



Ricerca di Sistema elettrico

# Sviluppo procedura analitico-meccanica semplificata per la valutazione di vulnerabilità e rischio sismico di edifici scolastici: SLaMA-School

Bianchi S., Pedone L., Pampanin S.



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## SVILUPPO PROCEDURA ANALITICO-MECCANICA SEMPLIFICATA PER LA VALUTAZIONE DI VULNERABILITÀ E RISCHIO SISMICO DI EDIFICI SCOLASTICI: SLaMA-SCHOOL

Bianchi S., Pedone L., Pampanin S. (Sapienza Università di Roma)

Febbraio 2022

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: LA1.35 Sviluppo procedura analitico-meccanica semplificata per valutazione vulnerabilità e rischio sismico di edifici scolastici

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Sviluppo di una procedura analitico-meccanica semplificata (SLaMA-School) per la valutazione della vulnerabilità e classificazione del rischio sismico di edifici scolastici”*

Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pollino

Responsabile scientifico Sapienza Università di Roma: Stefano Pampanin

Gli autori desiderano ringraziare: Marianonietta Cimino e Lavinia Mirabelli per il contributo fornito alla valutazione di vulnerabilità sismica di edifici caso-studio nel corso della loro tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile presso Università degli Studi di Roma “Sapienza”.

## Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	7
2 EDILIZIA SCOLASTICA IN ITALIA.....	11
2.1 L'ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA SCOLASTICO.....	11
2.2 EVOLUZIONE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA.....	13
2.3 MODELLI DISTRIBUTIVI E TIPOLOGIE EDILIZIE.....	15
2.4 TIPOLOGIE DI INVOLUCRO.....	17
2.5 LA VULNERABILITÀ DEL SISTEMA SCUOLA.....	19
2.5.1 <i>Rischio sismico</i> .....	20
2.5.2 <i>Efficienza energetica</i> .....	22
3 SVILUPPO E VALIDAZIONE DI SCHEDE DI VULNERABILITÀ SISMICA.....	23
3.1 STRUTTURA DEL MODULO PELL-SCHOOL-RS E RACCOLTA DATI DA SCHEDE ISTITUZIONALI ESISTENTI.....	23
3.2 DATI AGGIUNTIVI PER ANALISI DI VULNERABILITÀ SISMICA.....	27
3.2.1 <i>Criticità di geometria</i> .....	28
3.2.2 <i>Criticità costruttive e dei materiali</i> .....	31
3.2.3 <i>Criticità dei dettagli costruttivi</i> .....	32
3.2.4 <i>Dati dimensionali</i> .....	33
3.3 MANUALE DI COMPILAZIONE SCHEDA.....	35
3.4 VALIDAZIONE DELLA SCHEDA PELL-SCHOOL-RS.....	36
4 PROCEDURA ANALITICO-MECCANICA SEMPLIFICATA SLaMA ED APPLICAZIONE A CASI STUDIO.....	39
4.1 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA SLaMA.....	39
4.2 CLASSIFICAZIONE DEL RISCHIO SISMICO DELLE COSTRUZIONI.....	41
4.2.1 <i>Metodo convenzionale</i> .....	42
4.2.2 <i>Metodo semplificato</i> .....	44
4.3 APPLICAZIONE A EDIFICI CASO STUDIO.....	45
4.3.1 <i>Caso studio 1 – Liceo Bonghi, Lucera (FG)</i> .....	45
4.3.2 <i>Caso studio 2 - Liceo Classico Pietro Giannone</i> .....	51
4.3.3 <i>Caso studio 3 – Istituto Fiani-Leccisotti</i> .....	54
4.4 VALUTAZIONI DI VULNERABILITÀ E SOLUZIONI DI INTERVENTI SISMO-ENERGETICI INTEGRATI.....	58
5 PROCEDURA SLaMA-SCHOOL.....	62
5.1 METODOLOGIA.....	62
5.2 EDIFICIO CASO STUDIO E SCENARI DI ACQUISIZIONE DATI.....	66
5.2.1 <i>Scenario di acquisizione dati n° 1</i> .....	69
5.2.2 <i>Scenario di acquisizione dati n° 2</i> .....	72
5.2.3 <i>Scenario di acquisizione dati n° 3</i> .....	76
5.2.4 <i>Scenario di acquisizione dati n° 4</i> .....	77

5.2.5	<i>Sintesi risultati scenari di acquisizione</i> .....	79
6	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	82
7	APPENDICE A: MANUALE DI COMPILAZIONE SCHEDA.....	84
8	APPENDICE B: MODULO GOOGLE PER RACCOLTA E VALIDAZIONE SCHEDA PELL-SCHOOL-RS .....	95
9	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	98
10	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	102
11	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	104

## Sommario

Il rapporto tecnico descrive l'attività svolta nell'ambito del WP1 - LA1.35 dei Servizi Urbani Energivori, riguardante lo sviluppo del modulo "Risposta Sismica" per la piattaforma PELL-School, che mira a diventare uno standard ed un database interoperabile per la raccolta dei dati rilevanti per la valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico, nonché per il monitoraggio sismico delle scuole presenti sul territorio nazionale.

In una prima fase, l'attività ha riguardato la caratterizzazione degli edifici scolastici in Italia. Nello specifico, a seguito di uno studio iniziale sull'organizzazione del sistema scolastico e sulla sua suddivisione per tipologia ed appartenenza geografica, è stata esaminata con maggiore dettaglio l'evoluzione degli edifici scolastici dalla fine dell'800 ai giorni moderni, con particolare riferimento ai principali modelli distributivi, tipologie edilizie e di involucro edilizio. Con riferimento a dati statici disponibili tramite indagini da parte di enti pubblici e privati, è stata inoltre valutata la vulnerabilità dell'edilizia scolastica in termini di rischio sismico ed efficientamento energetico.

Successivamente, il lavoro ha interessato lo sviluppo e la validazione di una scheda di raccolta dati per il modulo "Risposta Sismica" della piattaforma PELL-School (PELL-School-RS). Data la natura interoperabile della piattaforma con altri database e schede istituzionali esistenti, l'attività ha riguardato, da un lato, la revisione dei principali moduli esistenti, che sono stati considerati come riferimento per la struttura dei dati del modulo PELL-School-RS; dall'altro lato, sono stati individuati parametri di input aggiuntivi per la descrizione delle principali peculiarità e criticità strutturali dell'edificio, in accordo con i più recenti sviluppi nell'ambito della valutazione di vulnerabilità sismica degli edifici esistenti a livello internazionale.

A supporto della compilazione della scheda è stato inoltre predisposto un manuale contenente una completa descrizione di ogni parametro richiesto e comprensivo di immagini e rappresentazioni schematiche esplicative. Per di più, al fine di ottenere una validazione preliminare della scheda da parte di ingegneri e/o tecnici specializzati coinvolti nella compilazione, è stato realizzato un modulo Google con l'obiettivo di raccogliere giudizi sulla scheda proposta, per capire come migliorarne la struttura e facilitarne ulteriormente la compilazione. I dati raccolti dal modulo hanno evidenziato come la scheda risulti mediamente di facile compilazione; tra i campi più ostici in fase di compilazione sono state indicate le voci riguardanti l'armatura della maglia elettrosaldata del solaio e la sezione relativa ai setti. Inoltre, è stato anche evidenziato come la scheda sia completa ed adeguata, nonché l'utilità del manuale proposto a supporto della compilazione.

In aggiunta, l'attività ha riguardato la descrizione dei passaggi chiave per l'implementazione della procedura SLaMA (Simple Lateral Mechanism Analysis), discutendone i principali obiettivi e gli evidenti vantaggi sia in termini di onere computazionale che di identificazione delle criticità strutturali a livello locale (i.e., identificazione dei meccanismi fragili e della gerarchia delle resistenze a livello di sotto-assemblaggio nodo - trave-pilastro) e globale (i.e., valutazione del meccanismo inelastico atteso e della curva di capacità forza-spostamento della struttura). La procedura analitico-meccanica SLaMA per l'individuazione della classe di rischio sismico degli edifici scolastici è stata quindi validata con riferimento ad una serie di casi studio, nonché attraverso un confronto con analisi di vulnerabilità sismica più raffinate basate su Modelli numerici agli Elementi Finiti (FEM) a plasticità concentrata. È stata trattata in modo qualitativo anche la problematica relativa ad una riqualificazione integrata sismica, energetica ed architettonica del patrimonio edilizio italiano, illustrando le metodologie recentemente proposte in letteratura per una valutazione di vulnerabilità e rischio univoca (sismico ed energetico), nonché discutendo possibili soluzioni di intervento integrato.

In conclusione, il lavoro ha interessato lo sviluppo della procedura SLaMA-School, che consente di ottenere una valutazione preliminare della classe di rischio sismico di una struttura sotto forma di range/fuso, in base al livello di acquisizione dati disponibile tramite la scheda del modulo PELL-School-RS. La metodologia è stata discussa ed illustrata attraverso la sua applicazione ad un edificio caso studio, simulando differenti scenari di acquisizione dati (da limitata ad esaustiva) e tenendo dunque in conto delle incertezze relative a ciascuno di essi. I risultati ottenuti evidenziano come sia possibile ridurre il range di valori di rischio attesi passando da uno scenario di acquisizione dati limitato ad uno parziale e/o esaustivo. In aggiunta, anche nel caso in cui

L'acquisizione dati si limiti alla sola conoscenza della geometria della struttura e del periodo di costruzione, applicando la procedura analitico-meccanica SLAMA a seguito di un progetto simulato è possibile individuare fin da subito un meccanismo inelastico analogo a quello ottenuto negli scenari di acquisizione dati più completi, e dunque ottenere un range di valori di rischio attesi effettivamente rappresentativo della struttura, seppur più ampio ed a favore di sicurezza per le ipotesi cautelative adottate. In particolare, la struttura caso studio analizzata è ricaduta in un range di classe di rischio C-E nel caso di un livello di acquisizione dati minimo, B-C nel caso di livello di acquisizione dati parziale ed una classe C nel caso di livello di acquisizione dati completo. Attraverso un collegamento diretto con la scheda PELL-School-RS, questa metodologia permetterà in futuro di supportare una raccolta dati per gli edifici scolastici a livello nazionale, tramite l'identificazione di una prima classificazione del rischio sismico di tali edifici nonché la definizione di una scala di priorità d'intervento per un piano di riqualificazione sismica del territorio italiano.

## 1 Introduzione

L'Italia è uno dei paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo, per la frequenza dei terremoti che hanno storicamente interessato il territorio e per l'intensità che alcuni di essi hanno raggiunto, determinando un impatto sociale ed economico rilevante. Ricordando la definizione convenzionale di **Rischio Sismico** come combinazione di Pericolosità x Vulnerabilità x Esposizione (Figura 1), è evidente come, non potendo, in particolar modo nel caso di edifici esistenti, operare sulla riduzione della Pericolosità, legata alla sismicità del territorio, o sull'Esposizione - se non imponendo tanto estreme quanto impraticabili politiche sociali di rilocalizzazione della popolazione in zone/regioni ad inferiore pericolosità sismica - l'unico e fondamentale fattore su cui è possibile direttamente **operare è la Vulnerabilità del costruito**, attraverso interventi tecnico-strutturali che ne migliorino le prestazioni attese.



**Figura 1. Concetto di Rischio Sismico inteso come combinazione di Pericolosità X Vulnerabilità X Esposizione**

A seguito di un evento sismico “di progetto” (tipicamente associato ad un periodo di ritorno di circa 500 anni, pari cioè ad una non trascurabile probabilità del 10% di avvenire con intensità pari o superiore nell’arco di 50 anni, ossia nella vita utile della struttura), **una progettazione sismica “da norma”** dovrebbe garantire, dunque accettare, un livello di danno pari e non superiore allo Stato limite di **Salvaguardia della Vita Umana (SLV)**, per la quale si intende che *“a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali”* (NTC, 2018 [1]). Questa definizione è ben **lungi dal concetto di “sistema antisismico”**, dato che il sistema strutturale sismo-resistente non ha l’obiettivo di rimanere “intatto” dopo un evento di progetto ma piuttosto di assorbire il **danno in specifiche regioni (cerniere plastiche)** che lavorino come fusibili sacrificali evitando il collasso della struttura.

Inoltre, le componenti dell’involucro o cosiddetti **componenti non-strutturali** (facciate, partizioni, infissi, tamponature/tramezzi, controsoffitti, impianti) sono elementi **particolarmente vulnerabili** di fronte ad azioni sismiche anche di lieve-moderata entità, per le quali la struttura-scheletro potrebbe non aver subito danni significativi. Dunque, la probabilità di danneggiamento degli elementi non-strutturali di un edificio nell’arco della sua vita utile è nettamente superiore a quella della struttura-scheletro. Se si aggiunge il fatto che il costo-investimento degli elementi non-strutturali rappresenta una percentuale preponderante (circa 80-90%) del costo di costruzione, risulta evidente la necessità di uno studio di vulnerabilità che includa anche gli elementi non-strutturali, quantificandone gli impatti in termini di costi di riparazione e perdita di operabilità e studiandone soluzioni adeguate e specifiche di protezione antisismica.

Quindi, se da un lato la Salvaguardia della Vita Umana (SLV) rimane l’obiettivo principale sia in fase di progettazione di nuove costruzioni che di miglioramento del costruito, **è necessario alzare l’asticella** e puntare a politiche e strategie di riduzione del rischio a livello nazionale che mirino, nei limiti della praticità

e a fronte delle limitate risorse disponibili, alla riduzione e controllo del danno (SLD) (Pampanin [2], Doglioni & Pampanin [3]).

Tenendo conto di questo, negli ultimi anni è sempre più evidente l'**urgenza di un piano coordinato ed esteso a scala nazionale per la riqualificazione del patrimonio edilizio sul territorio italiano**, non solo in termini di salvaguardia e miglioramento della sicurezza strutturale e sismica, ma anche in grado di combinare aspetti ed esigenze architettoniche, funzionali, energetiche [4-7]. Tuttavia, la valutazione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti nonché la definizione di soluzioni di rinforzo appropriate nascondono un livello di complessità superiore rispetto alla progettazione di nuove strutture. Inoltre, la ristrettezza di risorse economiche per poter implementare interventi a scala nazionale e l'assenza di un piano di priorità basato su considerazioni di rischio ed analisi costi-benefici sono spesso additati come ostacoli primari per la realizzazione di un progetto di rinnovo costante e di ampio respiro per una ristrutturazione su larga scala del patrimonio edilizio. Eppure, studi e valutazioni comparative sull'efficacia di una strategia di prevenzione sismica rispetto ad un approccio di reazione/cura post-evento ne mostrano chiaramente i vantaggi a lungo termine e a livello nazionale.

