre barriere architettoniche che costituiscono un ostacolo per le persone con difficoltà di movimento. In aggiunta, i vincoli imposti dalle sopraintendenze limitano le possibilità per l'installazione di ascensori e rampe in grado di superare la presenza di barriere. È quindi necessario trovare soluzioni in grado di superare queste problematiche e per attrezzare l'edificio in modo da risultare accessibile, e che, allo stesso, abbiano un impatto minimo sulla struttura originaria e garantiscano il pieno mantenimento del valore culturale e artistico.

Nel caso in cui fosse assolutamente impossibile garantire l'accesso a determinati locali a meno di stravolgere completamente la struttura dell'edificio con evidenti conseguenze sul suo valore artistico, può arrivare in aiuto la tecnologia. Mediante opportuni strumenti software è possibile ricreare modelli tridimensionali navigabili degli ambienti non accessibili, permettendo a tutti gli utenti di poter comunque ammirare le opere d'arte e le mostre presenti. Tali strumenti permettono inoltre di aumentare il livello di fruizione grazie alla possibilità di offrire informazioni aggiuntive a tutti i possibili visitatori.

Per fornire un aiuto nella definizione degli interventi da eseguire, il Ministero per i Beni e le Attività Culturali ha emanato il Decreto Ministeriale del 28/03/2008, nel quale sono indicate le linee guida per il superamento delle barriere architettoniche nei beni culturali.

Oltre alla valutazione sull'accessibilità verso l'interno dell'edificio, questo indicatore considera anche la presenza di infrastrutture e servizi pubblici, quali strade, parcheggi, comodità a mezzi quali autobus, treni, ecc. in grado di consentire alle persone di raggiungere la struttura. I livelli prestazionali, indicati in Tabella 11, riflettono questa doppia interpretazione del concetto di accessibilità e il valore finale sarà la media tra i risultati raggiunti per ogni singolo approccio.

Tabella 11: Livelli prestazionali per l'indicatore Accessibilità

Livello	Valutazione Qualitativa		Valutazione Quantitativa
	Accessibilità interna	Infrastrutture	
A	Edificio completamente accessibile senza necessità di aiuto	Ampia scelta di mezzi pubblici Ampio parcheggio disponibile	-
B	Edificio accessibile tramite percorsi obbligati adeguatamente segnalati	Buona presenza di mezzi pubblici Parcheggio adeguato alle esigenze	-
C	Edificio accessibile solo tramite percorsi obbligati non correttamente segnalati	Sufficiente disponibilità di mezzi pubblici	-
D	Edificio accessibile solo mediante aiuti da parte di operatori	Porte d'ingresso a prova di effrazione.	-
E	Edificio non accessibile	Scarsi mezzi pubblici disponibili Parcheggi praticamente nulli	-

Oltre a quanto discusso in precedenza, un altro aspetto molto importante riguarda l'accessibilità sicura, andando a valutare quali possono essere i carichi di persone ammissibili all'interno di un edificio di pregio in grado di massimizzare il numero di visitatori e di minimizzare i rischi per la conservazione delle opere a causa di un'eccessiva presenza di anidride carbonica e altri gas nell'aria, come già accennato anche nel Capitolo 0. Questo aspetto, molto interessante dal punto di vista della ricerca scientifica e molto utile per una corretta gestione del patrimonio artistico, esula però dal contesto di questo documento.

Orientamento

Quando, in edificio storico, sono organizzate esposizioni temporanee oppure è allestito un museo permanente, è importante fare in modo che il pubblico trovi con facilità l'ingresso con relativa biglietteria e possa seguire correttamente il percorso espositivo. È necessario quindi valutare quali accorgimenti sono stati adottati per garantire l'**Orientamento** tra i diversi locali, ad esempio mediante cartelli indicativi, uso di pannelli colorati, identificazione di percorsi obbligati, ecc.

Una particolare importanza deve essere riservata all'indicazione delle uscite di sicurezza e dei percorsi per raggiungerle il più velocemente possibile, secondo le indicazioni contenute nel Testo Unico per la Sicurezza rappresentato dal Decreto Legislativo n.81 del 9 aprile 2008 e successive integrazioni e modifiche (Decreto Legislativo n.106 del 3 agosto 2009, Decreto Legge n.255 del 29 dicembre 2010 coordinato con la legge di conversione n.26 del 26 febbraio 2011). Inoltre, la corretta segnalazione dei locali aperti al pubblico, permette di ridurre la possibilità che qualcuno cerchi inavvertitamente di entrare in un'area riservata, generando allarmi non voluti.

La capacità di orientarsi all'interno dell'edificio ha sicuramente un benefico effetto sul benessere del pubblico che visita le esposizioni, aumentandone la capacità ricettiva e di conseguenza favorendo la fruizione del patrimonio artistico presente. Molto importante anche la corretta identificazione di eventuali servizi aggiuntivi all'interno dell'edificio (analizzati tramite l'indicatore Servizi e Affini, descritto nel Paragrafo 0), come un'area ristoro, un bookshop, la presenza di laboratori didattici, ecc. In questa analisi, devono essere prese in considerazione anche le persone con esigenze particolari, quali, ad esempio, anziani e persone con ridotte capacità visive, nella scelta dei cartelli adottati per le segnalazioni con riferimento alla dimensione delle scritte e dell'abbinamento cromatico (caratteri ad alta leggibilità, forte contrasto, buona luminosità, ecc.).

La Tabella 12 riassume i livelli prestazionali definiti per questo indicatore, tenendo in considerazione l'indicazione dei percorsi espositivi e l'indicazione dei servizi presenti. La presenza e la segnalazione dei percorsi e delle uscite di emergenza è invece considerata nella valutazione degli indicatori appartenenti alla categoria Safety (cfr. Paragrafo 0).

Tabella 12: Livelli prestazionali per l'indicatore Orientamento

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	I percorsi e i servizi sono ottimamente segnalati. Esigenze speciali sono state considerate	-
B	I percorsi e i servizi sono adeguatamente segnalati. Esigenze speciali sono state considerate	-
C	I percorsi e i servizi sono adeguatamente segnalati. Qualche difficoltà riguardo esigenze speciali	-
D	Presenza di alcune segnalazioni, ma non sufficienti	-
E	Mancanza di segnalazioni e assenza di considerazione per esigenze speciali	-

Versatilità

Un aspetto molto importante per gli edifici di pregio è rappresentato dalla **Versatilità**, ossia dalla possibilità di ospitare al suo interno tipologie di attività differenti, garantendo sempre un'alta qualità dell'ambiente, senza la necessità di eseguire interventi di adattamento che possono compromettere il valore artistico e culturale della struttura.

Per quanto riguarda il Primo Piano Nobile della Villa Reale di Monza è stato previsto un utilizzo di tipo espositivo, come evidenziato anche nel Capitolo 0, ma nell'ottica di replicare l'approccio anche per quanto riguarda le aree della Villa nelle quali gli interventi di recupero finora sono stati solo parziali, oppure in altri edifici di pregio, è necessario considerare la possibilità che in questi ambienti possano essere ospitate altre attività, quali uffici, sale convegni, ristorazione, ecc. La priorità è sempre quella di garantire la corretta conservazione del patrimonio artistico e culturale rappresentato dall'edificio e dalle opere contenute al suo interno, ma, per aumentare il livello di sfruttamento degli spazi, è possibile valutare la compatibilità delle condizioni ideali di conservazione con lo svolgimento di altre attività che non siano limitate a mostre e/o esposizioni temporanee.

In particolare, questo indicatore analizza se è possibile destinare spazi ad attività, ad esempio, di ufficio, che necessitano di requisiti differenti in termini di qualità ambientale e sistemistiche rispetto ad aree espositive, facendo in modo che ci siano condizioni ottimali sia per il mantenimento del patrimonio artistico, sia per il comfort e il benessere delle persone che dovranno lavorare nell'ufficio. Un altro esempio può essere rappresentato da un uso come spazio di ristorazione, dove, ai vincoli normativi di accessibilità richiesti per tutti gli edifici pubblici, si aggiungono altri vincoli imposti dalle autorità sanitarie per garantire l'igiene degli spazi.

Il fatto di poter realizzare all'interno di un edificio storico spazi che possono essere adibiti in sicurezza (mantenendo cioè inalterato il valore culturale) ad altre attività che non siano quelle strettamente pertinenti agli scopi espositivi permette, a chi si deve occupare della gestione dell'edificio, di poter aver a disposizione risorse finanziarie aggiuntive da poter re-investire nel mantenimento del patrimonio artistico.

La Tabella 13 riassume i livelli prestazionali identificati per la valutazione dell'indicatore Versatilità.

Tabella 13: Livelli prestazionali per l'indicatore Versatilità

Livello	Valutazione Qualitativa[4]	Valutazione Quantitativa
A	Edificio completamente adattabile ad attività non collegate alla conservazione del patrimonio	-
B	Edificio parzialmente adattabile ad attività non collegate alla conservazione del patrimonio	-
C	Edificio parzialmente adattabile ad attività non collegate alla conservazione del patrimonio, ma solo mediante l'uso di accorgimenti specifici	-
D	Edificio parzialmente adattabile ad attività non collegate alla conservazione solo in spazi limitati	-
E	Attività non collegate alla conservazione del patrimonio richiederebbero interventi che danneggerebbero il valore artistico dell'edificio	-

Servizi e affini

Gli edifici di pregio rappresentano un ambiente ideale per la realizzazione di attività di diffusione culturale e promozione del patrimonio artistico tramite la capacità di ospitare in ambienti suggestivi collezioni permanenti ed esposizioni temporanee. Per poter garantire un servizio ottimale per il pubblico, negli ultimi anni hanno cominciato a diffondersi approcci basati sulla fornitura di servizi aggiuntivi in grado di creare un ambiente confortevole che permette ai visitatori di mantenere alto il livello di concentrazione nel tempo e apprezzare maggiormente ciò che viene proposto.

Esempi di servizi, oltre a quelli che riguardano la conservazione del patrimonio culturale e artistico, che si possono trovare all'interno di un edificio di pregio sono:

- Punto di ristoro: la realizzazione di apposite aree dove i visitatori possano riposarsi permette di limitare gli effetti della stanchezza e aumentare la capacità di recepire da p parte delle persone.
- Bookshop: la presenza di un punto vendita all'interno dell'edificio, nel quale i visitatori possono acquistare libri, volumi o altro, può rappresentare un modo efficace per contribuire alla diffusione del patrimonio culturale e artistico, garantendo inoltre risorse finanziare per una corretta conservazione e gestione della struttura.
- Postazione multimediale: tramite una o più postazioni multimediali localizzate in appositi spazi è possibile fornire un servizio più completo al pubblico, con informazioni aggiuntive sulla storia e sui lavori di restauro sia dell'edificio sia delle opere presenti, ad esempio. La postazione multimediale può anche essere usata per permettere al pubblico di compiere "visite virtuali", in ambienti dell'edificio non accessibili, a causa della presenza di lavori di restauro o ostacoli alla mobilità.
- Laboratori didattici: un servizio molto utile per aumentare la conoscenza culturale è rappresentato dalla presenza di laboratori didattici nel quale possono essere utilizzati per dimostrare e far conoscere le tecniche adottate per la realizzazione delle opere o durante il loro restauro. In particolare, questi laboratori sono particolarmente utili nel caso di interazioni con scolaresche, ma tutti gli utenti interessati possono essere coinvolti in apposite sessioni di studio.

[4] Per ogni livello prestazionale indicato, un pre-requisito fondamentale è il rispetto delle condizioni di conservazione del patrimonio artistico presente all'interno dell'edificio

Si possono poi prevedere altre tipologie di servizi aggiuntivi, maggiormente collegati all'organizzazione di eventi e mostre, ma che richiedono che l'edificio sia in grado di poterli offrire tramite la disponibilità di spazi adeguati oppure di opportune infrastrutture tecnologiche. Esempi di questa categoria sono il servizio di guardaroba, nel quale i visitatori possono depositare borse e cappotti per poter visitare con maggior tranquillità le mostre, oppure guide multimediali, che permettono al visitatore di ottenere informazioni aggiuntive in una lingua a piacere su ciò che stanno osservando semplicemente avvicinandosi all'opera.

Tutti i servizi aggiuntivi presenti all'interno dell'edificio devono rispettare le normative vigenti per quella tipologia di servizio ed è essere realizzate in pieno accordo con i vincoli di conservazione del patrimonio artistico a cui sono sottoposti gli edifici di pregio. La capacità dell'edificio di ospitare attività differenti da quelle analizzate è analizzata tramite l'indicatore *Versatilità*.

L'indicatore *Servizi e affini* serve a valutare la presenza e la qualità dei servizi offerti. La valutazione della qualità dei servizi avviene considerando anche la percezione del pubblico nei confronti dei servizi offerti, che può essere analizzata tramite la sottomissione di appositi questionari. I risultati di questi questionari determineranno il livello qualitativo dell'indicatore. La Tabella 14 riassume i livelli prestazionali per questo indicatore. Il punteggio finale sarà determinato dalla media tra i due aspetti in valutazione considerati.

Tabella 14: Livelli prestazionali per l'indicatore Servizi e affini

Livello	Valutazione Qualitativa		Valutazione Quantitativa
	Presenza di servizi	Qualità del servizio	
A	Ottima presenza di servizi	Ottima qualità dei servizi	-
B	Adeguata presenza di servizi	Buona qualità	-
C	Limitata presenza di servizi	Qualità accettabile	-
D	Presenza di servizi molto ridotta	Miglioramenti necessari	-
E	Nessun servizio aggiuntivo disponibile	Grandi miglioramenti necessari	-

Facilità di Pulizia

Uno degli aspetti fondamentali per una corretta conservazione del patrimonio artistico, ma che spesso è sottovalutato, riguarda come sono effettuati i lavori di pulizia all'interno degli edifici storici. La **Facilità di Pulizia** diventa quindi uno dei parametri importanti da considerare in una gestione complessiva di un edificio di pregio.

Negli edifici di nuova costruzione, questo aspetto può essere affrontato direttamente in fase di progettazione scegliendo in modo opportuno i materiali costruttivi sia per quanto riguarda gli elementi strutturali (pavimenti, infissi, porte, finestre, ecc.) sia per quanto riguarda gli arredi interni. Al contrario, in un edificio storico non è possibile modificare i materiali presenti in quanto sono essi stessi parte integrante del patrimonio artistico e indice del valore culturale.

È necessario quindi scegliere la tipologia di prodotti più indicati a seconda della tipologia di materiali presenti in modo che non si possano generare reazioni chimiche e composti che potrebbero causare danni al patrimonio. È praticamente impossibile fornire indicazioni generali sulle scelte che devono essere fatte riguardo alla scelta dei prodotti da usare per garantire la pulizia dei locali, in quanto la scelta dipende fortemente dal tipo di materiali con cui è stata realizzata la superficie da pulire. Ad esempio, all'interno dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza sono presenti pavimentazioni lignee decorate, per cui è necessario utilizzare soluzioni che, oltre a non danneggiare il legno, siano compatibili con i pigmenti utilizzati per le decorazioni. A seconda dei componenti utilizzati per tali pigmenti si dovranno scegliere i prodotti più neutri possibili.

Oltre alla scelta dei prodotti, è fondamentale considerare la presenza di validi protocolli di pulizia, applicati con regolarità, che permettano di evitare l'accumulo di sporcizia e quindi rendendo la vita più facile a chi si deve occupare di pulizia. Inoltre, la regolare applicazione di tale protocolli

permette di offrire al pubblico un ambiente sempre consono e garantire un'ottima fruizione del patrimonio. Per una corretta applicazione dei protocolli è opportuno garantire adeguate risorse umane, soprattutto in termini di competenze specifiche per il trattamento di opere d'arte, in modo da evitare che le precauzioni adottate nella selezione dei prodotti siano parzialmente vanificato da un loro non corretto utilizzo. Naturalmente questi protocolli devono essere stati definiti nel pieno rispetto dei vincoli per una corretta conservazione del patrimonio artistico.

La valutazione di questo indicatore deve quindi tenere in considerazione diversi aspetti per poter determinare il livello prestazionale:

- Caratteristiche delle opere d'arte: le opere d'arte possono presentare requisiti differenti per le operazioni di pulizia che dipendono principalmente dai materiali di cui sono costituite e dal loro stato di conservazione.

- Numerosità e differenziazione delle opere: un edificio contenente opere d'arte di tipologia differente tra loro (e quindi con requisiti di pulizia diversi) presenta sicuramente criticità maggiori per quanto riguarda le operazioni di pulizia, rispetto a un edificio contenente tipologie di opere simili.

- Presenza di protocolli specifici e regolarmente applicati: l'analisi sulla presenza di protocolli di pulizia e la loro regolare applicazione permettono di migliorare la comprensione del livello di attenzione rivolto verso questo aspetto gestionale.

La Tabella 15 riassume i livelli prestazionali per questo indicatore, andando a considerare separatamente i tre aspetti indicati. Il livello complessivo sarà determinato dalla sintesi dei risultati ottenuti analizzando i singoli elementi.

Tabella 15: Livelli prestazionali per l'indicatore Facilità di pulizia

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Presenza di opere d'arte molto semplici da trattare Presenza di opere d'arte della stessa tipologia Ottimi protocolli di pulizia regolarmente applicati	-
B	Presenza di opere d'arte semplici da trattare Presenze di opere di diversa tipologia ma con requisiti simili tra loro Protocolli per la pulizia dei locali adeguati ma applicati solo in casi particolari	-
C	Presenza di opere d'arte complesse da trattare Presenza di tipologie di opere diversificate Protocolli per la pulizia dei locali da migliorare e applicati con scarsa regolarità	-
D	Presenza di opere d'arte difficili da trattare Presenza di numerose tipologie di opere diversificate Protocolli per la pulizia dei locali insufficienti e non applicati con regolarità	-
E	Presenza di opere d'arte molto difficili da trattare Presenza di numerose tipologie di opere fortemente diversificate Assenza di protocolli per la pulizia dei locali	-

Facilità di Manutenzione

Come evidenziato nel Paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, gli edifici di regio sono soggetti a vincoli per quanto riguarda gli interventi impiantistici e strutturali che possono essere effettuati allo scopo di preservare il loro valore storico e culturale nel tempo.

Quando si installa un impianto, è necessario quindi considerare due differenti aspetti nella scelta. Il primo riguarda l'invasività degli interventi che si vogliono effettuare, che ha una stretta relazione con i vincoli di conservazione. Non è infatti concessa la piena libertà di intervento, in quanto alcune soluzioni potrebbero essere fortemente impattanti dal punto di vista visivo oppure da quello strutturale per poter essere considerate accettabili all'interno di un edificio di pregio. Questo aspetto è fortemente considerato da parte dai proprietari e dai gestori dell'edificio, in quanto ogni intervento deve essere autorizzato da parte della Soprintendenza di competenza, la quale concede il nulla osta solo nel caso in cui il rispetto del patrimonio artistico sia garantito.

Il secondo punto, che a volte è sottovalutato, riguarda invece la **Facilità di Manutenzione** degli impianti installati. La manutenzione è infatti un aspetto fondamentale che consente di mantenere l'edificio e tutti i suoi servizi sempre in perfetta efficienza riducendo la necessità di interventi importanti con notevoli benefici anche dal punto di vista economico. Per sfruttare al massimo tali benefici, è quindi necessario stimare le attività di manutenzione e i relativi costi associati, per meglio comprendere la validità dell'investimento richiesto, anche sul lungo periodo. Inoltre, è necessario comprendere da quale tipologia di personale può essere effettuata la manutenzione ordinaria degli impianti (operatori altamente specializzati, oppure personale "standard"[5] con adeguato addestramento).

In modo simile a quanto indicato nel Paragrafo 0 in riferimento alle procedure di pulizia, anche per quanto riguarda gli aspetti di manutenzione, è importante la presenza di protocolli di intervento che prevedano controlli periodici degli impianti. In questo modo, oltre a mantenere sempre un alto livello di efficienza, è possibile identificare in tempi rapidi eventuali criticità e intervenire prontamente prima che i problemi possano arrivare a compromettere il valore artistico e culturale dell'edificio. L'applicazione di un sistema di indicatori prestazionali, come quello descritto in questo documento, può rappresentare un valido nella definizione di protocolli di manutenzione preventiva, se non ancora presenti, o nell'ottimizzazione di quelli già in uso.

La Tabella 16 contiene i livelli prestazionali identificati per questo indicatore, con riferimento alla manutenzione ordinaria.

[5] Con il termine "personale standard", si intende il personale alle dipendenze dell'edificio senza specifiche competenze relative agli impianti installati, ma che adeguatamente addestrato è comunque in grado di svolgere operazioni di manutenzione.

Tabella 16: Livelli prestazionali per l'indicatore Facilità di manutenzione

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	Personale “standard” addestrato Protocolli di manutenzione periodica presenti e rispettati	-
B	Personale “standard” addestrato, occasionalmente operatori specializzati Protocolli di manutenzione presenti e rispettati solo per alcune tipologie di impianto	-
C	Personale “standard” addestrato con forte presenza di operatori specializzati. Protocolli per la manutenzione da migliorare e applicati con scarsa regolarità	-
D	Necessità di presenza di operatori specializzati. Personale “standard” limitato a pochi interventi Protocolli per la manutenzione insufficienti e non applicati con regolarità	-
E	Necessità di operatori fortemente specializzati Nessun protocollo di manutenzione presente	-

4.3 COMPORTAMENTO TERMICO DELL'EDIFICIO

INTRODUZIONE

Gli aspetti energetici e le connesse problematiche di natura ambientale giocano un ruolo fondamentale nella definizione dei canoni di progettazione, gestione e manutenzione degli edifici. Le esigenze di abbattimento delle emissioni di gas serra dettate dal rispetto del Protocollo di Kyoto, la conservazione delle risorse energetiche, le aspettative di comfort da parte degli occupanti e la riduzione dell'impatto ambientale nel corso dell'intero ciclo di vita dell'edificio sono i punti chiave di una edilizia moderna e sostenibile (qualità totale dell'edificio).

Il tema dell'edilizia sostenibile è affrontato dalla Direttiva Europea 2002/91/CE sul rendimento energetico degli edifici.

La Direttiva Europea 2002/91/CE richiede agli stati membri di provvedere affinché gli edifici di nuova costruzione e gli edifici esistenti, che subiscono ristrutturazioni imponenti, soddisfino requisiti minimi di rendimento energetico, intendendo per rendimento energetico "la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi, fra gli altri, il riscaldamento e il raffreddamento" .

Allo stato attuale l'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli edifici passa attraverso la realizzazione di due misure specifiche:

- *Diminuzione dell'energia consumata (efficienza edificio-impianto) mirata alla riduzione delle emissioni di CO2 nell'atmosfera e dell'uso di combustibili fossili*
- *Adozione di sistemi di produzione e sfruttamento di energia con l'ausilio di fonti rinnovabili*

Scopo del presente capitolo è quello di presentare alcuni indicatori prestazionali adottabili per la valutazione del comportamento energetico di edifici storici. I valori quantitativi di tali indicatori possono essere ricavati attraverso l'ausilio di strumenti software di analisi del comportamento termico dinamico di edifici.

EDIFICI STORICI E RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA

Negli ultimi anni si è assistito allo sviluppo di operazioni di recupero di edifici storici, non solo dal punto di vista della conservazione ma anche di quello della riutilizzazione e rivitalizzazione. Si presentano quindi nuove problematiche relative all'utilizzo dell'edifico storico (ad esempio un palazzo o un convento) per funzioni diverse da quelle per le quali era stato progettato e con condizioni ambientali diverse da quelle in cui è stato utilizzato nei secoli fino ai giorni nostri. A titolo di esempio si può considerare l'inserimento di nuovi impianti meccanici per la climatizzazione all'interno di edifici storici: risultano evidenti le difficoltà che possono presentarsi durante l'accostamento tra "nuovo" ed esistente. Risulta quindi necessario adottare strategie di gestione appropriate, che coniughino le esigenze attuali di incremento di efficienza energetica con i vincoli storico-architettonici degli edifici storici.