Un approccio olistico per uno **studio integrato** della vulnerabilità **sismo-energetica** e per interventi di riabilitazione globale dello stock di edifici a livello nazionale rappresenterebbe un'opportunità unica ed un investimento a lungo termine per l'intero Paese (Pampanin [8]). Tale approccio richiede il coordinamento e l'integrazione di più competenze e tecnologie specialistiche, tipicamente focalizzate su aspetti e prestazioni individuali, ovvero sicurezza strutturale e sismica, efficienza energetica, caratteristiche architettoniche ed estetiche, funzionalità, sostenibilità in termini generale, nonché conservazione e restauro.

In base alle considerazioni fin qui sviluppate, è evidente la necessità di approcci e metodologie che:

- consentano di migliorare ed aggiornare gli strumenti di '**diagnosi**' e '**prognosi**' utilizzati dagli ingegneri e tecnici del settore, facendo riferimento ai più recenti risultati di ricerca numerico-sperimentale a livello internazionale nonché alle osservazioni sul campo a seguito dei più recenti eventi sismici;
- uniformare i giudizi dei tecnici valutatori tramite l'utilizzo di un **approccio semplificato**, ma su **base meccanica**, in grado di evidenziare le criticità strutturali dell'edificio oggetto delle analisi;
- ristabilire il ruolo critico e dunque richiamare le responsabilità professionali **dell'ingegnere sismico** (e.g. strutturista, geotecnico) perché utilizzi un **approccio olistico** di comprensione del problema prima ancora di affidarsi al calcolatore, nell'illusione ormai diffusa che ad un maggiore onere computazionale corrisponda necessariamente una maggiore accuratezza e precisione dei risultati.

Con riferimento all'edilizia scolastica, la cui fragilità è stata ancor più confermata a seguito degli ultimi eventi sismici (Figura 2), nell'ambito del "PTR\_19\_21\_ENEA\_PRG\_6", il Team di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica (DISG) della Università degli Studi "Sapienza" di Roma si è posto come obiettivo lo sviluppo e la validazione di una procedura per la valutazione della vulnerabilità sismica e classificazione del rischio sismico di tali edifici, denominata SLAMA-School.



Figura 2. Il crollo della scuola di Amatrice a seguito del terremoto del 24 agosto 2016

La procedura **SLaMA - Simple Lateral Mechanism Analysis** - (NZSEE, 2017 [9]) si sviluppa a partire dalla identificazione delle vulnerabilità critiche attese ed attraverso la valutazione delle capacità (sia in termini di forze che di spostamenti) degli elementi strutturali, per poi definire la **gerarchia delle resistenze** delle connessioni o sottosistemi trave-pilastro e quindi i meccanismi di collasso locali e globali dei principali sistemi sismo-resistenti nelle due direzioni ortogonali. La procedura rappresenta una valida alternativa ai modelli numerici (e.g. basati sull'utilizzo di modelli ad elementi finiti), consentendo valutazioni rapide, standardizzate ed eseguibili con diverso livello di conoscenza dell'edificio. Tale approccio consente sia a livello di singolo edificio sia di gruppi di edifici di definire una prima scala di vulnerabilità e rischio sismico, supportando lo sviluppo di piani di intervento, inclusivi di tempi-costi indicativi, e dunque di priorità di intervento in base alle effettive risorse economiche a disposizione.

La procedura SLaMA-School consente di definire un livello di sicurezza "relativo" ad una struttura di nuova progettazione, tramite l'utilizzo dell'indice IS-V (DM65 2017 [10], equivalente alla %NBS, New Building Standard [9]), nonché di valutare la Perdita Annuale Media (PAM) prima e dopo un intervento di miglioramento/rinforzo sismico e di associare una classe di rischio (da A+ a G, con valori indicativi delle probabilità di collasso relative ad una struttura di nuova progettazione), candidandosi dunque come strumento fondamentale di supporto per l'attuazione di una strategia a medio-lungo termine di riduzione del rischio sismico a scala nazionale.

Nel corso della Linea di Attività, qui riportata, il lavoro di ricerca si è focalizzato sui seguenti aspetti:

- caratterizzazione degli edifici scolastici in Italia tenendo conto dell'evoluzione storica, delle tipologie edilizie e strutturali, delle tipologie di involucro, nonché delle vulnerabilità del sistema scuola in termini di rischio sismico ed efficientamento energetico;
- predisposizione e validazione di schede di rilievo di primo livello per l'acquisizione di dati e parametri fondamentali per la definizione della vulnerabilità sismica degli edifici, nonché per l'implementazione della procedura meccanico-analitico semplificata;
- descrizione al passo della procedura SLaMA-School per edifici scolastici a scala territoriale, sia con riferimento ad edifici in calcestruzzo armato che in muratura;
- implementazione della procedura a casi studio selezionati. Individuazione delle criticità strutturali e non strutturali e dei meccanismi di collasso locale e globale attesi. Valutazione delle curve di capacità forza - spostamento, valutazione del livello di sicurezza, secondo la normativa vigente italiana (NTC 2018, [1]);
- valutazione dei livelli prestazionali attesi ai vari livelli di intensità (periodo di ritorno) sismica, calcolo dell'indice di Sicurezza (IS-V), stima delle Perdite Annue Medie (PAM) e della classe di rischio secondo quanto indicato nel Decreto Sisma-Bonus [10];
- valutazione dei livelli prestazionali attesi considerando differenti scenari di acquisizione dati. Applicazione illustrativa della procedura ad un caso studio selezionato.

Si osserva che la scheda di vulnerabilità sismica qui proposta è stata sviluppata sulla base di schede esistenti ed arricchita di molti altri dati ed informazioni relative all'edificio. La scheda può indirizzare nel reperimento e catalogazione di informazioni più complete sugli edifici scolastici e sugli interventi di messa in sicurezza effettuati nel passato sulle strutture, nonché nell'acquisizione di dati relativi a pericolosità ed amplificazione locale dei siti in cui sono costruite le scuole per determinare i parametri di scuotimento alla base delle successive valutazioni di rischio.

Le informazioni geometriche e meccaniche raccolte nella scheda diventano invece i dati di input per la procedura analitica SLaMA, implementata con diverso livello di conoscenza dell'edificio scolastico. In particolare, il range di curve di capacità (curve limiti superiori ed inferiori forza-spostamento) associate all'edificio per il quale si ha una conoscenza base può essere continuamente raffinato in fasi successive in funzione dell'acquisizione di ulteriori dati/informazioni/verifiche caratterizzanti l'edificio.

Tutto questo consente di effettuare analisi di rischio per ciascuna delle scuole individuate, stime di classificazione del rischio e valutazioni di analisi costi benefici in caso di interventi di riduzione della vulnerabilità, nell'ottica di predisposizione di piani di riduzione del rischio e continuo aggiornamento dei parametri di rischio.

## 2 Edilizia scolastica in Italia

Nel corso degli ultimi due secoli si è assistito ad una continua evoluzione nel panorama dell'edilizia scolastica in Italia, dovuta ai cambiamenti dei metodi educativi nel corso del tempo, a loro volta influenzati dal tipo di società, dalla legislazione e dallo stile di vita della popolazione. In base al metodo educativo adottato, alle disponibilità sociali e alla politica della società stessa, gli edifici scolastici sono stati strutturati con caratteristiche diverse per cercare di adattarsi alle esigenze dell'istruzione nel miglior modo possibile.

In questo capitolo viene esaminata e descritta l'edilizia scolastica in Italia. Il capitolo presenta una parte introduttiva sull'organizzazione del sistema scolastico e la sua suddivisione, per tipologia e appartenenza geografica delle varie istituzioni scolastiche e delle singole sedi di erogazione del servizio presenti sul territorio nazionale. Dopodiché, il capitolo si focalizza sull'evoluzione degli edifici scolastici dalla fine dell'800 ai giorni moderni, nonché sui principali modelli distributivi, tipologie edilizie e di involucro che caratterizzano l'edilizia scolastica italiana. Infine, la vulnerabilità dell'edilizia scolastica, con riferimento al rischio sismico e al problema di efficientamento energetico, è presentata con riferimento a dati e statistiche disponibili.

### 2.1 L'organizzazione del sistema scolastico

L'attuale sistema scolastico italiano è organizzato, secondo gli ultimi riferimenti normativi vigenti (DPR 89/2009 [11] per il primo ciclo di istruzione e DPR 89/2010 [12] per il secondo ciclo di istruzione) come indicato in Figura 3, ossia:

- scuola dell'infanzia, per i bambini da tre a sei anni;
- primo ciclo di istruzione: scuola primaria, per i bambini da sei a undici anni; scuola secondaria di primo grado, per alunni da undici a quattordici anni;
- secondo ciclo di istruzione: scuola secondaria di secondo grado, ossia i licei, gli istituti tecnici e gli istituti professionali; percorsi triennali o quadriennali di istruzione e formazione professionale;
- istruzione superiore offerta dalle Università, dall'Alta Formazione Artistica e Musicale (A.F.A.M.) e dagli Istituti Tecnici Superiori (I.T.S.).

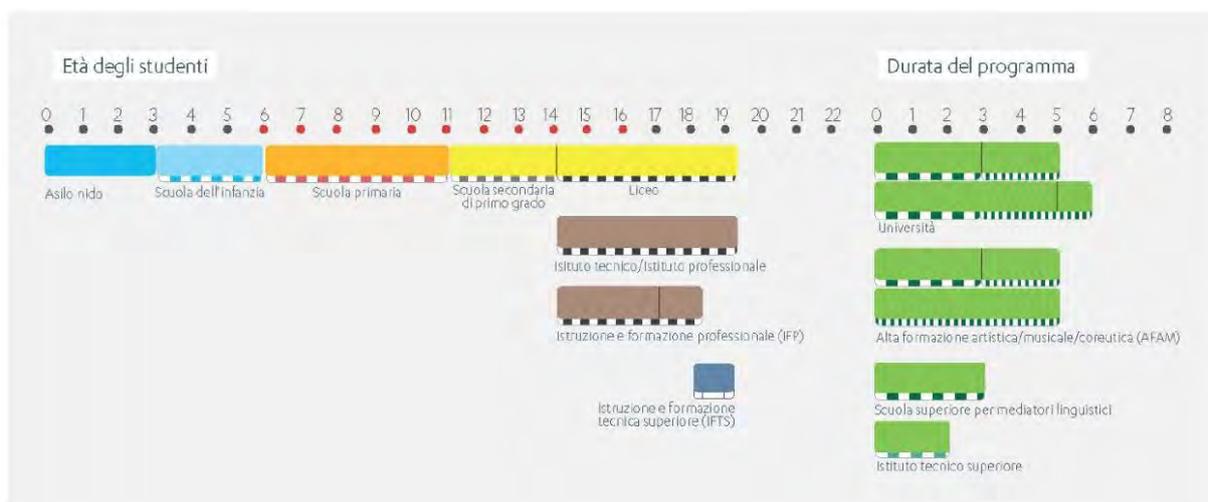


Figura 3. Sistema scolastico italiano (fonte: MIUR)

La responsabilità amministrativa ed economica per quanto concerne l'istruzione nelle scuole di ogni ordine e grado è affidata allo Stato, che opera tramite il già Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR), recentemente diviso in due dicasteri: il MI (Ministero dell'Istruzione) ed il MUR (Ministero dell'Università e Ricerca). Esso (MI) ha funzioni relative all'organizzazione della rete scolastica, alla determinazione ed assegnazione delle risorse economiche ed umane da destinare alle singole istituzioni scolastiche ed ai parametri di valutazione del Sistema scolastico. Tutte le scuole, per quanto riguarda

contenuti dell'insegnamento, ordinamenti scolastici ed obiettivi formativi e di apprendimento, sono vincolate secondo le norme generali definite dal Ministero.

A livello regionale, invece, gli Uffici Scolastici Regionali ricoprono compiti di: composizione del calendario scolastico, programmazione dell'offerta formativa integrata tra istruzione e formazione professionale e di programmazione ed erogazione dei percorsi di formazione professionale attraverso convenzioni con altre strutture. Nonostante a livello normativo siano riconosciuti come autonomi centri di responsabilità amministrativa, questi uffici devono lavorare in continua sinergia con lo Stato attraverso la conferenza unificata Stato-Regioni.

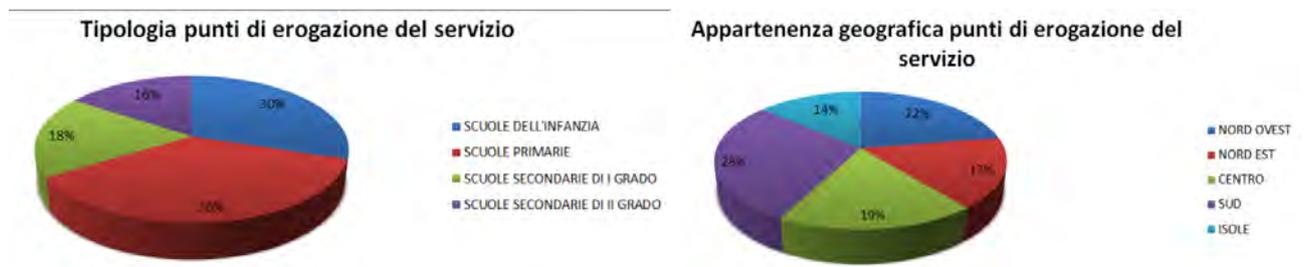
Ai Comuni, infine, sono assegnati funzioni concernenti l'istituzione, la fusione e la soppressione delle singole sedi scolastiche. Essi, inoltre, hanno la responsabilità sulle sospensioni delle lezioni in caso di eventi gravi e hanno il compito di vigilare sul corretto lavoro degli organi collegiali scolastici. Hanno infine il dovere di fornire i locali, l'illuminazione, il riscaldamento, l'approvvigionamento idrico ed i servizi telefonici. Per gli edifici scolastici del primo ciclo di istruzione, di cui sono proprietari, hanno l'obbligo di sostenere le spese per la manutenzione ordinaria e straordinaria, diversamente, per gli edifici scolastici del secondo ciclo d'istruzione, tale dovere spetta alla Provincia, proprietaria di queste sedi.