Al fine di attuare politiche di riqualificazione energetico-impiantistica in un edificio storico sono necessarie le seguenti attività:

- ***Definizione dell'obiettivo da raggiungere***: individuazione degli standard energetici che si intendono perseguire e delle condizioni ambientali che si intendono ottenere all'interno dell'edificio in funzione del comfort degli occupanti e della conservazione degli oggetti.

- ***Analisi delle zone di interesse dell'edificio***: analisi degli elementi "rilevanti" riguardanti la struttura e l'aspetto esteriore dell'edificio. In particolare: facciate, tetti, lucernari, camini, balconi, poggioli, portali, decorazioni, finestre e porte.

- ***Analisi energetica dello stato di fatto***: analisi e valutazione del comportamento dell'edificio prima di qualsiasi intervento andando a individuare le originali strategie di funzionamento. La simulazione con strumenti software risulta un ausilio fondamentale.

- ***Identificazione di possibili misure di miglioramento energetico***: identificazione di interventi compatibili con la conservazione e rilevanti ai fini energetici. L'effetto di queste misure deve essere quantificato e integrato in una visione d'insieme.

- ***Analisi energetica a seguito di interventi migliorativi***: verifica dell'efficacia, in termini energetici, degli interventi di miglioramento realizzati. Anche in questo caso la simulazione tramite software risulta un ausilio fondamentale

Nei successivi paragrafi saranno identificati alcuni indicatori prestazionali specifici relativi alla valutazione energetica dell'edifico. Tali indicatori verranno integrati con quelli definiti in precedenza in modo da ottenere uno strumento di analisi completo delle prestazioni dell'edificio storico.

SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO TERMICO DEGLI EDIFICI

Nell'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici è ormai consueto l'uso di programmi di simulazione capaci di descrivere dinamicamente il comportamento degli ambienti, dell'involucro edilizio e dei componenti di impianto. Attraverso i BSPs (Building Simulation Programs, BSPs) è possibile analizzare strategie di progetto alternative, nonché valutare la conformità dei progetti agli standard legislativi e perseguire l'ottimizzazione economica attraverso tecniche di analisi energetica basate su simulazioni dettagliate. L'utilizzo di tali programmi consente sia l'applicazione di migliori criteri di progettazione alle nuove costruzioni, ispirati ai principi dell'ottimizzazione energetica, sia interventi di retrofitting mirati al contenimento dei consumi nel patrimonio edilizio esistente, con l'obiettivo di ricavarne benefici economici ed energetico-ambientali.

L'analisi dei flussi di energia attraverso l'involucro è il primo passo per iniziare ad effettuare l'analisi del comportamento termico dell'edificio storico. I parametri da considerare sono:

- Condizioni climatiche esterne (temperatura, irraggiamento solare, velocità del vento, ecc.)
- Caratteristiche termo-fisiche e radiative delle superfici trasparenti e opache che costituiscono l'involucro
- Caratteristiche dell'ambiente interno

I flussi termici che attraversano una superficie esterna vetrata sono di tipo conduttivo e radiativo. Attraverso tali superfici, gli apporti di origine solare influenzano notevolmente le condizioni termiche all'interno dell'edifico e si traducono istantaneamente in guadagni termici.

Le componenti opache della struttura (muri, pavimenti) sono in grado invece di accumulare energia termica e di rilasciarla in periodi di tempo successivi modificando l'andamento della temperatura all'interno dell'edificio in modo graduale.

La simulazione termica di ambienti confinati può essere affrontata mediante modelli che risolvono il bilancio termico sull'ambiente, utilizzando una formulazione numerica che permette di legare l'istante di tempo in cui un contributo termico appare all'istante di tempo in cui lo stesso contributo agisce come carico sull'aria dell'ambiente esaminato. Il sistema studiato viene diviso in zone termiche: ogni zona termica è caratterizzata da una determinata condizione termoigrometrica che vuole essere mantenuta e da un certo profilo di apporti endogeni (luci, apparecchi, persone).

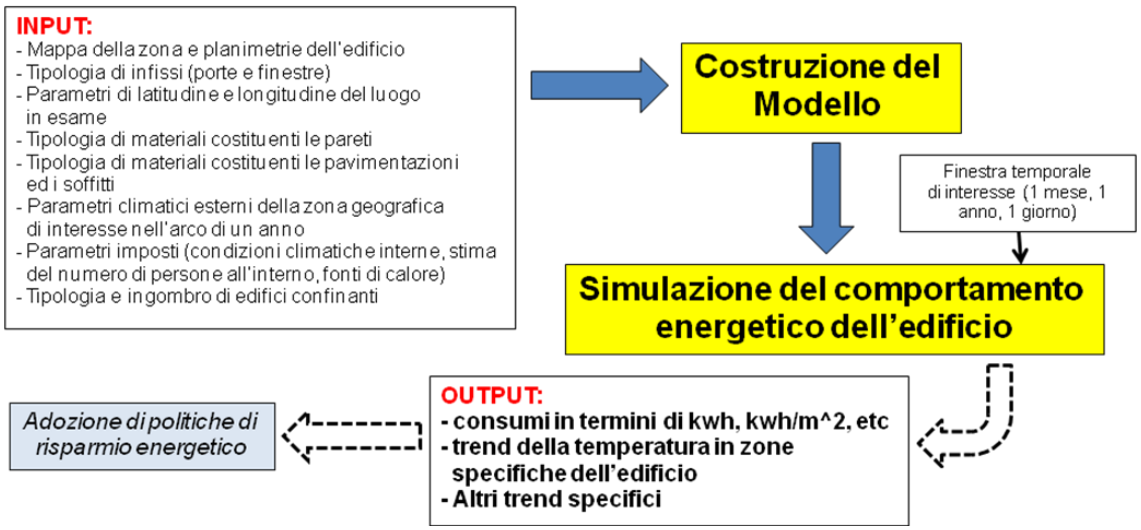


Figura 4: Schema logico di implementazione di una simulazione termica

Esistono diversi software commerciali in grado di seguire nel tempo con passi orari l'evoluzione del comportamento energetico di un edificio e tra gli altri si possono ricordare: Energy+, IES, esp-r, TRNSYS e PLEAIDAS + COMFIE, ecc.. In essi vengono introdotti come dati di input per il modello i dati climatici della località considerata, la geometria del sistema, le proprietà termofisiche delle strutture e gli apporti interni. Il risultato della simulazione effettuata sul sistema esaminato sono i profili orari di temperatura e umidità relativa nelle varie zone, i flussi di energia e i consumi sempre con passo orario. La Figura 4 rappresenta un possibile schema logico di implementazione di una simulazione termica.

Le finalità di questi codici, cosi come quello di altri programmi simili, è quello di offrire all'operatore la possibilità di studiare qualsiasi sistema fisico reale, descrivendone il comportamento dei singoli componenti del sistema attraverso un modello matematico.

Ricorriamo alla simulazione dinamica quando dobbiamo studiare un certo arco temporale in cui tutte le variabili sono dipendenti dal fattore tempo, e cambiano il loro valore istante dopo istante, Il periodo di tempo, preso in considerazione nella simulazione, viene definito "passo" della simulazione e all'interno di un passo, tutte le variabili sono determinate.

La simulazione dinamica comporta quindi, la risoluzione di numerose equazioni ad ogni passo temporale (timestep). Il tipo di calcolo è chiamato iterativo, detto di convergenza, comparando i risultati ottenuti in determinazioni successive con una tolleranza d'errore prefissata dall'utente.

Analisi delle condizioni ambientali della zona geografica di interesse

Le condizioni ambientali della zona di ubicazione dell'edificio rappresentano parametri fondamentali per la realizzazione di un corretto studio del comportamento energetico. Tali dati possono essere forniti da organismi certificati distribuiti nel territorio che si occupano di acquisire e distribuire misure meteorologiche agli enti che ne fanno richiesta. Un esempio di tali organismi è rappresentato dalle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) oppure dai servizi meteorologici dell'Aereonautica militare.

Le stazioni meteorologiche distribuite sul territorio sono dotate di sensoristica in grado di acquisire i valori giornalieri e mensili di diversi parametri quali: temperatura, precipitazioni, neve, umidità, radiazione, velocità e direzione vento. Tali parametri vengono poi elaborati e messi a disposizione degli utenti dietro pagamento di una cifra forfettaria diversa da ente a ente.

Al fine di effettuare delle simulazioni in regime dinamico è necessario conoscere i valori orari di alcuni parametri meteorologici, quali:

- La temperatura dell'aria [°C];
- L'umidità relativa [%];
- La radiazione solare incidente [W/m^2];
- La velocità del vento [m/s^2]

Tali informazioni dovranno essere fornite per le 8760 ore di un anno. E' necessario sottolineare che un campione significativo di misure meteorologiche dovrebbe essere costituito da almeno 10 anni di rilevazioni. Come è semplice intuire, tale condizione non è sempre rispettabile nei siti in cui le centraline di rilevazione sono di recente installazione. Un approccio comune è quindi quello di ricondursi a dati disponibili, acquisiti nelle località prossime al sito in oggetto dello studio.

Dove sono presenti difficoltà di reperimento di dati orari è possibile realizzare routine software in grado di generare i valori orari partendo dai dati mensili disponibili.

I dati geografici sono altresì importanti al fine di eseguire una simulazione dinamica accurata. Tali dati permettono, ad esempio, di conoscere la porzione di edificio più esposta ai raggi solari, ma anche di avere una stima della durata dell'insolazione durante i diversi mesi dell'anno in un sito specifico. I dati geografici possono essere riassunti nel modo seguente:

- posizione del nord rispetto alla planimetria;
- dati di longitudine e latitudine del sito in esame;
- altezza sul livello del mare;

Prendendo in considerazione il caso studio della Villa Reale di Monza si può pensare di ricavare le informazioni climatiche di interesse dall'agenzia ARPA della Lombardia. Sul sito www.arpalombardia.it analizzando la zona "monza e brianza" si ricavano tre stazione meteorologiche distinte (Misinto, Agrate Brianza, Carate Brianza). Non tutte le stazioni dispongono però di sensoristica in grado di rilevare tutti i parametri di interesse per l'esecuzione della simulazione, infatti la stazione di Misinto (la più vicina alla Villa Reale) dispone solo di sensori di precipitazioni e temperatura, mentre la stazione di Agrate Brianza dispone anche di sensori di radiazione solare e umidità relativa. Si può pensare quindi di ricavare i dati di temperatura dalla stazione di Misinto e quelli di radiazione dalla stazione di Agrate Brianza. L'integrazione di tali dati permette di impostare un dataset completo di parametri ambientali, necessari per realizzare una corretta analisi termica.

Nella Figura 5 è rappresentata la tabella che esprime la tipologia dei parametri climatici necessari per l'esecuzione della simulazione.

Identificativo	mese	giorno	ora	T_ext	Radioazione globale orizzontale	Radiazione diffusa orizzontale	Radiazione diretta normalmente	Durata dell'insolazione	Umidità Relativa	velocità del vento
(3 lettere)			da 1 a 24	°C	W/m^2	W/m^2	W/m^2	minuti	%	m/s
	1	1	1							
	1	1	2							
	1	1	3							
	1	1	4							
	1	1	5							
	1	1	6							
	1	1	7							
	1	1	8							
	1	1	9							
	1	1	10							
	1	1	11							
	1	1	12							
	1	1	13							
	1	1	14							
	1	1	15							
	1	1	16							
	1	1	17							
	1	1	18							
	1	1	19							
	1	1	20							
	1	1	21							
	1	1	22							
	1	1	23							
	1	1	24							

Figura 5: Tipologia di parametri climatici necessari per la simulazione

Per ciò che concerne i dati geografici, sulla base della normativa UNI 10349[6], vengono considerati i seguenti parametri:

- Altezza sul livello del mare

[6] UNI 10349:1994 – Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.

- Latitudine
- Longitudine
- Zona climatica (DPR 412/93)
- Zona di vento
- Velocità giornaliera media annuale del vento m/s
- Direzione prevalente

Analisi dei dati costruttivi e impiantistici dell'edificio

La corretta definizione del modello dell'edificio risulta di fondamentale importanza al fine di attuare un accurato processo di simulazione del comportamento termico. Tale attività implica la costruzione fisica e tecnologica, tramite software, di tutti gli elementi dell'involucro edilizio, specificando sia la stratigrafia che compone ciascuna parete verticale e orizzontale, sia la tipologia di superficie vetrata. Successivamente, l'edificio viene suddiviso in zone termiche e vengono analizzate le proprietà geometriche-dimensionali delle aree, in particolare vengono studiate:

- *Le pareti;*
- *Il pavimento;*
- *Il soffitto;*
- *Le aperture/serramenti*

Per ogni elemento è necessario calcolare le dimensioni, la superficie e la tipologia di ambiente confinante (esterno, interno riscaldato, interno non riscaldato, ecc.). Successivamente devono essere analizzati i diversi materiali impiegati nella costruzione delle strutture, individuando per ciascuno di essi le seguenti caratteristiche fisiche:

- *Spessore [m];*
- *Densità [kg/m^3];*
  La densità (chiamata più correttamente massa volumica o massa specifica) di un corpo (spesso indicata dal simbolo ρ o anche δ) è definita come il rapporto tra la massa del corpo ed il volume del medesimo corpo.
- *Conducibilità termica [W/m K]*
  La conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore (vale a dire maggiore è il valore di λ, meno isolante è il materiale). Essa dipende solo dalla natura del materiale, non dalla sua forma.
- *Calore specifico [J/kg K]*
  Il calore specifico di una sostanza è definito come la quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di una unità di massa di 1 K (o equivalentemente di 1 ºC).

Le caratteristiche descritte sono dichiarate dai produttori oppure reperibili da valori tabulati nelle normative tecniche (UNI 10351[7] – UNI 10355[8]).

[7] UNI 10351:1994 – Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.

[8] UNI 10355:1994 – Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.

°C	Monday	Tuesday	Wednesda	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
0 H		15	15	15	15	15	15
1 H	15	15	15	15	15	15	15
2 H	15	15	15	15	15	15	15
3 H	15	15	15	15	15	15	15
4 H	15	15	15	15	15	15	15
5 H	15	15	15	15	15	15	15
6 H	15	15	15	15	15	15	15
7 H	19	19	19	19	19	19	19
8 H	19	19	19	19	19	19	19
9 H	19	19	19	19	19	19	19
10 H	19	19	19	19	19	19	19
11 H	19	19	19	19	19	19	19
12 H	19	19	19	19	19	19	19
13 H	19	19	19	19	19	19	19
14 H	19	19	19	19	19	19	19
15 H	19	19	19	19	19	19	19
16 H	19	19	19	19	19	19	19
17 H	19	19	19	19	19	19	19
18 H	19	19	19	19	19	19	19
19 H	19	19	19	19	19	19	19
20 H	19	19	19	19	19	19	19
21 H	19	19	19	19	19	19	19
22 H	15	15	15	15	15	15	15
23 H	15	15	15	15	15	15	15
24 H	15	15	15	15	15	15	15

Figura 6: Vincoli di temperatura interni nell'arco di una settimana

La definizione della tipologia edilizia dell'edificio deve essere accompagnata da un'attenta analisi sia della destinazione d'uso (che può implicare eventuali vincoli di natura termica all'interno dell'edificio), sia della tipologia e caratteristiche tecniche degli impianti termici installati nell'edifico.

In Figura 6 è rappresentata la tabella che riassume i vincoli termici in un edificio nell'arco di una settimana.

Come accennato nel precedente capitolo (cfr. paragrafo 0) l'impianto di riscaldamento è formato da ventilconvettori installati nel pavimento, posizionati in prossimità delle finestre nelle diverse sale dell'edificio. All'interno dell'ala sud della villa l'impianto ha la sola funzione di riscaldamento. Tale funzione viene espletata grazie alla rete di teleriscaldamento della città di Monza. Il condizionamento dell'aria, per l'ala sud della Villa, è gestito da un impianto U.T.A. (unità di trattamento aria) che convoglia una quantità d'aria pari a 3000 m^3/h nelle varie stanze.

Il controllo microclimatico è effettuato mediante sensoristica wireless. All'interno delle diverse sale del piano nobile della Villa sono presenti nodi sensore che possono acquisire dati di temperatura e umidità relativa. Tali sensori comunicano ad un centro di controllo posizionato al piano terreno dell'ala sud le informazioni acquisite. Il tipo di strumentazione utilizzata permette di analizzare i dati acquisiti in tempo reale.

INDICATORI RELATIVI ALL'EFFICIENZA ENERGETICA

Attraverso il processo di simulazione introdotto precedentemente è possibile identificare alcuni indicatori prestazionali relativi alle performance energetiche di edifici storico.

Le principali categorie di indicatori riguardano:

- **Fabbisogno energetico dell'edificio**. Un indice dell'efficienza energetica degli edifici è il fabbisogno energetico per metro quadrato e anno (khW/m^2a) necessario per il riscaldamento, per la produzione di acqua calda e per il raffrescamento estivo.

- **Livello di miglioramento in termini di efficienza energetica**. Tale indice rappresenta il livello migliorativo, in termini di fabbisogni energetici, che si ottiene andando a modificare alcuni parametri strutturali e/o ambientali (infissi, impianti, condizioni climatiche interne) dell'edificio storico.

Gli indicatori inerenti la **riqualificazione energetica** uniti a quelli relativi alla **qualità ambientale**, **safety** e **gestione dell'edificio**, descritti nel Capitolo 0, costituiscono un approccio integrato di analisi dell'edificio storico, come evidenziato in Figura 7.

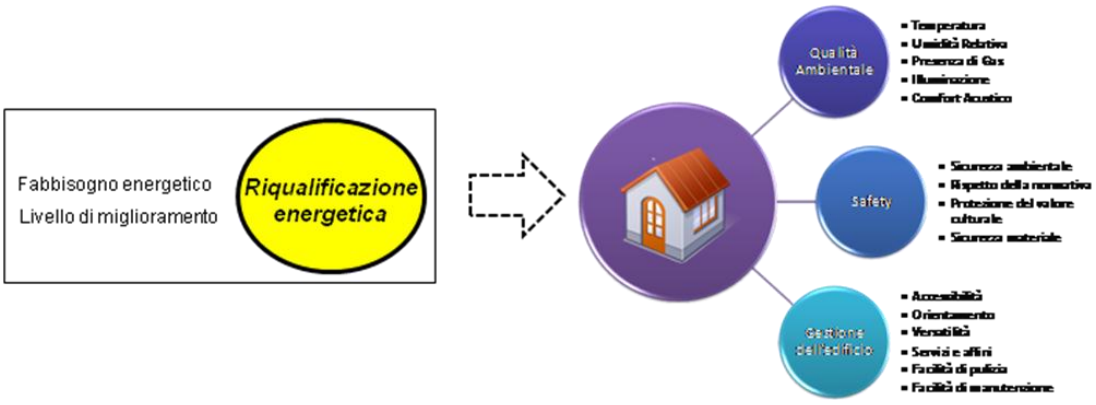
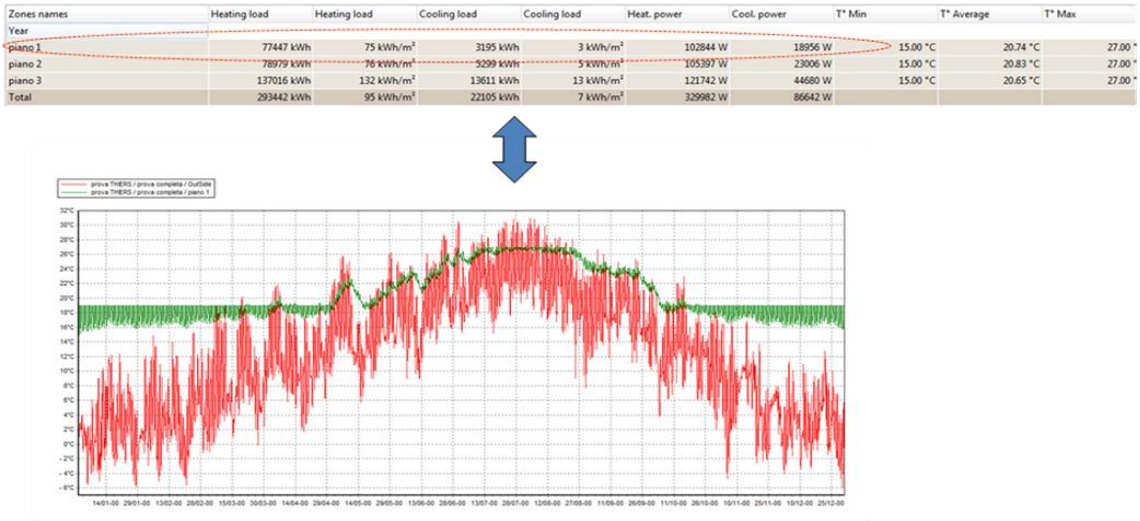


Figura 7: Integrazione degli indicatori di riqualificazione energetica

4.3.1 Fabbisogno energetico dell'edificio

L'analisi del comportamento termico dell'edifico permette di identificare i consumi necessari per il mantenimento delle "condizioni d'uso dell'edificio" durante uno specifico lasso temporale. Confrontando il fabbisogno energetico complessivo con valori standard di riferimento disponibili in letteratura è possibile proporre alcune azioni correttive utili al miglioramento delle performance energetiche.



Zones names	Heating load	Heating load	Cooling load	Cooling load	Heat. power	Cool. power	T° Min	T° Average	T° Max
Year									
piano 1	77447 kWh	75 kWh/m²	3195 kWh	3 kWh/m²	102844 W	18956 W	15.00 °C	20.74 °C	27.00 °
piano 2	78979 kWh	76 kWh/m²	5299 kWh	5 kWh/m²	105397 W	23006 W	15.00 °C	20.83 °C	27.00 °
piano 3	137016 kWh	132 kWh/m²	13611 kWh	13 kWh/m²	121742 W	44680 W	15.00 °C	20.65 °C	27.00 °
Total	293442 kWh	95 kWh/m²	22105 kWh	7 kWh/m²	329982 W	86642 W			

Figura 8: Indicatore inerente il fabbisogno energetico dell'edificio

A titolo di esempio, in Figura 8 vengono simulati gli andamenti della temperatura esterna ed interna di un edificio storico nel corso di una anno, con la relativa tabella riassuntiva dei consumi necessari per mantenere l'andamento descritto.

L'edificio può venire studiato partendo da una suddivisione in zone termiche (piani dell'edificio). Si nota come l'imposizione di intervalli di temperature dovuta ad una specifica destinazione d'uso dell'edificio produca un incremento di fabbisogno energetico dell'edificio. Tale parametro deriverà inoltre da altri contributi, quali il livello di occupazione durante la settimana, fonti energetiche interne, potenza degli impianti, ecc.

In letteratura vengono definite le seguenti classi di classificazione, sulla base dei consumi energetici annui dell'edificio [kWh/m^2 a], Figura 9.

Figura 9: Classificazione energetica degli edifici

Si sottolinea che tale approccio metodologico è attualmente adottato per il calcolo del fabbisogno energetico di edifici di nuova costruzione o in fase di ristrutturazione. L'adozione di una tale classificazione nel caso di edifici storici rappresenta senza dubbio un'approssimazione molto forte a causa dei vincoli storico-architettonici e di modalità d'uso tipicamente presenti in questi contesti. Tali vincoli, molto spesso, impediscono l'attivazione di misure utili all'incremento dell'efficienza energetica.