**Le singole strutture vengono normalmente dimensionate secondo l'entità della popolazione scolastica accolta (normalmente tra i 500 e i 900 alunni).** Oltre a tale aspetto, però, ci sono altri fattori che influenzano il quantitativo e la distribuzione territoriale dei punti di erogazione, come le caratteristiche territoriali dei luoghi, i piani urbanistici e gli interventi di politica scolastica dei soggetti istituzionali preposti.

I vari punti di erogazioni del servizio sono accorpati in organismi detti "Istituzioni scolastiche", la cui funzione è regolata dal DPR 275/99 [13], il quale ha trasferito alle scuole importanti funzioni amministrative e di gestione del servizio di istruzione. Tali istituzioni possono dividersi in:

- circoli didattici, di solito costituiti da scuole primarie ed a volte accorpate con scuole dell'infanzia;
- istituti comprensivi, i quali, oltre a scuole dell'infanzia e primarie, comprendono anche le scuole secondarie di I grado;
- istituti principali di I grado, risultati dell'accorpamento di più scuole secondarie di I grado;
- istituti principali di II grado, in cui sono presenti solo singole scuole secondarie di II grado, senza alcuna unificazione;
- istituti di istruzione secondaria superiore, i quali accorpano più scuole secondarie di II grado;
- altri organismi, come C.P.I.A.6, convitti ed educandati.

Passando alle singole sedi, il MIUR fornisce dati che consentono di quantificare e diversificare i vari punti di erogazione del servizio, sia per tipologia che per appartenenza geografica (Figura 4).



**Figura 4. Suddivisione, per funzione didattica e appartenenza territoriale, dei punti di erogazione del servizio scolastico (fonte: MIUR)**

## 2.2 Evoluzione dell'edilizia scolastica

Intorno alla metà del 1800 vennero inaugurate per la prima volta grandi costruzioni destinate ad ospitare esclusivamente le scuole. Nel 1859 fu emanata la prima legge sulla scuola che riformò l'organizzazione del sistema scolastico ed, in particolare, introdusse l'obbligatorietà e la gratuità dell'istruzione elementare e stabili che spettava ai Comuni la costruzione delle scuole.

Nel 1888, sotto il governo Crespì, vennero pubblicate le prime disposizioni normative in materia di edilizia scolastica, le quali definirono i criteri per le nuove costruzioni scolastiche, con particolare attenzione alla salubrità, all'esposizione e all'igiene. L'impianto planimetrico era definito secondo la tipologia "a blocco" con forma lineare, ad "L", o a "C" con modello distributivo "a corridoio", caratterizzato da una serie di aule collegate da un corridoio che si affacciavano verso la strada o verso il cortile interno. Inoltre, nelle grandi città la scuola sorgeva direttamente a margine del marciapiede (Figura 5), mentre nei paesi di campagna la scuola manteneva un aspetto più semplice ma con uno spazio aperto maggiore.



**Figura 5. Esempio di scuola in città: Scuola "G. Micheli" di Livorno, inaugurata a fine '800**

Lo sviluppo crebbe col passare degli anni e nel 1911 il Ministero della Pubblica Istruzione pubblicò la "Casa della Scuola", una raccolta di progetti tipo, al fine di definire un modello unico di edificio scolastico. Le strutture scolastiche, edificate in questa fase, furono tutte costruite in muratura portante con una minuziosa scelta di materiali costituenti le varie parti della struttura, in accordo con le disposizioni del regolamento del 1888. Con l'avvento della Prima Guerra Mondiale, gli studi in materia di edilizia scolastica subirono un arresto poiché, durante il conflitto bellico, le scuole vennero usate sia come luoghi di riparo che come magazzini militari.

Durante l'affermarsi del regime fascista riprese lo sviluppo dell'edilizia scolastica e si assistette ad una fase di transizione per quanto concerne le tecniche costruttive delle scuole. L'edificio scolastico dell'epoca fascista, con il suo aspetto imponente, doveva trasmettere autorità e rispetto attraverso un'architettura semplice e monumentale al tempo stesso. Caratteristiche peculiari delle costruzioni scolastiche di quell'epoca erano: la ripetizione di forme geometriche come il cubo e il cilindro, l'uso di coperture piane, l'utilizzo di lastre piane di marmo per le facciate, contrasto dei bianchi e dei neri e l'assenza di decorazioni, come è possibile notare dalla Figura 6. I propositi dei dirigenti fascisti erano di improntare la scuola al modello militaresco della caserma, di conseguenza il modello distributivo utilizzato per tutti questi edifici fu quello "a corridoio".



**Figura 6. L'Università degli studi di Trieste, fondata nel 1924, chiara espressione dell'architettura fascista**

Dal punto di vista delle tecniche costruttive, in quell'epoca il calcestruzzo armato era già una realtà ben radicata negli stati europei, ma in Italia ebbe una presa molto lenta; a conferma di ciò si ha che la maggior parte di edifici scolastici costruiti in quegli anni sono strutture miste con elementi verticali in pietra e corpi scala, solai e balconi realizzati in calcestruzzo armato. In particolare, per quanto riguarda i solai, furono introdotti solai latero-cementizi che assicuravano maggiore rigidezza, resistenza e coibentazione rispetto ai solai in legno o a quelli in putrelle e tavelloni.

Nella fase che va dal dopoguerra ai primi anni '60, dal punto di vista architettonico, l'obiettivo fu quello di riconfigurare completamente l'edificio scolastico. La scuola acquistò una doppia funzione, rappresentando sia il luogo fulcro della vita sociale dei ragazzi, sia il luogo di sviluppo del bambino; si passò quindi alla ricerca del funzionalismo psicologico. Il risultato che ne scaturì fu l'abbandono del modello della scuola caserma, con modello distributivo "a corridoio", a favore di un modello distributivo chiamato "ad unità funzionale", ovvero uno spazio caratterizzato da una distribuzione delle aule secondo la loro funzione ed intervallate da spazi comuni e relativi servizi, senza seguire l'ordine del corridoio o del portico.

Nel 1954 il Centro Studi della Pubblica Istruzione preparò un nuovo regolamento per la progettazione degli edifici scolastici: vennero pubblicati quattro quaderni riguardanti l'edilizia degli edifici delle scuole elementari, medie e materne, nei quali si diedero precise disposizioni per l'illuminazione naturale ed artificiale delle aule e per la loro areazione.

Le scuole edificate in questi anni sono state quindi realizzate, per la maggior parte, con struttura portante intelaiata in calcestruzzo armato, anche se non mancano esempi di edifici scolastici realizzati in muratura portante. Per le coperture, spesso piane e non praticabili, si abbandonò definitivamente il legno, adottando la stessa tecnologia costruttiva che veniva utilizzata per i solai di interpiano (solai latero-cementizi).

Nei primi anni '60 venne nominata una Commissione nazionale di studio sull'edilizia scolastica avente come scopo anche quello di analizzare lo stato dell'arte delle scuole. Nel 1967, la Commissione redasse la prima legge che affrontò direttamente il problema dell'edilizia scolastica; in mancanza di una corrispondente normativa tecnica attuativa, non ebbe però alcun effetto. Risale al 1975 la prima normativa tecnica dell'edilizia scolastica, che rappresenta ancora oggi i principi di base a cui si rifanno i progettisti per gli edifici scolastici di nuova costruzione.

Negli anni successivi non si ebbero importanti novità circa lo sviluppo dell'edilizia scolastica fino ad arrivare alla fine degli anni '80 in cui ebbe un grande impulso la prefabbricazione che interessò anche tali costruzioni.

Dai primi anni '90 ad oggi ci troviamo di fronte a due tendenze per quanto concerne lo sviluppo dell'edilizia scolastica. La prima riprende la tradizione della fase precedente e quindi si incentra sulla sperimentazione di nuove tecnologie, con una progettazione di edifici cubici e compatti, i quali offrono un'ampia molteplicità di soluzioni spaziali. In particolare, l'attenzione inizia a concentrarsi sull'adozione di tecniche e tecnologie di progettazione finalizzate al controllo bioclimatico degli ambienti. La seconda riguarda l'urgente riorganizzazione e recupero degli edifici scolastici esistenti, gran parte dei quali edificati nel secondo

dopoguerra, con l'obiettivo di ottenere ambienti adeguati attraverso interventi che tengano conto contemporaneamente di aspetti strutturali, funzionali, distributivi, ambientali, architettonici e tecnologici.

Attualmente lo sviluppo dell'architettura scolastica italiana è incentrato sempre più verso la sostenibilità ambientale, come evidenziato dal caso in Figura 7. Lo spazio pedagogico diviene propedeutico al concetto di sostenibilità, attraverso l'uso creativo e innovativo dello spazio e del design, promuovendo l'educazione anche attraverso l'interazione di tecnologie, si cercano soluzioni e materiali che rendano il bambino attivo e stimolato in grado di interagire con lo spazio fisico e sociale.



**Figura 7. Esempio di scuola progettata secondo i principi dell'edificio a "energia zero": la Scuola primaria Roberto Mazzetti, Loiano (BO)**

In sintesi, sei diverse fasi contraddistinguono la storia dell'edilizia italiana e sono sintetizzate in Tabella 1.

**Tabella 1. Evoluzione dell'edilizia scolastica in Italia**

<b>Fase</b>	<b>Periodo storico</b>	<b>Caratteristiche edilizia scolastica</b>
1	Metà anni '80 - I Guerra Mondiale	Tipologia edilizia "a blocco", strutture in muratura portante
2	Ventennio Fascista	Architettura semplice e monumentale, modello della "scuola-caserma", strutture in maggioranza miste muratura-calcestruzzo
3	II Guerra Mondiale - primi anni '60	Nascita del modello distributivo ad "unità funzionale", strutture in maggioranza in calcestruzzo armato
4	Primi anni '60 - metà anni '70	Prima ondata di prefabbricazione, con tecnica della "prefabbricazione aperta"
5	Inizio anni '80 - metà anni '90	Seconda ondata di prefabbricazione, produzione edilizia molto variegata
6	Metà anni '90 - oggi	Ricerca di nuove metodologie costruttive e recupero dell'esistente

### 2.3 Modelli distributivi e tipologie edilizie

Le diverse tipologie edilizie che troviamo all'interno del parco immobiliare scolastico italiano sono generate da modelli distributivi che definiscono il rapporto tra aule e spazi accessori, dando vita a differenti configurazioni architettoniche. Come evidenziato nel paragrafo precedente sull'evoluzione dell'edilizia

scolastica italiana, i modelli principalmente presenti nel panorama nazionale sono due: lo schema “a corridoio” e lo schema a “unità funzionale”.

Il modello distributivo “a corridoio” è caratterizzato dalla successione di aule adiacenti collegate tra loro da corridoi lineari, da cui ne deriva il nome. Esso rappresenta lo schema più ricorrente nella tradizione scolastica italiana e, malgrado le critiche ricevute durante gli anni ‘50, ha continuato a caratterizzare gli edifici scolastici per molti decenni. Le aspre critiche furono dovute al fatto che privilegiava lo spazio aula dando poca o nulla importanza agli spazi di socializzazione collettiva, relegati a semplici corridoi di collegamento.

Il modello distributivo ad “unità funzionale” è invece generato da tanti nuclei base tutti collegati ad uno spazio comune. Tali nuclei possono corrispondere con le singole aule oppure essere costituiti da più aule. Possiamo collocare temporalmente la sua origine nel secondo dopoguerra, in cui la ricostruzione post-bellica e lo sviluppo economico hanno permesso sperimentazioni in questo campo.

Un esempio dei due modelli distributivi è presentato in Figura 8.

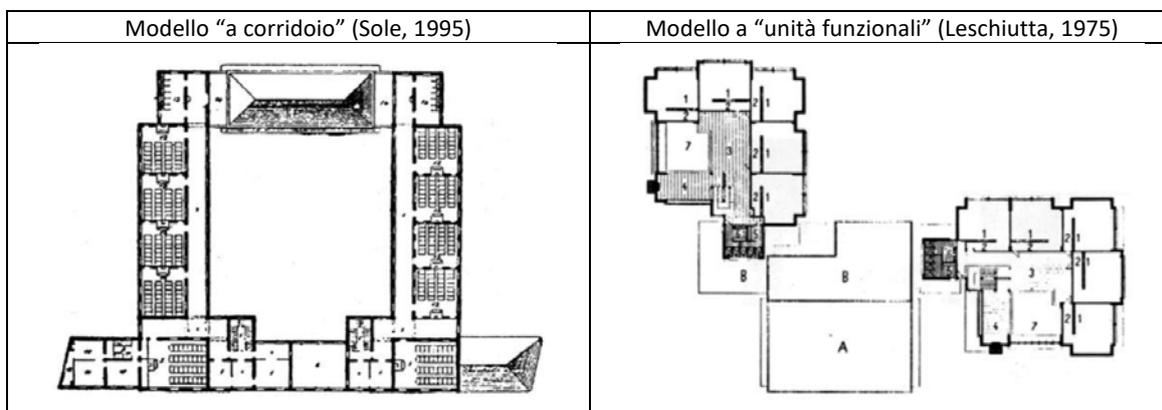


Figura 8. Modello distributivo “a corridoio” [14] (sinistra) ed a “unità funzionali” [15] (destra)

Le tipologie edilizie derivano da questi due modelli e sono di seguito descritte, nonché mostrate in Figura 9.

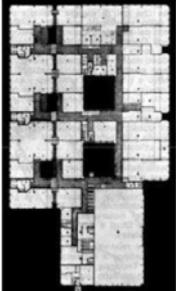
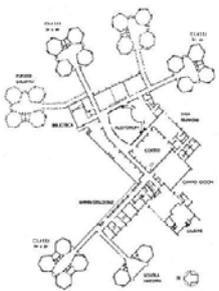
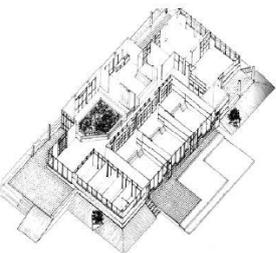
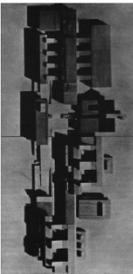
Scuola a blocco (Sole, 1995)	Scuola a piastra (Leschiutta, 1975)	Scuola estesa (Sole 1995)
		
Scuola open-plan (Leschiutta, 1975)	Scuola-strada (Leschiutta, 1975)	Edifici impropri
		 <p data-bbox="975 1906 1214 2016">Ex-Caserma, attualmente Università di Modena e Reggio Emilia</p>

Figura 9. Tipologie edilizie [14,15]

*Scuola a blocco*: Discende dallo sviluppo dello schema a corridoio ed è la più antica tra le varie tipologie. Le dimensioni dell'edificio scolastico non si discostano molto da quelle delle abitazioni circostanti. Le aule sono generalmente posizionate verso la strada principale, mentre il corridoio di collegamento si trova sul retro. Da tale tipologia, derivano ulteriori successive evoluzioni: "blocco accorpato", "blocco con vuoto interno" e "a gradoni".

*Scuola a piastra*: Tale schema raccoglie al suo interno tutte le funzioni collegate alle attività didattiche della scuola. Nel tipo a blocco, tutti gli ambienti didattici diversi dalle aule sono collocati all'esterno in blocchi separati dall'edificio principale. La scuola a piastra si sviluppa invece in altezza per uno o al massimo due piani, presentando quindi elevate dimensioni planimetriche. L'impianto distributivo può essere sia "a corridoio" sia del tipo "ad unità funzionali", raggruppate tutte sotto la stessa copertura.

*Scuola estesa*: Tale tipologia (secondo dopoguerra) tende ad ampliare la scuola verso gli spazi esterni, con una organizzazione spaziale e distributiva molto diversificata. Solitamente, si differenzia notevolmente con l'impianto razionalista della scuola a blocco, improntando la propria distribuzione secondo il modello ad unità funzionale nell'ottica di una progressiva crescita dell'edificio nel tempo. In alcuni casi, possono ritrovarsi dei caratteri tipologici che seguono il modello a corridoio (schema a croce e schema a pettine).

*Scuola open plan*: Questa tipologia edilizia, sviluppata tra gli anni '60 e '70, ha come obiettivo principale quello di ottenere il massimo risparmio dello spazio interno. Per ottenere questo vengono eliminati gli elementi connettivi creando una successione di aule per la didattica, separate tra loro da pareti mobili attrezzate. La presenza di tali elementi divisorii non fissi rende questa configurazione estremamente flessibile.

*Scuola-strada*: L'edificio scolastico viene percepito come una città. Alle diverse aule sono associate gli edifici, mentre agli spazi pubblici e agli elementi connettivi vengono accostati le strade urbane. L'impianto distributivo è costituito da un asse principale di collegamento lungo il quale trovano luogo i diversi nuclei con funzioni specifiche.

*Edifici impropri*: Accanto ai vari schemi finora descritti, nel panorama dell'edilizia scolastica troviamo scuole collocate all'interno di fabbricati che in origine avevano tutt'altra funzione, come ospedali, caserme ed in alcuni casi anche edifici per civile abitazione. La maggior parte di queste strutture sono edifici storici, quasi sempre di grande valore monumentale.

## 2.4 Tipologie di involucro

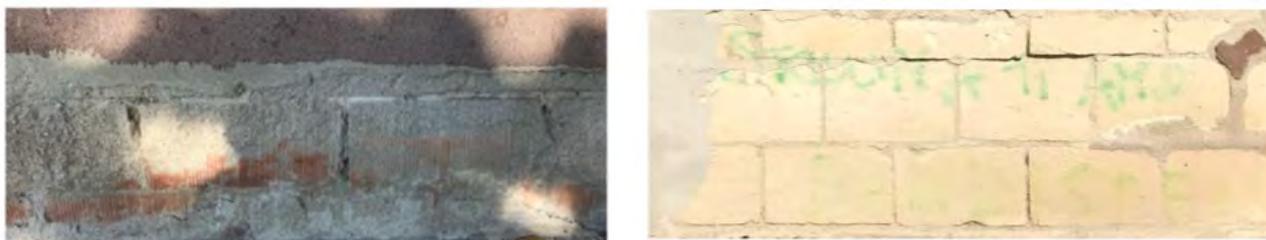
Per quanto riguarda la struttura opaca di involucro, edifici scolastici costruiti in epoca diversa presentano situazioni molto differenti. Ad esempio, la presenza dell'isolante termico nel pacchetto di involucro, o comunque il raggiungimento di valori contenuti di trasmittanza  $U$  [ $W/m^2K$ ], è strettamente connessa all'anno di realizzazione dell'edificio.

Si sottolinea infatti un passaggio determinante nella legislazione italiana nell'ambito delle costruzioni: si tratta dell'approvazione della legge 373/76 [16], primo procedimento legislativo volto alla riduzione dei consumi energetici per il riscaldamento degli edifici. Gli edifici realizzati precedentemente a quella data (pre-'76) tendono infatti ad avere valori di trasmittanza più elevati, mentre gli edifici più recenti possono raggiungere anche valori di trasmittanza prossimi ai limiti di legge attuali - alcuni edifici, realizzati di recente o che di recente hanno subito interventi di riqualificazione energetica, raggiungono valori di  $U$  inferiori a  $0.40 W/m^2K$ .

Con riferimento allo studio condotto all'interno del progetto U.E.F.A. - European Union ELENA Foggia Facility Assistance (Pampanin et al. [17]) e che ha riguardato la raccolta di dati, sopralluoghi ed analisi energetiche di 81 edifici scolastici nella provincia di Foggia, sono state raccolte ed elaborate informazioni sulle tipologie e caratteristiche di involucro.

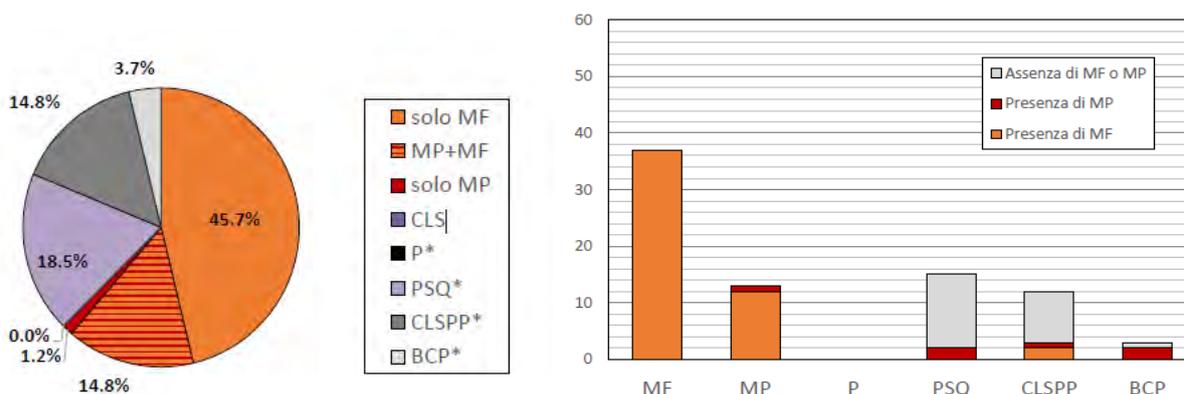
Dallo studio si osserva che le chiusure verticali opache più diffuse sono quelle che presentano un'intercapedine d'aria (I) (Figura 10, sinistra). Di queste, la maggior parte è composta da due strati di mattoni forati (MF); un altro aspetto rilevante nel caso di chiusure monostrato è la presenza di pietra squadrata

semplice (PSQ) non coibentata, tutti casi con tufo che presenta in ogni caso buone caratteristiche termofisiche (Figura 10, destra). Consistente è anche la presenza di chiusure verticali con elementi in calcestruzzo prefabbricato: sia come componenti di chiusure con intercapedine in blocchi (BCP) di tipo *infill* che singole in pannelli prefabbricati fissati alle componenti strutturali (CLSPP).



**Figura 10. Esempio di chiusura verticale opaca con doppio strato di mattoni forati e intercapedine d’aria frapposta (sinistra) e chiusura verticale in blocchi quadrati di tufo (destra)**

Inoltre, i dati evidenziano la presenza di una scarsa percentuale di materiale termoisolante (24.7%), mentre l’isolante, quando presente, figura solo nella tipologia con Intercapedine (I) e Monostrato (M), in solo un caso nella tipologia Pluristrato (P) e nell’unico caso di tipologia a Nucleo (N) (tipico di edilizia pre-novecentesca) non è presente. Dal grafico a torta di Figura 11 si evince come la tipologia di elementi più ricorrente sia quella composta esclusivamente da mattoni forati (solo MF) sia nella condizione di tamponatura monostrato sia con intercapedine, seguita dall’utilizzo combinato di mattoni forati e pieni (MF+MP) con intercapedine o pluristrato. Risulta quindi contenuto il campione composto di soli mattoni pieni (MP). Infine, sono presenti in percentuali minori le altre 4 categorie: pietra sbozzata (P), pietra squadrata (PSQ), pannelli di CLS prefabbricato (CLSPP) e blocchi di CLS prefabbricati (BCP). Tali categorie sono mostrate nel grafico con l’asterisco (\*) per indicare “presente almeno uno strato”. D’altro lato, si può evidenziare nuovamente quanto il mattone forato sia ricorrente e con quali altre tipologie di elementi si vada a combinare nei casi di intercapedine, pluristrato e nucleo; se ne deduce che la pietra squadrata (PSQ) al più viene accoppiata al mattone pieno, mentre elementi prefabbricati in CLS, pannelli (CLSPP) e blocchi (BCP), siano più affini ai mattoni forati.



**Figura 11. Tipologia di elementi ricorrenti nelle chiusure verticali opache (sinistra); accoppiamenti tra elementi di stratigrafia involucro verticale opaco (destra) (Pampanin et al. [17])**

I dati mostrano anche che per le chiusure orizzontali superiori, la maggioranza degli edifici presenta chiusure piane in laterocemento non coibentate. È stato riscontrato un solo caso di copertura piana in calcestruzzo prefabbricato non coibentato. I casi con tetto a falde, si dividono in chiusure in laterocemento non coibentato (Figura 12) e in chiusure in elementi in calcestruzzo prefabbricato non coibentato, mentre si presenta un solo caso di tetto a falde con tavelle in legno. Le chiusure coibentate risultano quelle con tetto piano in laterocemento, un caso di tetto a falde in laterocemento.



Figura 12. Esempio di chiusura orizzontale opaca superiore: tetto piano in laterocemento non coibentato (sinistra); tetto a falde in laterocemento non coibentato (destra) (Pampanin et al. [17])

Infine, per quanto riguarda l'involucro trasparente, si riscontrano per lo più infissi in alluminio senza taglio termico a vetri doppi, così come telai in alluminio con taglio termico, in legno o in PVC. Mentre, per le chiusure verticali trasparenti, nella maggior parte dei casi si riscontrano vetri singoli, con solo 14 casi con vetri doppi.

## 2.5 La vulnerabilità del sistema scuola

L'individuazione del grado di vulnerabilità degli edifici scolastici, sia dal punto di vista sismico che energetico, risulta essere una priorità e per questo motivo, sotto varie forme, viene portata avanti costantemente una campagna di indagine da parte di enti (pubblici e privati) e da associazioni di professionisti. Un esempio è il recente rapporto sulla qualità dell'edilizia scolastica e dei servizi redatto da Legambiente datato marzo 2021 [18], dal quale risulta che su un campione di 6'156 edifici, che insistono nelle città capoluogo di provincia, circa il 58% delle scuole non ha certificazioni base come l'agibilità, più dell'87% è sotto la classe energetica C e del 41.4% che sono in area sismica 1 e 2, solo poco più del 30% è costruita con la tecnica antisismica (i.e., progettazione sismo-resistente; Figura 13). Inoltre, si riscontrano ancora problemi legati alla presenza di amianto non bonificato in ben 145 edifici frequentati ogni giorno da 28'500 studenti (gran parte concentrati al Nord) dei 6'156 oggetto d'indagine.

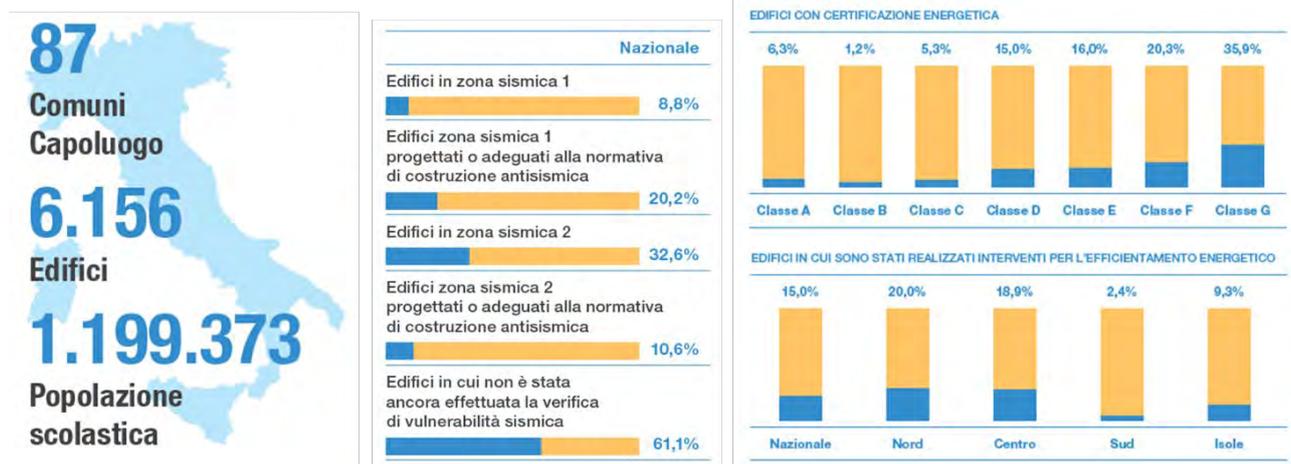


Figura 13. Sintesi dati dal XX Rapporto sulla qualità dell'edilizia scolastica e dei servizi [18]

Attualmente, secondo l'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica (AES), il patrimonio di edilizia scolastica "pubblica" è composto da 40'160 edifici "attivi": strutture edilizie che rappresentano l'elemento fondamentale ed integrante del sistema scolastico, alle quali, per stessa asserzione del Ministero, vanno assicurati uno sviluppo qualitativo e una collocazione sul territorio adeguati alla costante evoluzione delle dinamiche formative, culturali, economiche e sociali (Art. 1, Legge n.23/1996 [19]).