Si può quindi pensare di porre le basi per una nuova classificazione energetica focalizzata su edifici storici che, oltre ai parametri normalmente adottati al fine di una classificazione tradizionale (infissi, dimensioni pareti, ecc.) prenda in considerazione anche i vincoli tipicamente presenti in un edificio storico (conformazione architettonica, modalità d'uso, ecc.).

Alcuni esempi di parametri da considerare al fine di introdurre una classificazione energetica di edifici storici sono:

- La tipologia e le caratteristiche di conservazione di oggetti di pregio contenuti all'interno (affreschi, dipinti, statue) che possono condizionare la modalità d'uso dell'edificio. Molto spesso tali oggetti, al fine di una corretta conservazione, necessitano di particolati condizioni ambientali che possono essere garantite solo con dispendio energetico notevole.

- Vincoli di installazione di impianti o infissi per migliorare l'efficienza energetica del'edificio. Tipico esempio di vincolo può essere l'impossibilità di installare finestre altamente coibentanti all'interno di un edificio storico oppure di posizionare un impianto di riscaldamento a pavimento, la cui installazione causerebbe il danneggiamento della pavimentazione storica presente.

Sulla base delle considerazioni precedenti si può ipotizzare una prima classificazione degli edifici storici sulla base dei vincoli presenti. Ogni livello dovrà essere correlato con una quantificazione numerica dei consumi calcolati sulla base dei vincoli. Tale valore numerico dovrà essere considerato nella classificazione energetica dell'edificio storico, effettuando così una distinzione. In Tabella 17 sono contenuti i livelli prestazionali utili per la classificazione energetica degli edifici.

Tabella 17: Classificazione energetica degli edifici

Livello	Valutazione Qualitativa	Valutazione Quantitativa
A	L'edificio non presenta vincoli di nessun tipo che possano compromettere una classificazione energetica standard.	-
B	L'edificio è destinato a contenere alcuni manufatti storici con restrittivi vincoli di conservazione.	-
C	L'edificio dispone di infissi storici/pavimentazioni/ murature non modificabili.	-
D	L'edificio è destinato a contenere alcuni manufatti storici con restrittivi vincoli di conservazione e dispone di infissi storici/pavimentazioni/murature non modificabili.	-
E	L'edificio è destinato a contenere alcuni manufatti storici con restrittivi vincoli di conservazione e dispone di infissi storici/pavimentazioni/murature non modificabili. Sono inoltre presenti altri vincoli non considerati nelle precedenti categorie	-

Tali livelli saranno adottati al fine di procedere con una distinzione degli edifici storici. Risulta infatti importante, dal punto di vista dell'incremento dell'efficienza energetica, discriminare edifici all'interno dei quali è possibile avviare interventi di miglioramento da quelli in cui non risulta possibile per motivi di incompatibilità. Si sottolinea che tale approccio di classificazione può essere sicuramente migliorato e modificato sulla base di informazioni dettagliate derivanti da analisi successive.

Livello di miglioramento in termini di efficienza energetica

Questo indicatore ha come obiettivo lo studio del livello di miglioramento, in termini di efficienza energetica, di un edificio a seguito di interventi di modifica dal punto di vista sia strutturale (es. cambio infissi) sia delle modalità d'uso (es. temperatura voluta all'interno).

Il livello di miglioramento viene quantificato in termini di kWh/m^2 annuo ed è ottenuto dalla differenza tra i consumi (sempre in kWh/m^2 a) registrati prima degli interventi di modifica ed i consumi calcolati dopo le modifiche.

In formule:

$$\mathbf{M = Cpi - Cdi}\ [kWh/m^2\ a]$$

Dove:

- **M** = livello di miglioramento [kWh/m^2 a]
- **Cpi** = consumi prima dell'intervento [kWh/m^2 a]
- **Cdi** = consumi dopo l'intervento [kWh/m^2 a]

Le informazioni sui consumi prima e dopo gli interventi possono essere ricavati da un processo di simulazione termica dinamica dell'edificio (cfr. paragrafo 0). Tale procedura permette di verificare il vantaggio, in termini di miglioramento energetico, che un intervento può avere sull'edificio. La quantificazione del miglioramento potrà essere un'informazione essenziale per valutare se procedere con l'effettiva realizzazione fisica dell'intervento oppure modificare la soluzione ipotizzata.

Nello schema in Figura 10 sono rappresentati i passi logici necessari per la realizzazione di interventi di miglioramento dell'efficienza energetica con dettaglio degli indicatori potenzialmente ricavabili.

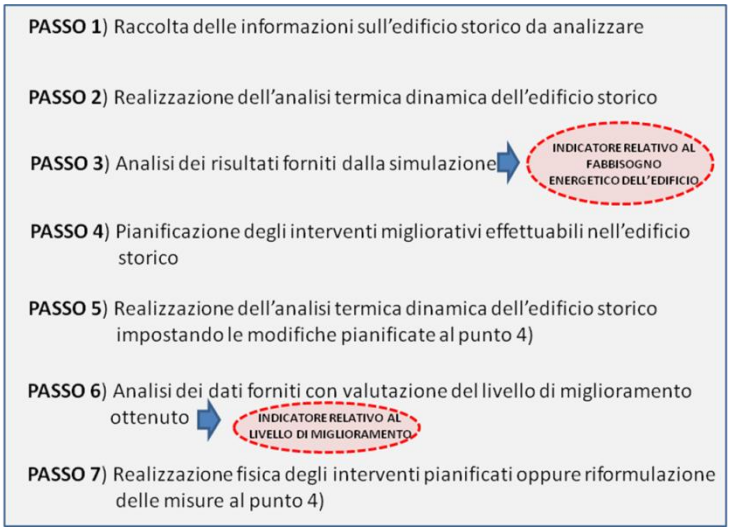


Figura 10 : Indicatore inerente il fabbisogno energetico dell'edificio

Per questo specifico indicatore non vengono fornite delle classificazioni in livelli come i casi precedenti, il calcolo del valore M sarà quindi valutato caso per caso a seconda dell'intervento specifico che si intende realizzare.

4.4 CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE

Questo capitolo si propone di caratterizzare, sulla base del sistema di indicatori definito, gli ambienti della Villa Reale. A tal fine in questa sede sono riportati i criteri impiegati per l'identificazione dei punti di monitoraggio e per l'elaborazione dati e una prima valutazione degli indicatori prestazionali definiti nel paragrafo 0.

DEFINIZIONE DELLE MODALITÀ DI MONITORAGGIO

In ambito museale è necessario effettuare il monitoraggio di tutti i locali espositivi, anche considerando i differenti requisiti ambientali in cui le diverse opere devono sottostare per la riduzione al minimo dei rischi di degrado.

Il monitoraggio può essere effettuato tramite dispositivi di acquisizione e memorizzazione dei dati (datalogger, campionatori passivi, ecc.), in grado di mappare le condizioni ambientali avvenute durante l'esposizione temporanea, e dispositivi di acquisizione e trasmissione dei dati (sensori fissi, reti wireless di sensori, ecc.), in grado di verificare in tempo reale le condizioni ambientali e di poter intervenire tempestivamente in caso occorra apportare delle correzioni in itinere.

I tempi di campionamento e di trasmissione dei dati del monitoraggio sono da impostare in base alla sensibilità delle opere alle variazioni microclimatiche e a seconda del contesto in cui le opere sono collocate (possibilità di brusche escursioni microclimatiche).

La scelta dei punti di posizionamento dei dispositivi deve essere fatta tenendo conto di vari aspetti legati alla struttura dell'edificio (dimensione locale, disposizione di porte e finestre), che può influire sulla formazione di eventuali gradienti termo-igrometrici all'interno del locale, alla tipologia di impianti presenti, che possono alterare le dinamiche ambientali del luogo e agli aspetti più specificatamente legati alla tipologia di opere presenti e alla loro conservazione.

A seconda della natura delle opere d'arte e degli ambienti in cui tali opere sono poste, i parametri da monitorare possono essere diversi (temperatura, umidità relativa, illuminamento, inquinanti atmosferici, ecc.). I dati ricavati dal monitoraggio ambientale, una volta elaborati, possono fornire informazioni utili per la valutazione dell'ambiente espositivo.

Tra le informazioni ottenibili dall'elaborazione dei dati del monitoraggio ambientale, è possibile identificare: l'andamento nel tempo, la presenza di brusche escursioni, la media dei valori, il massimo e il minimo valore raggiunto, la frequenza di determinati eventi, la percentuale di valori che si mantiene all'interno dei limiti accettabili e la percentuale di scostamento da tali limiti.

Informazioni aggiuntive si possono ottenere dalla correlazione tra più parametri (es. temperatura e umidità relativa). L'elaborazione congiunta dei parametri permette infatti di verificare, in modo immediato, se i valori si sono mantenuti nelle condizioni ideali o quali parametri si sono scostati da tali condizioni.

Occorre infine annotare e segnalare eventuali comportamenti o situazioni anomale riscontrate durante l'esposizione che possono influire sulle condizioni ambientali monitorate.

SUPPORTO ALLA CREAZIONE DI MODELLI PER L'ANALISI DEL COMPORTAMENTO TERMICO DEGLI AMBIENTI DELLA VILLA REALE MONITORATI

Lo sviluppo di un modello geometrico dell'edificio permette di introdurre dei parametri strutturali, fondamentali al fine di eseguire una corretta simulazione del comportamento termico. Tale modello viene eseguito partendo dalle planimetrie dell'edificio e viene arricchito con dettagli inerenti la posizione degli infissi, dei muri interni ed esterni e dei rispettivi materiali costituenti.

- Il modello geometrico contiene le seguenti informazioni:
- Dimensioni e tipologia dei materiali costituenti le pareti esterne dell'edificio;
- Dimensioni e tipologia dei materiali costituenti le pareti interne dell'edificio;
- Dimensioni e tipologia dei materiali costituenti le pavimentazioni dell'edificio;
- Dimensioni e tipologia dei materiali costituenti il tetto dell'edificio.

Al fine di produrre un esempio di tale modellizzazione grafica è stato preso come caso studio l'Ala Sud della Villa Reale di Monza. Si sottolinea che al momento non tutte le informazioni geometriche relative a questa porzione di edificio sono state reperite. Risulta però possibile fornire un esempio di tale rappresentazione grafica come dimostrato nelle successive figure.

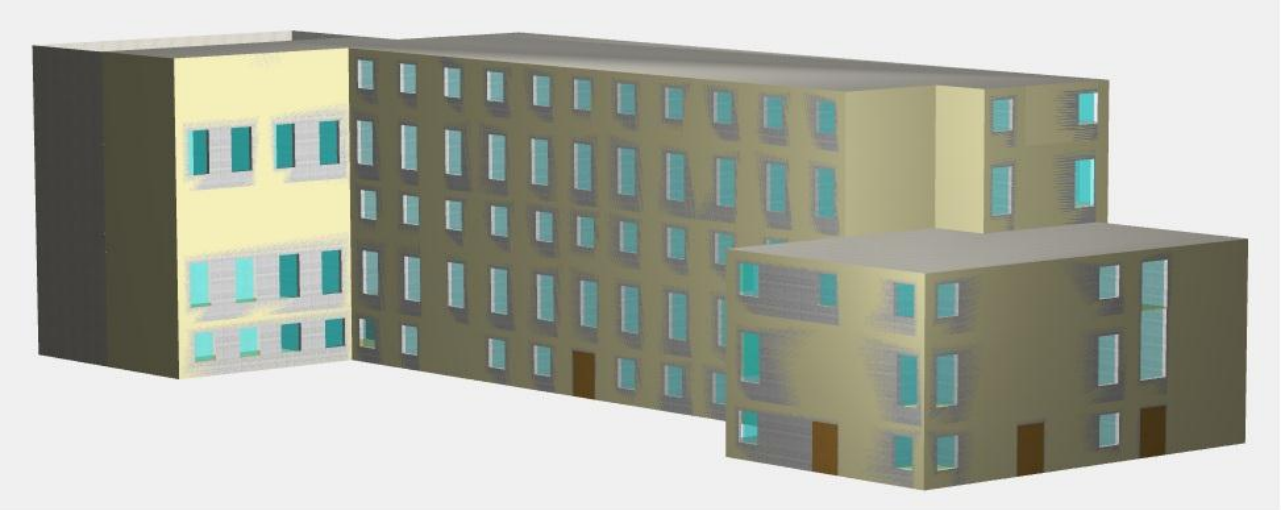


Figura 11 : Una possibile rappresentazione globale dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza

Come si può notare dal modello raffigurato in Figura 11, l'ala sud della villa è composta da un piano terreno e due piani nobili intervallati da altrettanti piani ammezzati, impiegati in passato dalla servitù. Le stanze sono molto luminose grazie alla presenza di numerose finestre presenti a distanze regolari. La maggior parte delle finestre affacciano sui lati nord e sud mentre alcune altre affacciano sui lati ovest, tra cui la grande finestra del corridoio del primo piano nobile, ed est.