Circa il 60% degli edifici presenta un'ossatura portante costituita da pilastri e travi in cemento armato, mentre la seconda tipologia più frequente, il 40%, è quella della muratura portante: si tratta di strutture murarie

costituite da diversi elementi come pietra e laterizio con malta o altro materiale cementante. Le altre tipologie di strutture portanti interessano minoranze più esigue di edifici: meno del 10%, a esempio, è costituito da strutture prefabbricate.

Dei 40'160 fabbricati censiti soltanto il 38% è stato realizzato dal 1976 in poi, mentre il 30% tra il 1961 ed il 1976; il 32% è antecedente al 1960 (parliamo quindi di immobili con vita utile di più di 60 anni, nella migliore delle ipotesi); inoltre, il 46% degli edifici non risulta "collaudato" staticamente, il 61% non è dotato di "agibilità" ed il 76% non è in possesso del "Certificato di Prevenzione Incendi".

In questo panorama è possibile riscontrare però un dato positivo: in generale su una buona parte di questi edifici è stato predisposto un intervento di riqualificazione energetica. Secondo la rilevazione dell'AES, gli edifici scolastici che hanno adottato uno o più accorgimenti per il contenimento dei consumi di energia sono pari al 59%.

Per quanto riguarda invece gli interventi di miglioramento o adeguamento sismico, anche dal punto di vista legislativo sono stati imposti dei parametri più stringenti in relazione agli edifici scolastici già con le prescrizioni della normativa tecnica del 2018 [1]; in aggiunta a ciò, il D.L. 162/2019 [20] (modificando il D.L. 8/2017 [21]) ha differito, dal 31 dicembre 2018 al 31 dicembre 2021, il termine entro cui ogni immobile adibito ad uso scolastico, situato nelle zone sismiche 1 e 2, deve essere sottoposto a verifica di vulnerabilità sismica, con priorità per quelli situati nei comuni compresi nelle quattro regioni interessate dagli eventi sismici 2016 – 2017, Abruzzo, Lazio, Marche ed Umbria.

### 2.5.1 Rischio sismico

Entrando più nel dettaglio nella parte di valutazione del rischio sismico dell'edilizia scolastica, diversi dati sono stati raccolti con l'obiettivo di mostrare la necessità di interventi di riqualificazione strutturale. Come evidenziato dal dossier di Cittadinanzattiva, elevato è il numero dei crolli avvenuti nelle scuole italiane a seguito di eventi sismici, dovuti principalmente a crolli dei solai e dei controsoffitti, fatto che sottolinea lo stato di salute precario degli edifici scolastici. Con riferimento agli studi svolti dal MIUR ("Rapporto Nazionale sullo stato dell'edilizia scolastica" [22]) e dall'ANCE ("Audizione dell'Ance sulla situazione dell'edilizia scolastica in Italia" [23]), indagini statistiche sono state elaborate riguardo: zonazione sismica, progettazione rispettando la normativa antisismica, possessi di relazione geotecnica, di relazione geologica e di verifica sismica ai sensi dell'art. 2 dell'OPCM n° 3274 del 20/3/2003 [24].

Per quanto concerne la zonazione sismica, su un totale di 47'313 edifici (elaborati alla data dello studio effettuato), per 21'781 (46%) la classificazione non è disponibile. Per i restanti si hanno: 2'328 edifici in zona 1 (9%); 11'414 edifici in zona 2 (45%); 4'844 edifici in zona 3 (19%); 6'946 edifici in zona 4 (27%). Secondo lo stesso studio, sono solamente 3'745 gli edifici progettati seguendo criteri stabiliti da normative sismiche comunque in continua fase di evoluzione - e dunque per definizione obsolete rispetto alle più recenti normative tecniche. C'è inoltre da sottolineare però che tali dati si riferiscono all'anno 2010 e che i valori sono in aumento negli ultimi anni. Anche su questo tema i dati relativi a molte scuole non sono disponibili. I dati sopra citati sono raccolti in Figura 14.

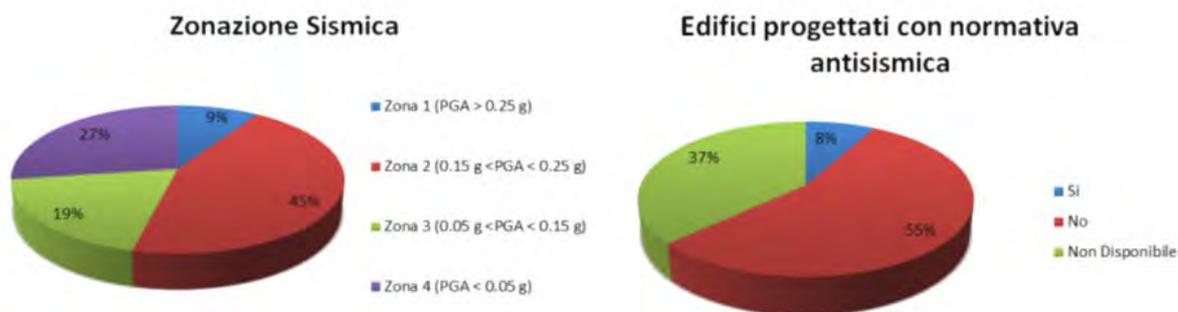


Figura 14. Classificazione sismica degli edifici scolastici italiani (sinistra) ed edifici progettati seguendo le indicazioni della normativa cogente (destra) (dati elaborati da [22])

Se si combinano i dati sopra esposti con l'elevata esposizione nei confronti di eventi sismici del nostro territorio e con l'alta vulnerabilità degli edifici scolastici (più della metà sono stati costruiti prima della legge 64/74 [25]), si raffigura una situazione tutt'altro che rosea relativamente alla vulnerabilità sismica dell'edilizia scolastica.

Passando allo studio dell'ANCE, esso, oltre a temi già visti nel rapporto di Legambiente [18] (età edifici, certificazioni etc.), si focalizza anche sul rischio idrogeologico, oltre che su quello sismico dell'edilizia scolastica nazionale (Figura 15).

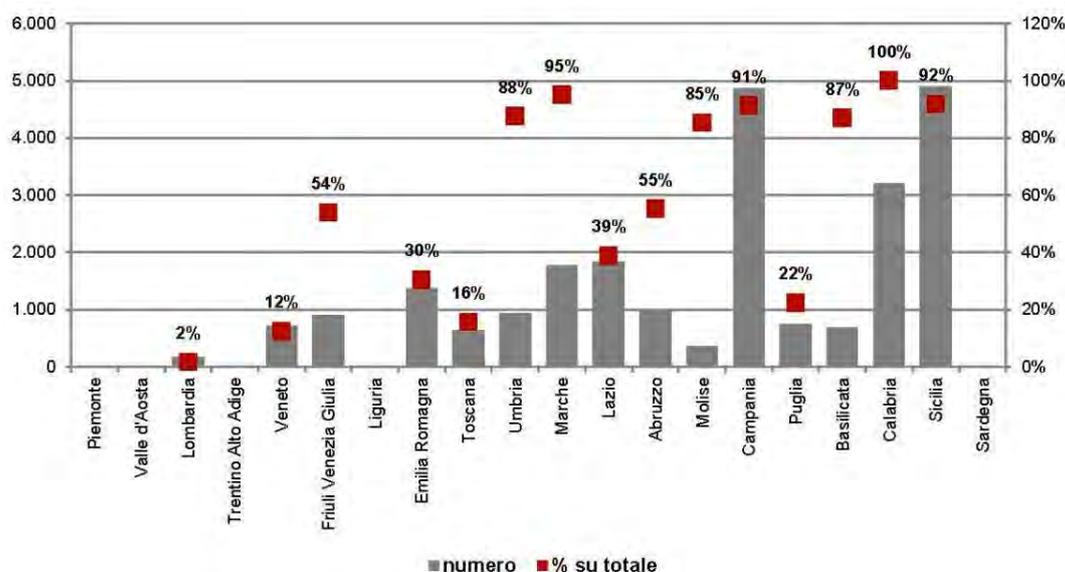


Figura 15. Scuole ad elevato rischio sismico [23]

Dai dati contenuti nel rapporto, emerge che gli edifici situati nelle aree di rischio sismico sono circa 24'073, di cui il 45% si trova nelle regioni del Sud; mentre 6'251 si trovano in aree ad elevata criticità idrogeologica, con il 52% di essi situati nelle regioni del Nord. Tali dati sono sintetizzati nella seguente tabella (Tabella 2).

Tabella 2. Edifici scolastici potenzialmente esposti ad un elevato rischio sismico e idrogeologico [23]

Regione	Rischio Sismico		Rischio idrogeologico	
	Numero	% su totale	Scuole	% su totale
Piemonte	0	0%	608	10%
Valle d'Aosta	0	0%	34	1%
Lombardia	176	1%	647	10%
Trentino A.A.	0	0%	229	4%
Veneto	718	3%	600	10%
Friuli V.G.	900	4%	223	4%
Liguria	0	0%	112	2%
Emilia Romagna	1.367	6%	827	13%
Toscana	645	3%	534	9%
Umbria	937	4%	114	2%
Marche	1.767	7%	187	3%
Lazio	1.835	8%	321	5%
Abruzzo	969	4%	136	2%
Molise	364	2%	80	1%
Campania	4.872	20%	1.017	16%
Puglia	750	3%	164	3%
Basilicata	679	3%	42	1%
Calabria	3.199	13%	250	4%
Sicilia	4.894	20%	60	1%
Sardegna	0	0%	67	1%
<b>ITALIA</b>	<b>24.073</b>	<b>100%</b>	<b>6.251</b>	<b>100%</b>

### 2.5.2 Efficienza energetica

Sotto il profilo del comportamento energetico delle strutture scolastiche, si possono prendere in considerazione i dati raccolti dal rapporto di Legambiente [18]. Come già evidenziato in Figura 16, la strada da percorrere sul fronte dell'efficientamento energetico appare ancora molto lunga: gli edifici con certificazione energetica sono solo il 28%; tra questi, il 6.3% si trova nella classe energetica A, e complessivamente il 72.2% nelle ultime tre classi energetiche (E, F, G).

Come indicato nel documento, negli ultimi 5 anni gli edifici in cui sono stati realizzati interventi di efficientamento energetico sono il 15%, con una punta del 20% al Nord e un esiguo 2.4% al Sud. Gli interventi complessivamente hanno riguardato per lo più l'installazione di caldaie a condensazione, e/o la sostituzione di vetri e serramenti, e/o l'isolamento delle coperture e/o delle pareti esterne, quindi l'installazione di impianti di energia rinnovabile.

Interventi questi ultimi che non costituiscono una vera e propria spinta alla crescita del numero di scuole in cui si utilizzano fonti di energia rinnovabile, che sono solo il 18.1%. Di questi: l'80.1% utilizza il solare fotovoltaico e il 31.9% il solare termico, mentre solo l'1.2% impianti a geotermia e lo 0.4% a biomassa. In questi edifici la copertura dei consumi da fonti rinnovabili è del 37.6%.

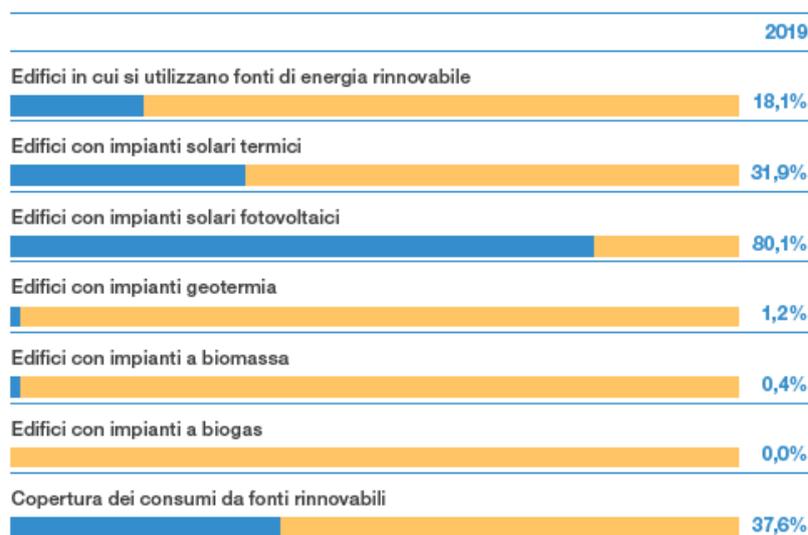


Figura 16. Dati sulle energie rinnovabili nelle scuole [18]

### 3 Sviluppo e validazione di schede di vulnerabilità sismica

Al fine di implementare una procedura analitico-meccanica semplificata per la valutazione di vulnerabilità sismica e la classificazione del rischio sismico di edifici scolastici esistenti, è stata rivolta particolare attenzione alla predisposizione e validazione di schede di rilievo per l'acquisizione dei dati geometrici, strutturali e dei parametri fondamentali per eseguire analisi ingegneristiche. La scheda di rilievo realizzata in questo studio per il modulo di "Risposta Sismica" (PELL-School-RS) ha quindi l'obiettivo di fornire un database, interoperabile con altri moduli e schede istituzionali esistenti, in cui vengono raccolte le informazioni principali riguardanti le caratteristiche degli edifici scolastici, nonché le loro criticità strutturali. I dati raccolti rappresenteranno quindi il punto di partenza per l'implementazione della procedura SLaMA-School (descritta in maggior dettaglio nel capitolo 4), al fine di definire una prima scala di vulnerabilità e rischio sismico, a supporto dello sviluppo di piani di intervento a scala nazionale, inclusivi di analisi tempi-costi.

In questo capitolo viene quindi riportata l'attività svolta al fine di sviluppare e validare la scheda di raccolta dati del modulo PELL-School-RS. In una prima fase, viene illustrata la struttura del modulo e, data la natura interoperabile della piattaforma con altri database e schede istituzionali esistenti, si riporta una breve descrizione dei principali moduli esistenti, considerati come riferimento per la struttura dei dati del modulo PELL School-RS. In seguito, viene descritta più dettagliatamente la scheda di raccolta dati sviluppata, con particolare riferimento all'elenco dei parametri di input aggiuntivi che sono stati inseriti nel modulo. Viene inoltre illustrato il manuale di compilazione della scheda, predisposto con il fine di supportare i tecnici compilatori. In conclusione, come preliminare studio di fattibilità ed a conferma della effettiva semplicità di utilizzo della scheda, si riportano le prime impressioni e valutazioni ottenute dai compilatori, raccolte tramite un apposito modulo Google.