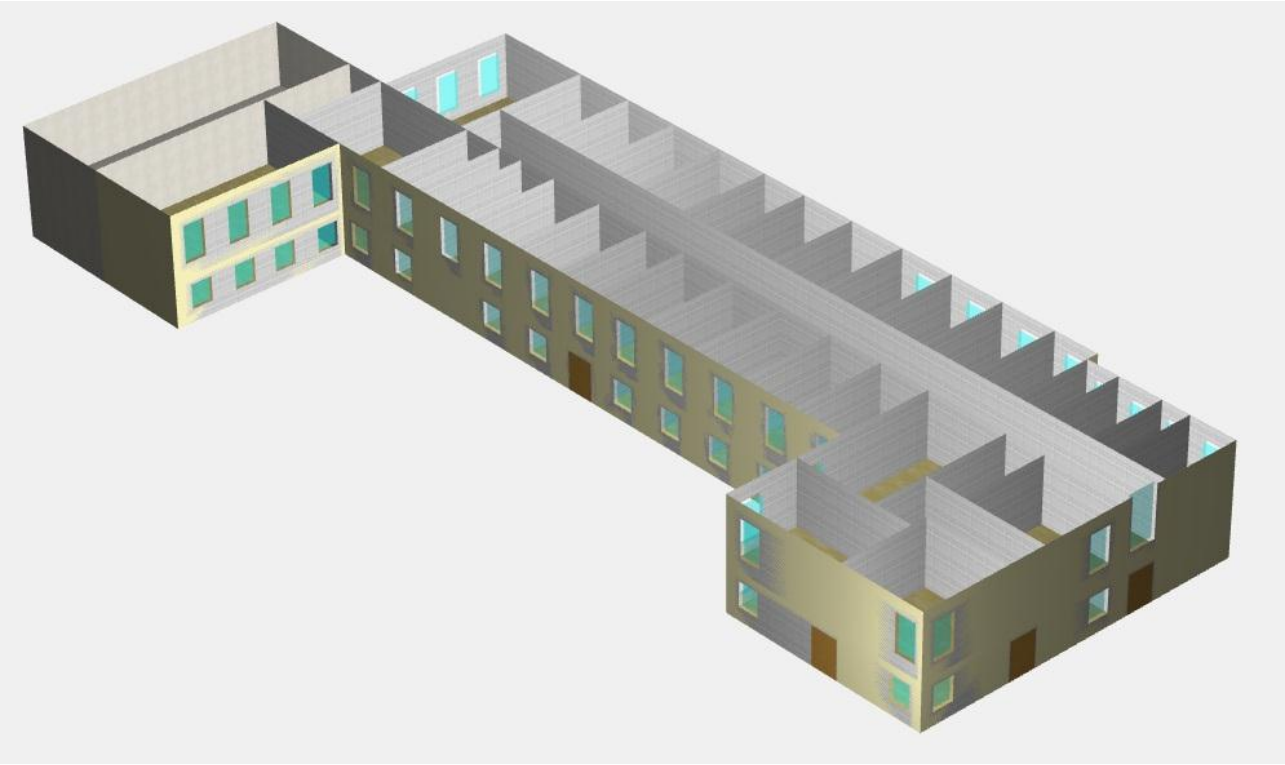


Figura 12 : Rappresentazione del piano nobile dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza

Nella Figura 12 viene rappresentato tramite modello grafico il piano Nobile della Villa con dettaglio degli infissi e delle suddivisioni dell'ambiente interno.

I parametri costruttivi vengono inseriti nel modello seguendo le indicazioni in Figura 13.

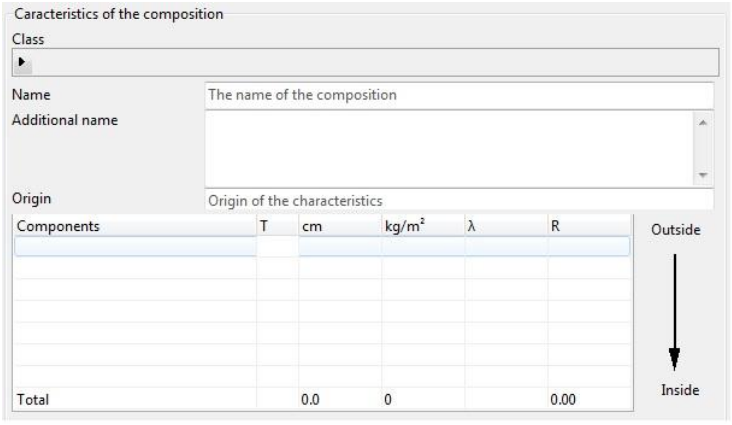


Figura 13 : Rappresentazione delle informazioni costruttive da inserire nel modello

Come è facilmente intuibile dalla figura, i diversi materiali costituenti le strutture (muri, pavimenti, ecc.) vengono inseriti dall'esterno verso l'interno con dettaglio dei parametri fisici caratteristici (cfr. paragrafo 0).

Nella Figura 14 a titolo di esempio viene fornita la composizione di un tipico muro esterno di un palazzo storico.

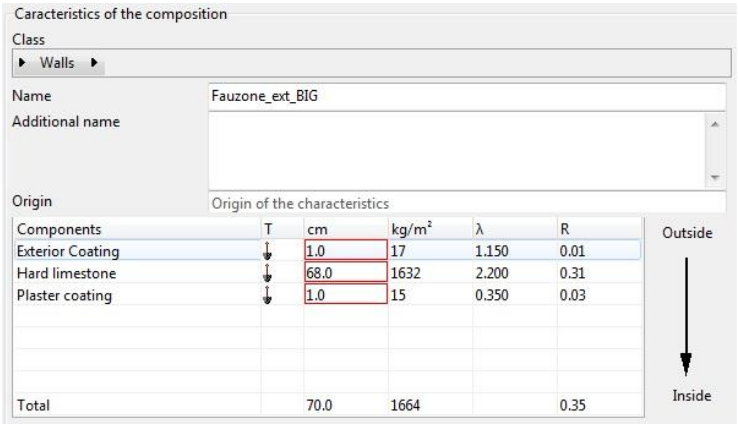


Figura 14 : Rappresentazione delle informazioni costruttive di una parete esterna da inserire nel modello

Si nota come la dimensione complessiva è approssimativamente pari a 70 cm ed è costituita da materiale di rivestimento esterno (1 cm), materiale di tipo pietroso (68 cm), materiale di rivestimento interno (1 cm).

Questi parametri vengono assegnati al perimetro esterno creato nel modello. Un approccio simile viene adottato anche per assegnare le caratteristiche delle pareti interne all'edificio.

Per quanto riguarda le pavimentazioni, nella Figura 15 viene riportato un esempio dei materiali costituenti con dettaglio delle caratteristiche fisiche.

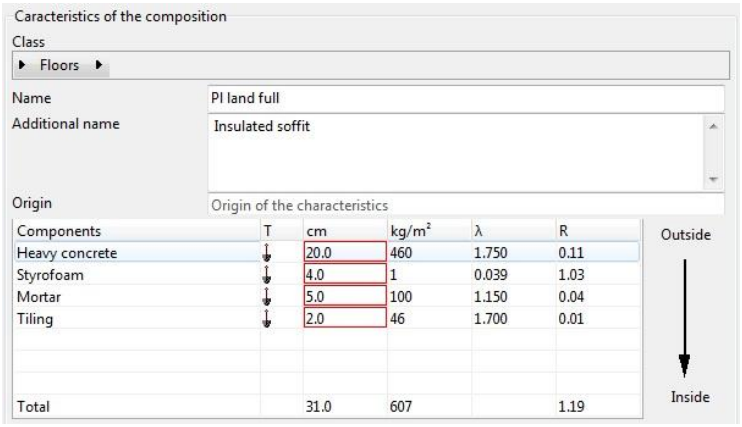


Figura 15 : Rappresentazione delle informazioni costruttive di un pavimento da inserire nel modello

Si può notare come lo spessore totale è pari a circa 31 cm ed i materiali costituenti sono: il calcestruzzo per uno spessore di 20 cm che costituisce lo strato primario, uno strato di materiale isolante di spessore pari a 4 cm, uno strato di materiale idoneo all'applicazione delle piastrelle pari a circa 5 cm ed uno strato di piastrelle di spessore pari a 2 cm. Si sottolinea che le composizioni sono facilmente modificabili a seconda del tipo di pavimentazione che si vuole analizzare.

Simile approccio viene adottato per la definizione delle caratteristiche del tetto dell'edificio, come descritto nella Figura 8.

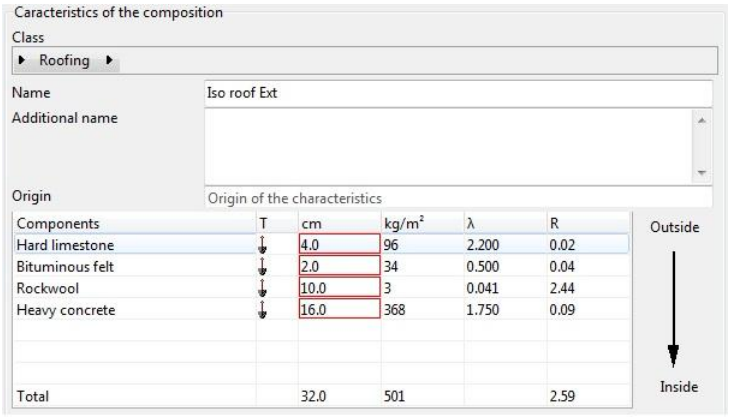


Figura 16 : Rappresentazione delle informazioni costruttive di un tetto da inserire nel modello

Nella Figura 16 si nota come il tetto preso come campione abbia uno spessore complessivo di 32 cm, composto da: uno strato di 16 cm di calcestruzzo, uno di 10 cm di lana di roccia, uno strato di bitume di 2 cm ed uno strato di 4 cm di copertura finale con materiale pietroso.

Concluso il processo di modellizzazione grafica e attribuiti i parametri strutturali è necessario stabilire delle zone termiche dell'edificio, all'interno delle quali verranno effettuate le analisi dei fabbisogni energetici.

Si può quindi pensare di suddividere l'edificio sulla base degli ambienti significativi di cui è composto. Un esempio di tale suddivisione può riguardare la "zona scale" dell'edificio, oppure la zona destinata a ruoli specifici. Al fine di una valutazione pre e post intervento di riqualificazione, è importante prendere in considerare le stesse zone termiche, effettuando così un confronto accurato dell'eventuale miglioramento energetico apportato.

Per quanto riguarda la Villa Reale di Monza si può ipotizzare di identificare come zone termiche i diversi piani dell'edificio. Nella Figura 17 è rappresentata la zona termica Primo piano Nobile.

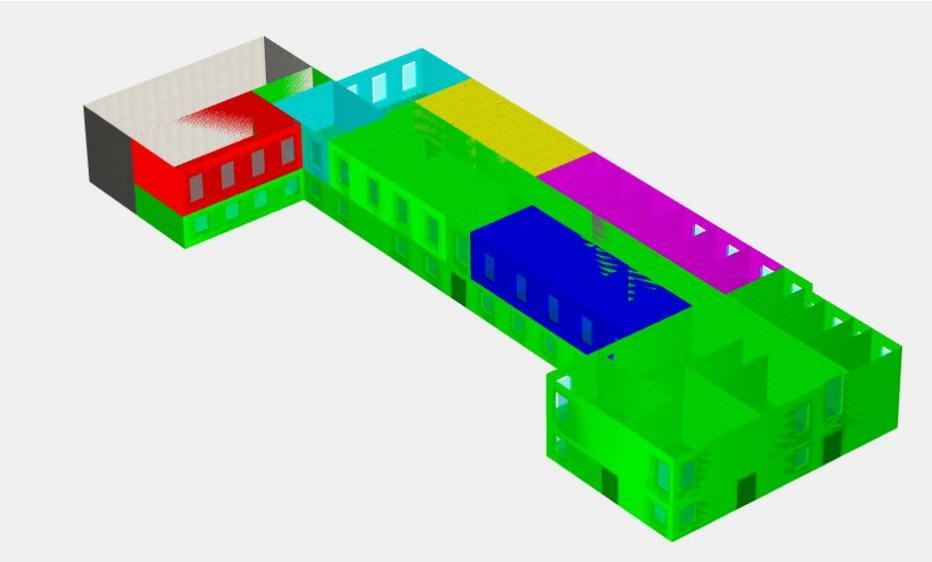


Figura 17 : Rappresentazione delle alcune zone termiche dell'Ala Sud della Villa

La ventilazione è un altro importante parametro da considerare. La norma UNI/TS 11300-1 indica un ricambio d'aria pari a 0.3 vol/h per edifici residenziali. Per quanto riguarda i carichi termici interni, risulta di particolare rilevanza ipotizzare il livello di occupazione interna all'edificio oltre a quelli derivanti da fonti di illuminazione (molto importati nel caso di edifici storici dotati di importanti allestimenti luminosi a fini espositivi) e dalle apparecchiature elettriche (PC, video, stampanti).

La stima della potenza degli impianti di riscaldamento risulta un parametro influente sui transitori di passaggio da una temperatura ad un'altra all'interno di una determinata zona, così come l'andamento della temperatura esterna del sito in esame.

La Figura 18 rappresenta l'andamento di temperatura che viene stimato, imponendo tutte le condizioni illustrate precedentemente, all'interno di una determinata zona termica.

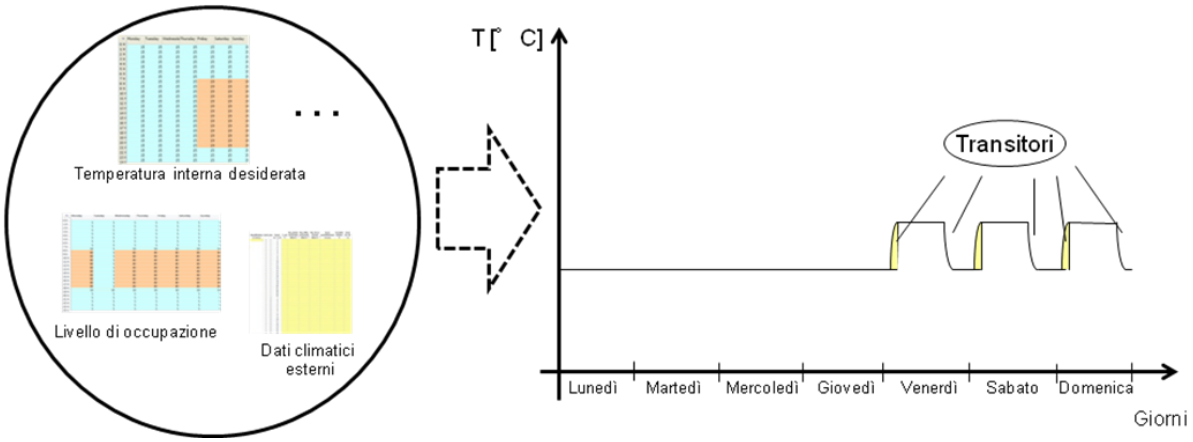


Figura 18 : Rappresentazione del processo di derivazione della temperatura interna

Nel caso rappresentato in Figura 18 la variazione di temperatura interna desiderata è stata impostata solo per i giorni venerdì, sabato e domenica mentre per gli altri giorni è costante ad un valore prefissato. Il passaggio da una temperatura ad un'altra non avviene istantaneamente ma segue un transitorio che è funzione dei parametri immessi in ingresso nel modello.

Il mantenimento delle condizioni termiche all'interno del palazzo (come sintetizzato in Figura 18) è direttamente correlato ad un livello di consumo energetico. I parametri riguardanti le condizioni esterne, le condizioni interne, la potenza impianti, ecc, rappresentano fattori determinanti sulla stima del consumo totale dell'edificio.

L'analisi e l'eventuale ottimizzazione di tali parametri possono produrre miglioramenti in termini di efficienza energetica all'interno dell'edificio.

VALUTAZIONE DEI LIVELLI PRESTAZIONALI DEL PRIMO PIANO DELL'ALA SUD DELLA VILLA REALE DI MONZA

La valutazione dei livelli prestazionali del primo piano dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza è stata condotta a livello qualitativo sulla base dei sopralluoghi realizzati nella Villa e delle interviste effettuate al personale dell'edificio.

Per una analisi qualitativa più dettagliata occorrerebbe in futuro coinvolgere anche i visitatori della Villa sottoponendo loro un questionario dal quale sia possibile evincere la loro percezione sulle tre categorie di indicatori. Per un'analisi più precisa occorrerebbe inoltre effettuare, dove possibile, una valutazione quantitativa degli indicatori (es. temperatura, umidità relativa, la presenza di gas, ecc.). L'analisi quantitativa necessita però di un monitoraggio continuo dei parametri per un periodo non inferiore ad un anno al fine di verificare l'andamento nel tempo di tali parametri.

La valutazione prestazionale del primo piano nobile dell'Ala Sud della Villa, come riportato nella Tabella 18, ha permesso di identificare diversi livelli prestazionali a seconda dell'indicatore analizzato.

Tabella 18: Livelli prestazionali del primo piano dell'Ala Sud della Villa

Categoria	Indicatori Prestazionali	Livello prestazionale[9]
Qualità ambientale	Temperatura	C
	Umidità Relativa	C
	Presenza di Gas	B
	Illuminazione	D
	Comfort acustico	B
Safety	Sicurezza ambientale	B
	Rispetto della normativa	B
	Protezione del valore culturale	B
	Sicurezza materiale	B
Gestione dell'edificio	Accessibilità	B
	Orientamento	C
	Versatilità	C
	Servizi e affini	E
	Facilità di pulizia	E
	Facilità di manutenzione	D

Il più alto livello prestazionale raggiunto nel primo piano dell'Ala Sud è risultato essere il livello B, ottenuto per alcuni indicatori della qualità ambientale (presenza di gas e comfort acustico), per tutti gli indicatori della safety (sicurezza ambientale, rispetto delle normative, protezione del valore culturale e sicurezza materiale) e per un solo indicatore della gestione dell'edificio (accessibilità). In particolare:

- **presenza di gas**: da una analisi qualitativa non risultano avvertibili quantità elevate di gas nocivi per la salute dell'uomo in quanto non risultano episodi di fastidio da parte di chi frequenta abitualmente la Villa. Inoltre all'interno della Villa sono presenti alcuni accorgimenti per limitare l'ingresso di gas dall'esterno, quali l'assenza di infiltrazioni dalle

[9] I livelli prestazionali (A, B, C, D, E) vengono identificati sulla base delle indicazioni espresse nel capitolo 3 "Sistema di indicatori"

finestre dell'edificio e la presenza di filtri dell'aria degli impianti di ventilazione. Occorrerebbe però valutare a livello quantitativo la presenza di quantità di gas nocivi per la conservazione delle opere d'arte, i cui limiti di tolleranza sono notoriamente più bassi di quelli sopportabili dall'uomo.

- **comfort acustico**: non risultano particolari sorgenti di rumore interno all'edificio, ad eccezione degli impianti di ventilazione ma il loro livello di rumore è basso e non incide sul livello di comfort delle persone al loro interno. Per quanto riguarda la presenza di sorgenti esterne di rumore in alcune giornate dell'anno l'autodromo presente nel parco ospita alcuni eventi internazionali, quali il Gran Premio di Formula 1 e il Campionato Mondiale di Superbike che possono disturbare i visitatori delle mostre, ma si tratta di episodi sporadici.

- **sicurezza ambientale**: l'Ala Sud è stata recentemente restaurata consolidando la struttura e limitando così i possibili rischi dovuti alla caduta degli oggetti e degli stucchi all'interno dell'edificio. Per quanto riguarda la pavimentazione, soprattutto quella marmorea del corridoio, risulta liscia ma non particolarmente scivolosa, non risultano infatti episodi di cadute accidentali. Infine per quanto riguarda le scale adibite al percorso di visita, sono anch'esse state rinnovate durante la ristrutturazione dei locali incrementando la loro integrità strutturale ma non sono presenti delle soluzioni antiscivolo.

- **rispetto della normativa**: durante i lavori di ristrutturazione tutti i sistemi dell'Ala Sud della Villa sono stati controllati e aggiornati per soddisfare le normative nazionali vigenti. Particolare attenzione è stata dedicata ai sistemi antincendio, in conformità con la legge nazionale italiana. Anche se le soluzioni adottate per lo spegnimento dell'incendio impiegano tecnologie a norma c'è qualche spazio di miglioramento, per esempio attraverso l'impiego di soluzioni con un impatto limitato sulle opere (es: un estintore a base di acqua non deve essere utilizzato in prossimità di dipinti). Come richiesto dalla normativa, i sistemi di allarme e prevenzione sono costantemente controllati dagli addetti alla manutenzione.

- **protezione del valore culturale**: le condizioni di temperatura dei locali del primo piano nobile dell'Ala Sud risultano leggermente inferiori ai limiti suggeriti dal DM del 10 maggio 2001 per la conservazione dei materiali lignei ma la limitata escursione tra le condizioni estive e quelle invernali aiutano a ridurre la possibilità di danni alle opere d'arte. Per quanto riguarda la protezione da danni accidentali, essa è garantita da misure adeguate che vengono scelte sulla base degli oggetti esposti (es. vetrine infrangibili). Per quanto riguarda le vibrazioni non sono un problema rilevante in quanto non ci sono fonti esterne nelle vicinanze: l'autodromo presente nel Parco infatti è abbastanza lontano e influisce sull'ambiente interno solo dal punto di vista acustico (cfr. comfort acustico).

- **sicurezza materiale**: è garantita dal controllo del perimetro esterno di tutto l'edificio con un sistema di videosorveglianza. Nell'ambiente interno, il sistema di videosorveglianza è integrato con sensori volumetrici, in grado di rilevare la presenza di corpi in movimento nei locali della Villa. Il sistema volumetrico è direttamente collegato ad un Istituto di Vigilanza in grado di intervenire tempestivamente in caso di allarme 24h su 24. Il sistema di videosorveglianza permette invece di registrare gli eventi. Inoltre, a seconda del valore degli oggetti esposti, è disponibile un sistema di allarme ad oggetto (es. etichette RFID). Pertanto, il livello globale di sicurezza materiale dell'Ala Sud è abbastanza buona.

- **accessibilità:** L'ala Sud è facilmente raggiungibile dall'esterno, in quanto vi è una strada asfaltata che collega direttamente l'edificio con la strada principale della città e che termina in un ampio parcheggio. L'ingresso dell'edificio è caratterizzato dalla presenza di scale e di un montascale portatile che può essere facilmente installato in caso di necessità. In futuro si intende aggiungere un montacarichi fisso ed un ascensore per migliorare l'accessibilità dell'edificio. Una volta raggiunto il primo piano tutte le camere sono allo stesso livello, non vi sono quindi gradini da superare e le porte sono abbastanza grandi da permettere il passaggio di sedie a rotelle e passeggini.