#### 3.1 Struttura del modulo PELL-School-RS e raccolta dati da schede istituzionali esistenti

Il modulo PELL-School-RS è composto da 23 classi. In linea con la struttura dati del database ARES (Anagrafe Regionale Edilizia Scolastica), 5 delle 23 classi del modulo sono riferite all'Edificio Scolastico (ES) e 18 all'Unità Strutturale (US). Le 23 classi sono elencate di seguito:

1. *Pericolosità sismica e idrogeologica (ES)*
2. *Anno di costruzione e destinazione d'uso originaria e attuale (ES)*
3. *Interventi e loro conformità alle norme (ES)*
4. *Caratteristiche dimensionali (ES)*
5. *Stato di conservazione (ES)*
6. *Identificazione Unità Strutturale (US)*
7. *Dati dimensionali, età costruzione/ristrutturazione, descrizione degli eventuali interventi strutturali eseguiti, Normative Tecniche di progettazione, costruzione e successivi interventi (US)*
8. *Destinazione d'uso ed esposizione (US)*
9. *Pericolosità, eventi subiti e dati geomorfologici (US)*
10. *Materiale strutturale principale della struttura verticale (US)*
11. *Tipologia e organizzazione del sistema resistente (US) (per CA, Muratura e Acciaio)*
12. *Diaframmi orizzontali (US)*
13. *Coperture (US)*
14. *Distribuzione tamponature per CA (US)*
15. *Fondazioni (US)*
16. *Ulteriori Dati per verifica 1 e 2 livello PdCM (US)*
17. *Classificazione sismica (US)*
18. *Categoria di sottosuolo e condizioni morfologiche del sito (microzonazione) (US)*
19. *Previsione di massima di possibili interventi di miglioramento sismico (US)*

20. *Fonte del Dato e Acquisizione elaborati grafici disponibili (US)*
21. *Criticità geometriche: Regolarità/Irregolarità geometrica e distribuzione masse/rigidezze in pianta e in elevazione (US)*
22. *Criticità costruttive e legate ai materiali (US)*
23. *Peculiarità costruttive o presenza di tecnologie migliorative (anche storiche e tradizionali) critiche ai fini della risposta sismica (US)*

I principali database e schede istituzionali esistenti che sono stati considerati come riferimento per la struttura dei dati del modulo di PELL-School-RS, sono:

- il database ARES (Anagrafe Regionale Edilizia Scolastica);
- le schede PdCM Livello 0 e Livello 1-2 (Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento di Protezione Civile, OPCM n. 3274 2003 [24], D.M.14/1/2008 [26], circolare DPC/SISM n. 31471 del 21.4.2010 [27]);
- le “Linee Guida per la Classificazione del Rischio Sismico delle Costruzioni” (DM 65 2017 [10])

Il database ARES è gestito dalle Regioni ed è dotato di un’interfaccia grafica di facile utilizzo. Viene continuamente aggiornato dai Municipi, dalle Province e dalle Città Metropolitane. La piattaforma include due differenti tipologie di struttura di dati: Edificio ed Unità Strutturale (US). È inoltre inclusa una scheda denominata PES (Punto di Erogazione del Servizio Scolastico), che comprende i dati relativi alla consistenza ed alla funzionalità della scuola (in generale, una scuola può avere più PES). Le schede per Edificio e per US devono essere compilate dalle autorità locali e dai responsabili della scuola, mentre la scheda PES deve essere compilata dal preside della scuola.

In totale, le schede ARES Edifici e US comprendono 8 sezioni e la piattaforma PELL-School-RS ricerca i dati dalle prime 3 di queste, ovvero:

- *Sezione A:* identificazione dell’edificio scolastico con ID univoco;
- *Sezione B:* identificazione di ogni unità strutturale e delle loro caratteristiche strutturali. Queste comprendono dati relativi a materiali da costruzione, tipologia dei sistemi strutturali verticali ed orizzontali, periodo di costruzione e normativa di riferimento, eventuali interventi di riabilitazione strutturale e indicatori di rischio valutati in accordo con le normative in vigore all’epoca di costruzione;
- *Sezione C:* dati relativi alle unità strutturali, quali caratteristiche geometriche (e.g., numero di piani, superficie di piano), tecniche costruttive per gli elementi non-strutturali (tamponature, facciate, ecc.), ed informazioni relative ad eventuali interventi di rinforzo sismico per elementi strutturali e non-strutturali.

In Tabella 3 è riportato il parallelo tra le classi del modulo PELL-School-RS e le sezioni ARES e i particolari quesiti delle stesse dai quali i dati ARES vengono attinti.

**Tabella 3. Parallelo tra Campi della scheda PELL-School-RS riferita a Edificio Scolastico e Sezioni ARES**

<b>Classi PELL-School-RS (ES)</b>	<b>Sezioni Scheda ARES</b>
Pericolosità sismica e idrogeologica (ES)	Sezione B1 – Ubicazione – 1.1
Anno di costruzione e destinazione d’uso originaria e attuale (ES)	Sezione C3 - Origine ed Età – 3.1, 3.2, 3.3
Interventi e loro conformità alle norme (ES)	Sezione C3 - Origine ed Età – 3.4
Caratteristiche dimensionali (ES)	Sezione C5 - Dimensioni complessive
Stato di conservazione (ES)	Sezione C7 - Stato di Conservazione

È importante evidenziare che la piattaforma PELL-School intende acquisire dal database ARES solamente i dati rilevanti per effettuare una valutazione di vulnerabilità sismica e di efficienza energetica degli edifici scolastici, al fine di evitare duplicazioni di richieste di dati alle/dalle Pubbliche Amministrazioni.

Le schede PdCM di Livello 0 e di Livello 1-2 sono entrate in vigore con l'OPCM n. 3274 2003 [24] e sono state predisposte dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC). Il DPC nato il 29 aprile 1982, è una struttura della Presidenza del Consiglio dei Ministri (PdCM) ed ha il compito di mobilitare e coordinare tutte le risorse nazionali utili al fine di assicurare assistenza alla popolazione in caso di grave emergenza. Il DPC lavora a stretto raccordo con le Regioni e le Province Autonome, e si occupa di elaborare e coordinare i Piani nazionali per scenari di rischio, coordinare l'intervento del Servizio al verificarsi di emergenze di rilievo nazionale, promuovere le attività volte alla previsione e prevenzione dei rischi, definire i criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche ed elaborare gli indirizzi generali per le attività di formazione in materia di protezione civile. Il Dipartimento coordina inoltre la partecipazione del Servizio Nazionale alle politiche di protezione civile dell'Unione Europea e l'intervento in occasione di emergenze all'estero.

In particolare, la scheda PdCM Livello 0 ha come obiettivo quello di fornire una prima valutazione delle caratteristiche e delle criticità strutturali degli edifici, al fine di creare una lista di priorità per le strutture di cui è necessario effettuare una valutazione di vulnerabilità sismica più accurata e che necessitano di interventi di riabilitazione strutturale. La scheda PdCM Livello 0 include 11 Sezioni; molti dati richiesti da questa scheda sono già inclusi nel database ARES, quali periodo di costruzione, caratteristiche geometriche, materiali da costruzione e presenza di interventi di miglioramento o adeguamento sismico. Al contrario, la scheda PdCM di Livello 1-2 è stata predisposta dal DPC al fine di acquisire i risultati delle verifiche sismiche per gli edifici e le opere strategiche ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico. Questa scheda include 30 differenti sezioni, con dati richiesti sotto forma di risposta multipla o appositi spazi in cui inserire il valore numerico richiesto. A titolo di esempio, in Figura 17 è riportato un estratto della scheda PdCM Livello 1-2.

2) Dati dimensionali ed età costruzione/ristrutturazione															
N° Piani totali con interrati		Altezza media di piano [m]		Superficie media di piano [m <sup>2</sup> ]		Volume oggetto di verifica [m <sup>3</sup> ]		D	Anno di progettazione						
A		B		C		H		E	Anno di ultimazione della costruzione						
F <input type="checkbox"/> Nessun intervento eseguito sulla struttura dopo la costruzione															
G Anno di progettazione ultimo intervento eseguito sulla struttura								G1	<input type="radio"/> Adeg.	G2	<input type="radio"/> Miglior.				
								G3	<input type="radio"/> Altro						
3) Materiale strutturale principale della struttura verticale															
Cemento armato	Acciaio	Acciaio-calcestruzzo	Muratura	Legno	Misto (Muratura e c.a.)	Prefabbricati in c.a. o c.a.p.	Altro (specificare)								
A	<input type="radio"/>	B	<input type="radio"/>	C	<input type="radio"/>	D	<input type="radio"/>	E	<input type="radio"/>	F	<input type="radio"/>	G	<input type="radio"/>	H	

Figura 17. Estratto della scheda PdCM di Livello 1-2: dati dimensionali ed età di costruzione/ristrutturazione; materiale strutturale principale della struttura verticale

Per poter essere compilata, la scheda richiede che venga effettuata una modellazione della struttura con analisi numeriche dettagliate. Di fatto, nel campo 27-29 vengono richiesti in maniera esplicita i risultati delle analisi in termini di livelli di accelerazione di picco al suolo (PGA, Peak Ground Acceleration) di capacità per differenti Stati Limite (SL) e gli indicatori di rischio, definiti come rapporto tra capacità e domanda sismica (i.e., rapporto tra PGA di capacità e PGA di domanda). La scheda PdCM di Livello 1-2 rappresenta dunque una scheda di sintesi dei risultati delle analisi numeriche, in cui vengono raccolte anche alcune informazioni principali riguardanti la tipologia costruttiva, i materiali da costruzione e la geometria dell'edificio in esame.

Nel modulo PELL-School-RS i dati inclusi nella scheda PdCM di Livello 1-2 sono stati replicati ed integrati/estesi. In particolare, le sezioni dalla 1 alla 20 della scheda PdCM Livello 1-2 e le sezioni da 29 a 30 sono state replicate ed ampliate; le sezioni dalla 21 alla 28 incluse sono state raggruppate nel campo 16 del

modulo PELL-School-RS (i.e., Ulteriori Dati per verifica 1 e 2 livello PdCM) e replicate fedelmente senza proposte di aggiunta.

È bene evidenziare tuttavia che i dati “di input” ricavabili da questa scheda non permettono di eseguire un’analisi di vulnerabilità di dettaglio secondo NTC 2018 [1], in quanto non vengono riportati i dati relativi alla geometria dei sistemi sismo-resistenti, sezione degli elementi strutturali, quantitativi di armatura e dettagli costruttivi. I dati raccolti tramite la scheda PdCM Livello 1-2 permettono infatti di eseguire una sola valutazione di vulnerabilità sismica tramite approccio semplificato, in accordo con il DM 65 2017 [10], per i soli edifici con struttura portante in muratura (come verrà discusso nel successivo capitolo al paragrafo 4.2). Per questo motivo, nell’ambito della scheda PELL-School-RS vengono richiesti limitati dati di input aggiuntivi (discussi in dettaglio al successivo paragrafo 3.2) al fine di poter eseguire un’analisi di vulnerabilità sismica applicando la procedura analitico meccanica semplificata SLAMA (esposta nel capitolo 4).

Si evidenzia inoltre che, sia per i Moduli PdCM Livello 0 che Livello 1-2, originariamente concepiti in formato cartaceo, il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) ha predisposto e messo a disposizione delle Regioni italiane un software ad-hoc per la digitalizzazione dei dati [28]. Previa approvazione DPC, i dati già digitalizzati, saranno acquisiti dal modulo PELL-School-RS e sarà stabilita l’interoperabilità tra il repository DPC e PELL-School.

Il DM 65 2017 “Linee Guida per la Classificazione del Rischio Sismico delle Costruzioni” [10] fornisce gli strumenti operativi per la classificazione del Rischio Sismico delle costruzioni, nonché le modalità per accedere agli incentivi fiscali per interventi di riqualificazione denominati come “Sisma-Bonus”. Nel documento vengono descritti i due metodi alternativi per la determinazione della Classe di Rischio della struttura, denominati come *metodo convenzionale* e *metodo semplificato*. Maggiori dettagli riguardo questi due metodi sono riportati nel paragrafo 4.2. A titolo di esempio, nel caso di edifici in muratura, nel modulo PELL-School-RS sono state incluse le 7 tipologie di edifici riportate nel DM 65 2017, assieme alle classi riportate nel database ARES e quelle della scheda PdCM Livello 1-2 (Figura 18). Inoltre, sono stati inclusi specifici campi-dati per descrivere la maggior parte delle peculiarità strutturali e delle criticità strutturali attese in edifici esistenti, presenti del DM 65 2017.

Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura in mattoni di terra cruda (adobe)
Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura in pietre a spacco con buona tessitura
Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura a blocchi lapidei squadrate
Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura in mattoni pieni e malta di calce
Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI)
Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura in pietra massiccia per costruzioni monumentali
Tipologia muratura portante	Boolean	Sì	muratura armata e/o confinata
Tipologia muratura portante	String (50)		Altra tipologia di muratura portante

**Figura 18. Estratto della scheda PELL-School-RS per l’identificazione della tipologia di muratura portante**

In aggiunta, il modulo PELL-School-RS ha incorporato anche i campi-dati relativi all’interazione negativa tra unità strutturali adiacenti, facendo riferimento alle schede dell’approccio CLE (Condizione Limite per l’Emergenza). Questi campi-dati comprendono informazioni relative a: disallineamento tra solai d’interpiano e/o di copertura; disallineamento negli spazi interni; giunti strutturali; elementi strutturalmente mal collegati (quali vani scala, pensiline, balconi); pilastri isolati; piani pilotis; presenza di terrazze, torri, comignoli.

Infine, tra le principali schede disponibili è importante menzionare la scheda AeDES (Agibilità e Danno nell’Emergenza Sismica), tipicamente utilizzata per la valutazione di sicurezza sismica ed identificazione del danneggiamento strutturale in condizioni di post-terremoto. Questa scheda contiene 8 sezioni, di cui 4 sono già incluse nel modulo PELL-School-RS, relative a identificazione dell’edificio, descrizione, tipologia, suolo e fondazioni; sono ancora da includere invece i campi-dati relativi alla valutazione ed identificazione del danno strutturale – nel caso di un potenziale utilizzo della scheda PELL-School in condizioni sia pre- sia post-evento e dunque valutazione della capacità residua, ivi inclusi ridotti margini di sicurezza e aumentato rischio.