Un valore intermedio (livello C) è stato ottenuto per alcuni indicatori della qualità ambientale (temperatura, umidità relativa) e alcuni indicatori della gestione dell'edifico (orientamento e versatilità). In particolare:

- **temperatura:** all'interno dell'Ala Sud è presente un sistema di riscaldamento controllato direttamente da sensori a terra nelle vicinanze del sistema di ventilazione. L'impianto è impostato in modo da mantenere nel periodo invernale la temperatura a circa 16°C. Non è invece presente un sistema di raffreddamento attivo per il periodo estivo, ma grazie allo spessore dei muri la temperatura rimane perlopiù intorno ai 20°C[10].

- **umidità relativa:** l'impianto di riscaldamento non permette un controllo attivo dell'umidità relativa ma sono presenti alcune sonde per il controllo passivo dell'umidità relativa utili a valutare le condizioni dell'ambiente. Recentemente sono state aggiunte delle mandate per il trattamento dell'aria che hanno permesso di migliorare le condizioni igrometriche dell'aria. Per migliorare ulteriormente le condizioni igrometriche occorrerebbe predisporre di un controllo attivo dell'umidità per mezzo di deumidificatori nei locali più critici.

- **orientamento:** all'interno dell'edificio l'orientamento non è facile in quanto non è presente una indicazione chiara dei percorsi di visita, dei servizi e delle zone non accessibili al pubblico, ciò crea smarrimento nei visitatori e una diminuzione del livello di sicurezza della Villa con possibili danni accidentali o intenzionali. Sono invece indicati i percorsi e le uscite in caso di emergenza, ma attualmente tali cartelli non sono affissi a muro.

- **versatilità:** il primo piano dell'Ala Sud della Villa è stata progettata per fini residenziali ed è attualmente impiegata per usi espositivi (mostre permanenti e temporanee) e per uso uffici. Attualmente però gli impianti non risultano idonei ad ospitare la zona uffici per la mancanza di alcuni servizi quali una compartimentazione delle condizioni microclimatiche, una rete internet, ecc. occorre verificare se l'aggiunta di tali servizi possa comportare delle conseguenti problematiche a livello conservativo.

Un valore basso (livello D) è stato invece ottenuto per l'illuminazione e per la facilità di manutenzione degli impianti. In particolare:

- **illuminazione:** le lampade attualmente impiegate non risultano idonee ad ospitare opere d'arte per l'elevata intensità e per la presenza della componente ultravioletta dannosa al livello conservativo. In caso di mostre temporanee esse vengono sostituite da apposite luci led non dannose dal punto di vista conservativo ma tali luci vengono disinstallate al termine della mostra. Occorrerebbe quindi provvedere ad una sostituzione delle attuali luci impiegate per le esposizioni permanenti.

- **facilità di manutenzione:** gli impianti non risultano di facile manutenzione a causa della loro installazione in un edificio storico ad elevato interesse culturale. Risulta quindi di difficile applicabilità qualsiasi modifica che necessiti di una rottura dei pavimenti, dei muri o dei soffitti dell'edificio. E' perciò necessaria una manutenzione da parte di addetti che occorre chiamare in caso di necessità.

Il livello più basso (livello E) è stato identificato nella parte di gestione dell'edificio e in particolare relativamente ai servizi disponibili e alla facilità di pulizia dei locali. In particolare:

- **servizi e affini:** ad oggi non sono presenti servizi aggiuntivi, quali: zone ristoro, bookshop, laboratori didattici, ecc. anche se è prevista presto la loro realizzazione. In particolare per la zona ristoro è prevista la realizzazione di una caffetteria al primo piano ammezzato dell'Ala Sud ma ciò comporta la necessità di un adeguamento degli impianti presenti. Per quanto riguarda il bookshop esso sarà realizzato all'interno di una delle sale del primo piano dell'Ala Sud già restaurate. Infine i laboratori didattici verranno realizzati al piano terra

[10] Tali informazioni sono state ottenute da colloqui con personale tecnico del consorzio "Villa Reale e parco di Monza".

dell’Ala Sud. Questi ultimi due servizi non richiedono particolari interventi a livello impiantistico.

- **facilità di pulizia**: la pulizia dei locali del primo piano dell’Ala Sud risulta difficoltosa a causa della presenza di pavimentazioni lignee e arredamenti storici che necessitano di particolari accortezze, quali l’impiego di sostanze e materiali che non alterino chimicamente e fisicamente le superfici. Occorre quindi individuare degli addetti specializzati a trattare con queste tipologie di materiali e fidati. Occorre infatti tenere conto sia dei danni accidentali sia i danni intenzionali che possono provocati da addetti non competenti o malintenzionati.

4.5 LINEE GUIDA PER LA STESURA DI CAPITOLATI TECNICI

Il sistema di indicatori descritto all'interno di questo documento risulta essere uno strumento particolarmente utile per i responsabili della gestione di un edificio di pregio, in quanto consente di evidenziare le principali criticità riguardanti le prestazioni sotto i diversi aspetti considerati: qualità dell'aria, safety, gestione ed efficienza energetica. I risultati dell'analisi permettono quindi di stabilire quali sono le priorità di intervento e a identificare gli obiettivi finali da raggiungere. Una volta effettuati gli interventi, lo stesso sistema di indicatori può essere utilizzato per comprendere se il miglioramento prestazionale voluto è stato raggiunto o meno.

STRUTTURA DI UN CAPITOLATO

Una gara d'appalto per la fornitura di prestazioni d'opera relative ad interventi migliorativi del sistema edificio è suddivisa in due sezioni principali:

- Sezione burocratica: in questa sezione sono inserite tutte le informazioni burocratiche richieste dalla normativa, quali l'oggetto e l'ammontare dell'appalto e i requisiti di partecipazione per i soggetti interessati, e le modalità di aggiudicazione del lavoro.

- Sezione tecnica: in questa sezione sono riportati i requisiti tecnici che le proposte dovranno soddisfare per raggiungere gli obiettivi prestazionali imposti dal committente, in aggiunta ai vincoli da rispettare per garantire la conservazione del patrimonio artistico e culturale rappresentato dall'edificio stesso e dalle opere conservate in esso.

Il sistema di indicatore può risultare particolarmente utile in entrambi le sezioni.

Per quanto riguarda la sezione burocratica, il sistema può essere utilizzato nella fase di valutazione delle proposte. Le modalità maggiormente utilizzate sono "massimo ribasso", classificando le proposte secondo criteri puramente economici e basando la scelta finale sull'offerta che presenta il prezzo più basso fra tutte quelle pervenute, oppure "offerta più vantaggiosa", nelle quali entra in gioco anche una valutazione tecnica delle proposte e la classificazione finale è fatta combinando sia i fattori economici sia quelli tecnici. In questa seconda modalità, il sistema di indicatori è in grado di fornire i livelli prestazionali da poter adottare per classificare gli interventi e determinare l'offerta più vantaggiosa.

La sezione dove il sistema di indicatori risulta particolarmente utile è quella tecnica, nella quale devono essere specificati in modo chiaro gli obiettivi da raggiungere e i vincoli a cui gli interventi devono sottostare. Le modalità con cui il sistema può essere utilizzato per fornire un aiuto efficace nella stesura dei parametri tecnici sono descritte nel Capitolo 0.

REQUISITI TECNICI

Il processo di definizione dei requisiti tecnici per gli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica in edifici di pregio utilizzando il sistema di indicatori definito può essere schematizzato secondo le seguenti attività, come rappresentato in Figura 19:

- *Valutazione dello stato corrente dell'edificio*. Prima di decidere l'esecuzione di lavori di miglioramento sull'edificio, è fondamentale cercare di capire quali sono le condizioni attuale, applicando il sistema di indicatori e valutando per ognuno di essi il livello prestazionale raggiunto sulla base dei livelli indicati in fase di definizione del sistema.

- *Determinazione delle criticità e delle priorità di intervento*. Al termine della valutazione dello stato dell'edificio, è possibile determinare su quali aspetti è necessario intervenire per poter migliorare le prestazioni complessive dell'edificio. Una volta determinati i diversi aspetti per i quali è necessario provvedere a un intervento, si può fare una loro classificazione sulla base delle priorità definite dal committente, che, in caso di edifici di pregio, si possono sintetizzare come conservazione del patrimonio culturale, riduzione dei consumi energetici e riduzione dei costi di gestione della struttura.

- *Identificazione degli obiettivi prestazionali da raggiungere*. Per ognuno degli indicatori che compongono il sistema sono stati definiti cinque livelli prestazionali che consentono ai committenti di poter identificare con semplicità quali sono gli obiettivi che si vogliono ottenere al termine degli interventi sull'edificio. Questi obiettivi costituiscono la base di partenza per la determinazione dei requisiti tecnici da indicare all'interno dei capitolati e che devono essere rispettati nelle offerte di intervento proposte.

- *Simulazione di possibili interventi*. Per ottenere un miglioramento prestazionale del sistema edificio si possono adottare diverse metodologie ed accorgimenti. Ognuna di esse però può un impatto differente sugli altri aspetti considerati all'interno del sistema di indicatori. La simulazione dei possibili interventi sull'edificio tramite il sistema di indicatori definito può rappresentare un valido aiuto per scremare la rosa dei possibili interventi. Inoltre, in questo modo si ottengono precise indicazioni sul fatto che un possibile approccio virtuoso in un campo non comporti un peggioramento su altri aspetti e che quindi la sua adozione risulti controproducente.

- *Individuazione della migliore soluzione*. Sulla base dei risultati che si possono ottenere durante la fase di simulazione dei diversi approcci possibili, si riuscirà ad identificare la soluzione migliore, della quale si riusciranno a definire quali devono essere le caratteristiche tecniche per garantire il raggiungimento degli obiettivi identificati.

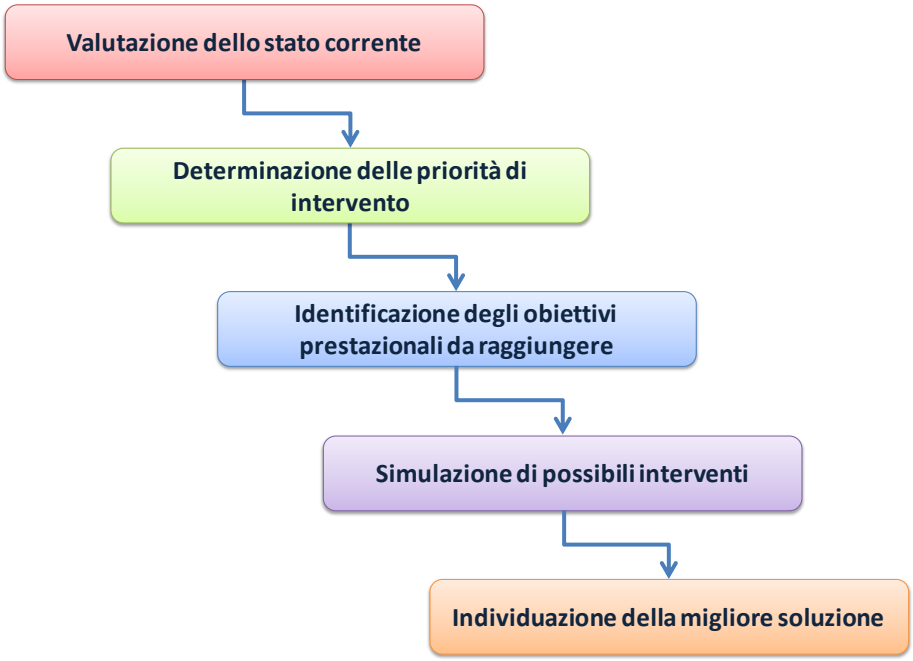


Figura 19: Schema delle attività per la definizione dei requisiti tecnici

Per come è stato definito, il sistema di indicatori può essere utilizzato anche al termine dell'esecuzione degli interventi di miglioramento prestazionale, verificando la rispondenza dei risultati ottenuti con le promesse iniziali e, soprattutto, che gli obiettivi fissati durante la fase di definizione dei lavori s