### 3.2 Dati aggiuntivi per analisi di vulnerabilità sismica

Nel modulo PELL-School-RS sono stati inclusi campi-dati di input aggiuntivi, con l’obiettivo di identificare le principali criticità strutturali degli edifici scolastici, evitando tuttavia di svolgere analisi di dettaglio e dall’elevato onere computazionale. L’obiettivo del modulo è infatti quello di fornire un primo quadro di vulnerabilità e conseguente rischio sismico degli edifici scolastici a supporto di un piano di prioritizzazione di interventi di riqualificazione strutturale a scala nazionale. I dati richiesti possono essere facilmente raccolti da disegni di progetto architettonici e tavole strutturali (da documenti digitali e/o documenti storici di progetto), report fotografici e/o rapporti tecnici di vulnerabilità sismica dell’edificio.

In virtù di quanto detto in precedenza, nei campi da compilare del modulo è stata inserita l’indicazione relativa alla fonte dei dati e al materiale disponibile. In questo modo si intende considerare in modo esplicito la qualità dei dati riportati nella scheda e, conseguentemente, le incertezze ad essi associate. In particolare, per quanto riguarda la voce “fonte dei dati”, viene esplicitamente richiesto di indicare se questi sono stati raccolti tramite giudizio di esperti, dalle interviste e/o da ispezioni dirette. Inoltre, viene richiesto al compilatore di indicare se sono disponibili disegni digitali architettonici, disegni digitali strutturali, disegni cartacei originali, documentazione storica di progetto, relazioni di vulnerabilità sismica e documentazione fotografica. Il dato può essere inserito semplicemente selezionando l’opzione “Sì” o “No” dal menù a tendina della voce corrispondente. In Figura 19 si riporta una schermata della scheda, formato Excel, a titolo esplicativo.

Sì	Fonte dei Dati - Giudizio esperto
Sì	Fonte dei Dati - Interviste
Sì	Fonte dei Dati - Ispezione diretta
Sì	Disegni Digitali Architettonici (pianche architettoniche, prospetti, sezioni, planimetria generale) ( formato .dwg - CAD)
Sì	Disegni Digitali Strutturali (pianche strutturali, sezioni, carpenterie) ( formato .dwg - CAD)
Sì	Disegni cartacei originali: architettonici e/o strutturali
Sì	Documentazione storica di progetto
Sì	Relazioni di vulnerabilità sismica: Relazione generale, Relazione di calcolo, Relazione geologica, Relazione prove su materiali
Sì	Documentazione fotografica

Figura 19. Estratto della scheda PELL-School-RS: fonte dei dati e materiale cartaceo/digitale disponibile

Per identificare i campi-dati aggiuntivi da inserire nel modulo, si è fatto particolare riferimento alle linee guida neozelandesi NZSEE2017 [9], dove è riportata una procedura di valutazione speditiva, denominata IEP (Initial Evaluation Procedure). Tale procedura si basa sull’utilizzo di fogli di calcolo preimpostati e consente al professionista, attraverso un semplice sopralluogo (con e senza disegni o informazioni dettagliate su geometria e armature), di derivare una prima stima della vulnerabilità e rischio sismico, nella forma di un Indice di Sicurezza globale o %NBS (% New Building Standard), valutato attraverso l’identificazione e la valutazione qualitativa delle criticità strutturali dell’edificio e del loro impatto sulla capacità globale della struttura rispetto alla domanda attesa per un edificio di nuova progettazione. La procedura IEP si distingue dalle altre procedure speditive (pre-danno) basate su schede o fogli di calcolo (desktop study) per la sua capacità di fornire – per quanto in modo semplificato - un confronto capacità/domanda o Indice di Sicurezza %NBS<sub>IEP</sub>, calcolato in automatico dalla scheda a fronte dell’inserimento di parametri di base (sito/zona sismica, tipo di suolo, altezza edificio, materiale, tipologia sistema strutturale principale, età di progettazione dell’edificio, coefficiente di struttura o duttilità). La capacità viene infatti valutata calcolando in automatico il taglio alla base “di progetto” (secondo le normative allora vigenti) della struttura seguendo le ipotesi (formule di periodo iniziale, spettro di progetto, coefficiente di struttura) adottate verosimilmente dal progettista seguendo le norme di riferimento del tempo. Attraverso un confronto tra Capacità e Domanda in termini di ordinata spettrale si ricava dunque la %NBS di riferimento per l’intera struttura. Questo valore iniziale di riferimento viene quindi ridotto in presenza di criticità strutturali tramite una serie di coefficienti riduttivi in funzione del grado di severità (Figura 20).

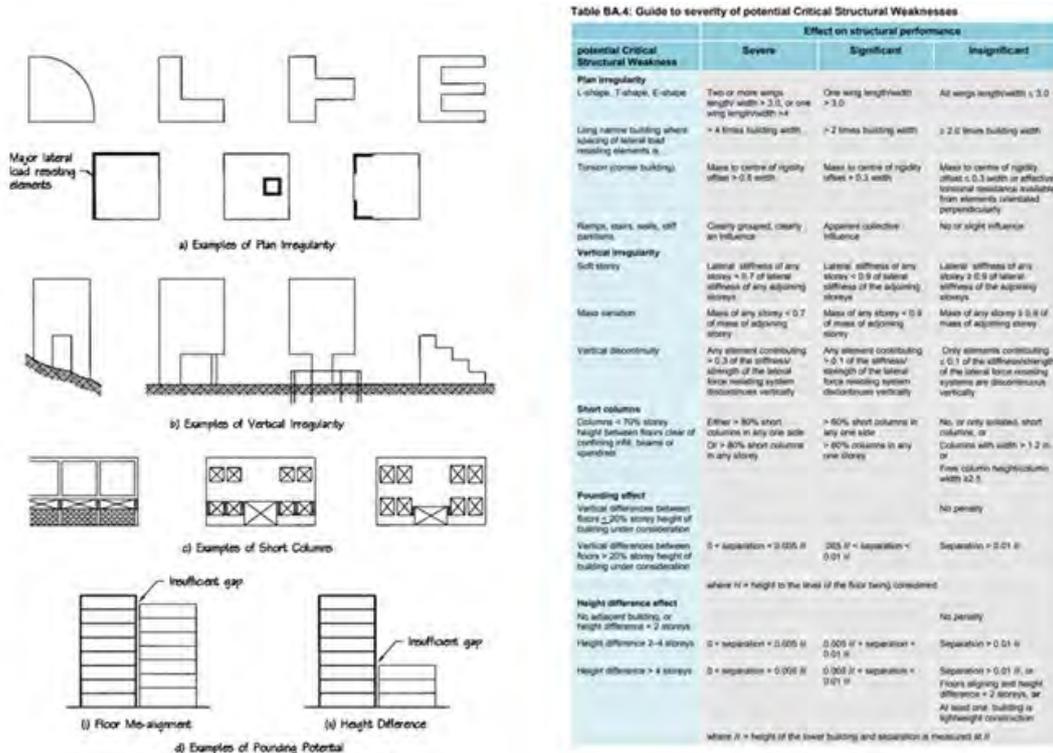


Figura 20. Schematizzazione delle potenziali criticità strutturali (sinistra) e guida/tabelle di descrizione del livello di severità (destra) (Initial Evaluation Procedure, IEP [9]).

Passando alla scheda realizzata per il modulo PELL-School-RS, per la descrizione dell'edificio, in aggiunta all'informazione relativa alla posizione (i.e., isolato, interno, d'estremità, d'angolo) e alla tipologia ed organizzazione del sistema sismo-resistente (e.g., struttura a telai in una/due direzioni, struttura a pareti ecc.), rispettivamente disponibili dal database ARES e da scheda PdCM di Livello 1-2, sono state inserite nuove voci relative alle criticità strutturali riscontrate e/o attese. In particolare, queste sono state divise in 3 macrogruppi:

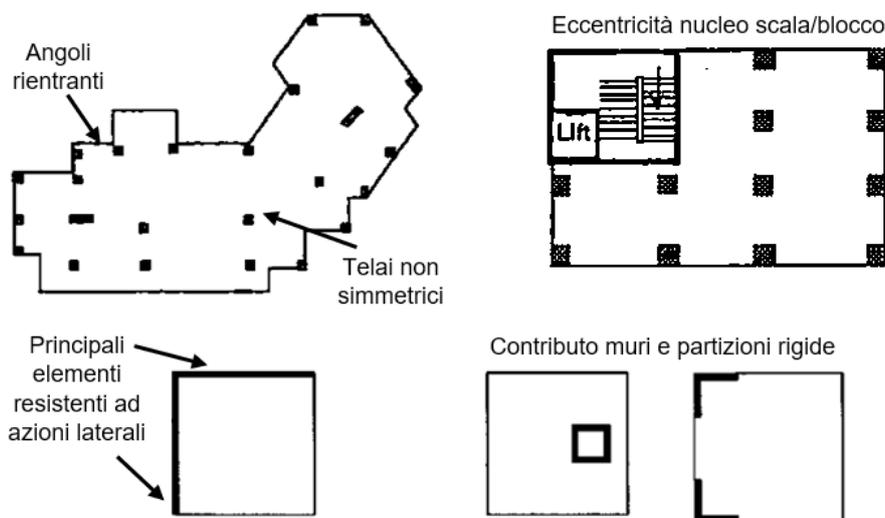
- criticità di geometria;
- criticità costruttive e dei materiali;
- criticità dei dettagli costruttivi.

I dati richiesti nei tre macrogruppi sopraelencati vengono mostrati e discussi nel dettaglio di seguito.

### 3.2.1 Criticità di geometria

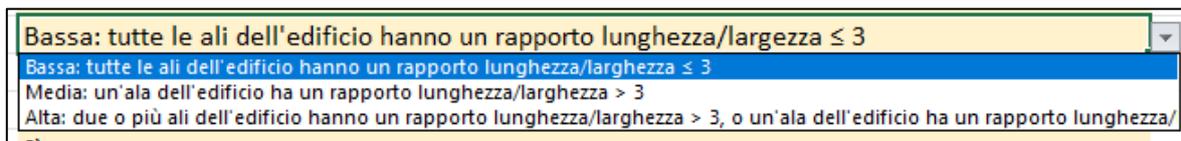
Per quanto riguarda le criticità di geometria, sono stati inclusi nel modulo i dati relativi alla possibile presenza di irregolarità in pianta ed in elevazione.

Le irregolarità in pianta possono essere individuate in caso di pianta strutturale con forma non simmetrica (e.g., forme ad L, T, E, U ecc.) e/o sistemi sismo-resistenti disposti in modo non simmetrico, presenza di angoli rientranti, distanza elevata tra gli elementi sismo-resistenti nel caso di edifici con pianta lunga e stretta, distribuzione disuniforme ed eccentrica dei pesi, disposizione eccentrica di scale/nuclei ascensore. In Figura 21 si riportano alcuni esempi schematici di irregolarità in pianta.



**Figura 21. Esempi schematici di irregolarità in pianta (modificato da Manuale scheda AeDES [29] e NZSEE2017 [9])**

Si evidenzia che, in alcuni casi, viene richiesto al compilatore non solo di indicare la possibile presenza della criticità strutturale, ma anche di indicarne il grado di severità riscontrato. A titolo di esempio, la Figura 22 mostra la possibile scelta tramite menù a tendina per indicare il grado di severità (bassa, media, alta) legata all'irregolarità di forma in pianta.

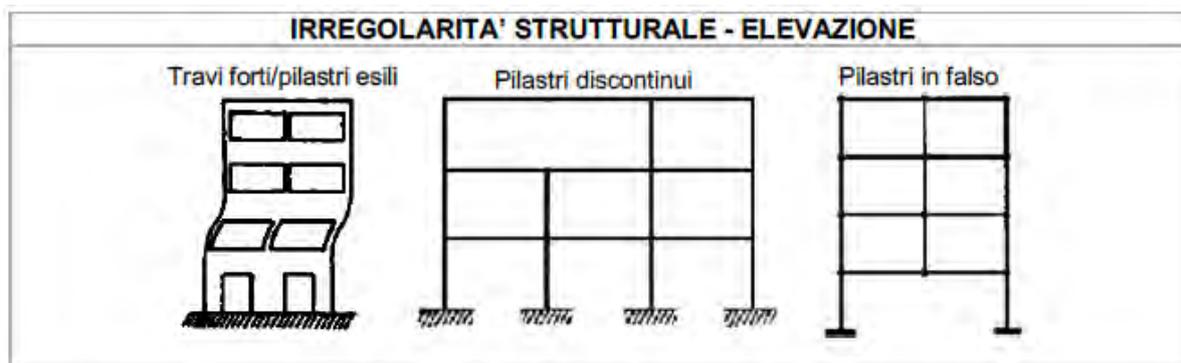


**Figura 22. Scheda PELL-School-RS: esempio di indicazione del grado di severità per criticità strutturale tramite menù a tendina**

Nel modulo sono state inserite 9 voci per l'irregolarità in pianta, di seguito elencate (nel caso si richieda anche l'indicazione del grado di severità, viene riportata la descrizione fornita con menu a tendina):

1. Irregolarità di forma in pianta: piante non dotate di due assi di simmetria ortogonale, ad esempio realizzate a L, T, U, E, P, etc.:
  - *Bassa: tutte le ali dell'edificio hanno un rapporto lunghezza/larghezza  $\leq 3$*
  - *Media: un'ala dell'edificio ha un rapporto lunghezza/larghezza  $> 3$*
  - *Alta: due o più ali dell'edificio hanno un rapporto lunghezza/larghezza  $> 3$ , o un'ala dell'edificio ha un rapporto lunghezza/larghezza  $> 4$ ;*
2. Irregolarità strutturali in pianta: telai non simmetrici o mal distribuiti;
3. Irregolarità strutturali in pianta: presenza di angoli rientranti (con proiezione superiore al 20% della dimensione planimetrica della struttura in quella direzione);
4. Irregolarità strutturali in pianta: pilastri di dimensioni molto diverse;
5. Irregolarità strutturali in pianta: distanza tra gli elementi resistenti al carico laterale nel caso di edifici con pianta lunga e stretta:
  - *Bassa: edifici lunghi e stretti dove la distanza tra i sistemi resistenti a carico orizzontale è  $\leq 2$  della larghezza dell'edificio*
  - *Media: edifici con pianta lunga e stretta dove la distanza tra gli elementi resistenti ad azioni laterali è  $> 2$  volte la larghezza dell'edificio*

- *Alta: edifici con pianta lunga e stretta dove la distanza tra gli elementi resistenti ad azioni laterali è > 4 volte la larghezza dell'edificio*
6. *Irregolarità strutturali in pianta: distribuzione disuniforme ed eccentrica dei pesi;*
  7. *Irregolarità strutturali in pianta: disposizione eccentrica rispetto agli assi di simmetria della pianta di nucleo scala e/o blocco ascensore;*
  8. *Irregolarità strutturali in pianta: effetti torcenti, nel caso di edifici ad angolo:*
    - *Bassa: distanza tra centro di massa e centro di rigidezza  $\leq 0.3$  della larghezza o resistenza effettiva a torsione disponibile da elementi disposti perpendicolarmente*
    - *Media: distanza tra centro di massa e centro di rigidezza  $> 0.3$  della larghezza dell'edificio*
    - *Alta: distanza tra centro di massa e centro di rigidezza  $> 0.5$  della larghezza dell'edificio*
  9. *Irregolarità strutturali in pianta: influenza legata alla presenza di scale, rampe, muri, partizioni rigide*
- L'irregolarità in elevazione riguarda la possibile presenza di meccanismi di piano soffice, brusche variazioni di massa in elevazione, discontinuità dei sistemi strutturali in direzione verticale ed elementi in falso (Figura 23).



**Figura 23. Esempi di irregolarità strutturale in elevazione**

Nel modulo sono state incluse 7 voci per l'irregolarità in elevazione, di seguito elencate:

1. *Irregolarità di forma in elevazione: macroscopiche variazioni di superficie ( $\pm 30\%$ ) con l'altezza;*
2. *Irregolarità strutturale in elevazione: presenza di travi forti/solette pesanti a fronte di pilastri esili;*
3. *Irregolarità strutturale in elevazione: pilastri che non proseguono per tutta l'altezza della struttura;*
4. *Irregolarità strutturale in elevazione: elementi in falso;*
5. *Irregolarità strutturale in elevazione: variazioni di rigidezza:*
  - *Bassa: rigidezza laterale di ciascun piano  $\geq 0.9$  della rigidezza laterale dei piani adiacenti*
  - *Media: rigidezza laterale di ogni piano  $< 0.9$  della rigidezza laterale del piano sovrastante/sottostante*
  - *Alta: rigidezza laterale di ogni piano  $< 0.7$  della rigidezza laterale del piano sovrastante/sottostante;*
6. *Irregolarità strutturale in elevazione: variazioni di massa:*
  - *Bassa: massa di ciascun piano  $\geq 0.9$  della massa del piano adiacente*
  - *Media: massa di ogni piano  $< 0.9$  della massa del piano sovrastante/sottostante*
  - *Alta: massa di ogni piano  $< 0.7$  della massa del piano sovrastante/sottostante*

7. *Irregolarità strutturale in elevazione: discontinuità degli elementi resistenti ad azioni laterali:*

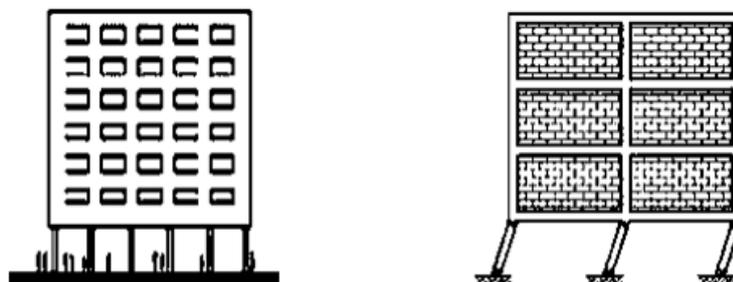
- *Bassa: solo gli elementi che contribuiscono in percentuale  $\leq 10\%$  alla rigidezza/resistenza dei sistemi resistenti ad azioni laterali presentano una discontinuità verticale*
- *Media: tutti gli elementi che contribuiscono in percentuale  $> 10\%$  alla rigidezza/resistenza dei sistemi resistenti ad azioni laterali presentano una discontinuità verticale*
- *Alta: tutti gli elementi che contribuiscono in percentuale  $> 30\%$  alla rigidezza/resistenza dei sistemi resistenti ad azioni laterali presentano una discontinuità verticale*

Inoltre, tra le criticità di geometria è stata inclusa anche la possibile presenza di giunti strutturali con dimensione non adeguata, con conseguenti possibili effetti di martellamento tra diversi blocchi dell'edificio. In particolare, nel modulo sono presenti le 3 voci:

1. *Presenza di giunti strutturali;*
2. *Dimensione dei giunti strutturali;*
3. *Effetto martellamento: nel caso in cui la differenza in altezza tra corpi adiacenti è maggiore del 20% dell'altezza di interpiano del corpo preso in esame:*
  - *Bassa: dimensione del giunto  $> 0.01 H$  ( $H$  = altezza fino al livello del piano preso in considerazione), piani allineati e differenza in altezza pari ad un piano*
  - *Media:  $0.005H < \text{distanza tra edifici adiacenti} < 0.01 H$  ( $H$  = altezza fino al livello del piano preso in considerazione)*
  - *Alta:  $0 < \text{distanza tra edifici adiacenti} < 0.005 H$  ( $H$  = altezza fino al livello del piano preso in considerazione)*

3.2.2 Criticità costruttive e dei materiali

Tra le criticità costruttive rientrano tutte le possibili interazioni negative tra elementi strutturali e non-strutturali. Considerando edifici con struttura a telaio in Calcestruzzo Armato (CA), le criticità possono essere legate ad una distribuzione irregolare in pianta e/o in elevazione delle tamponature (con conseguenti possibili effetti torsionali o meccanismo di piano soffice, Figura 24), alla presenza di pilastri corti e l'assenza di misure a contrasto di collassi fragili e ribaltamento fuori piano.



**Figura 24. Esempio di criticità legata ad una distribuzione irregolare delle tamponature in elevazione (sinistra) e conseguente possibile meccanismo di piano soffice (destra)**

Le voci relative alle criticità di distribuzione delle tamponature presenti nel modulo sono:

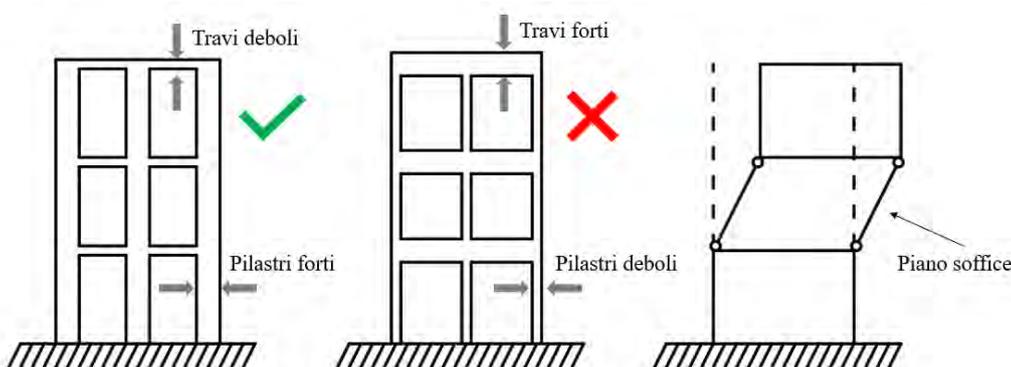
1. *Distribuzione irregolare delle tamponature in pianta;*
2. *Distribuzione irregolare delle tamponature sull'altezza dell'edificio;*
3. *Tamponature tali da individuare pilastri corti;*
4. *Tamponature senza misure a contrasto di collassi fragili ed espulsione in direzione perpendicolare al pannello.*

Le criticità dei materiali da costruzione riguardano la scarsa qualità del calcestruzzo e dell'acciaio delle barre di armatura, la presenza di barre lisce, fenomeni di degrado e corrosione. Queste criticità possono ridurre in modo considerevole la capacità della struttura in esame. Si riporta di seguito l'elenco delle voci inserite nel modulo:

1. Scarsa qualità dei materiali;
2. Presenza di barre lisce;
3. Presenza di fenomeni di deterioramento: corrosione delle barre di armatura;
4. Presenza di fenomeni di deterioramento: degrado del calcestruzzo.

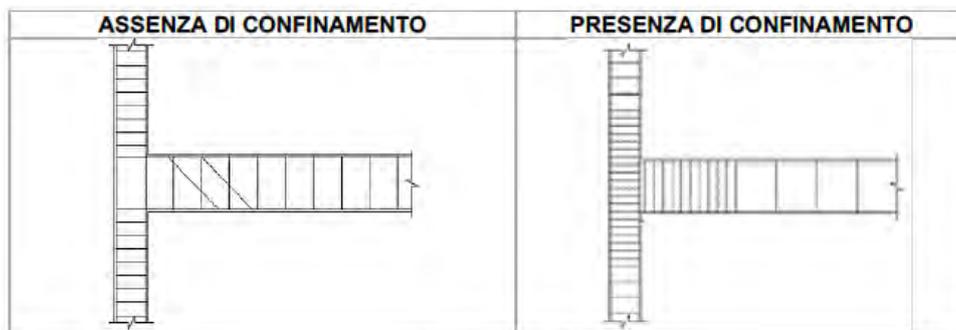
### 3.2.3 Criticità dei dettagli costruttivi

Le criticità dei dettagli costruttivi fanno riferimento ad una generale mancanza dei requisiti e delle prescrizioni legate alla progettazione in capacità, nonché alla presenza di dettagli costruttivi tipici delle strutture esistenti ritenuti ormai inadeguati per strutture di nuova progettazione. A livello globale, è stata aggiunta l'informazione relativa ad una generale assenza di principi di gerarchia delle resistenze, identificabile dalla presenza di travi forti e pilastri deboli ed un possibile meccanismo di piano soffice (Figura 25).



**Figura 25. Esempi di gerarchia di resistenza: presenza (pilastri forti e travi deboli; sinistra) ed assenza (travi forti e pilastri deboli; centro) che può causare meccanismi di piano soffice (destra) in caso di sisma**

A livello locale, le criticità sono legate uno scarso quantitativo di armatura trasversale in travi e pilastri, assenza di staffe nel pannello nodale, presenza di barre ancorate ad uncino, inadeguata lunghezza di ancoraggio, inadeguata lunghezza di sovrapposizione delle barre, presenza di ferri piegati ed assenza di confinamento nelle zone dissipative (Figura 26).



**Figura 26. Assenza (sinistra) e presenza (destra) di confinamento nelle zone dissipative**

Queste criticità possono comportare un comportamento fragile o poco duttile della struttura livello sia globale che locale, incrementando notevolmente la vulnerabilità sismica dell'edificio.

Si riporta di seguito l'elenco delle voci relative alle criticità dei dettagli costruttivi inserite nel modulo:

1. Assenza principi di gerarchia di resistenza: presenza di travi forti e pilastri deboli;
2. Assenza principi di gerarchia di resistenza: possibile meccanismo di piano soffice;
3. Assenza principi di gerarchia di resistenza: assenza di gerarchia negli elementi strutturali;
4. Criticità nel pannello nodale: assenza di staffe nel nodo;
5. Criticità nel pannello nodale: presenza di ancoraggi ad uncino;
6. Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali: scarso rinforzo a taglio;
7. Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali: calcestruzzo poco confinato;
8. Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali: limitata lunghezza di ancoraggio delle barre;
9. Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali: inadeguata sovrapposizione delle barre;
10. Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali: bassi rapporti geometrici relativi all'armatura longitudinale;
11. Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali: presenza di ferri piegati nelle travi;
12. Assenza di confinamento nelle zone critiche degli elementi strutturali.

### 3.2.4 Dati dimensionali

In aggiunta, nel modulo PELL-School-RS è stata inserita anche l'informazione relativa a dati dimensionali. Questi dati permettono di valutare - seppur a livello preliminare - tramite la procedura analitico-meccanica semplificata proposta, la vulnerabilità sismica e la classe di rischio dell'edificio in esame, come verrà illustrato in dettaglio nel Capitolo 4.

In particolare, nel caso dei solai, al compilatore viene richiesto di indicarne la tipologia tra quelle riportate in Figura 27, nonché l'orditura (direzione longitudinale o trasversale) e la tipologia di copertura (spingente pesante; non spingente pesante; spingente leggera; non spingente leggera).

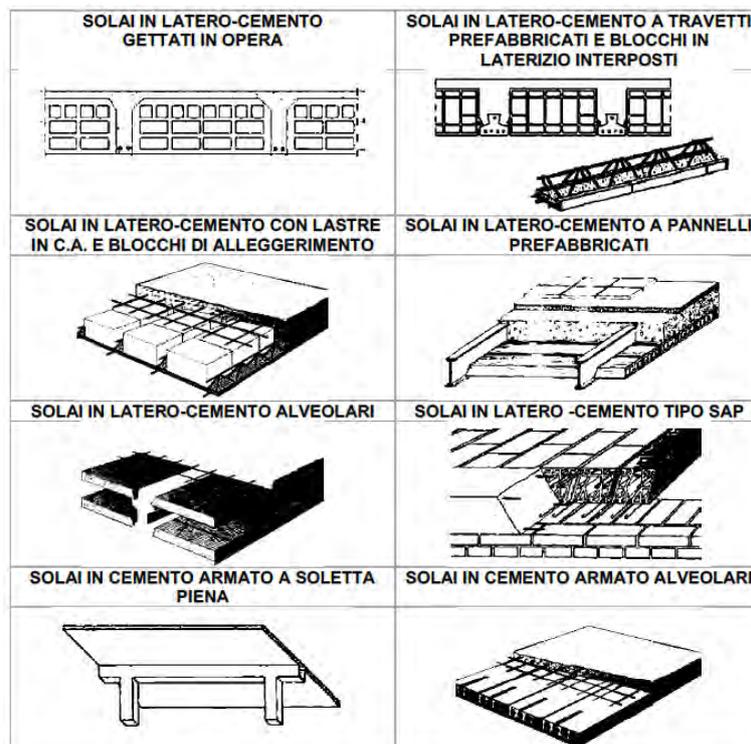


Figura 27. Immagini delle tipologie di solaio identificabili nel modulo PELL-School-RS (modificato da [29])

I dati dimensionali richiesti nel modulo per il solaio d'interpiano e di copertura, nonché per la geometria dell'edificio, sono riportati in Figura 28.

Num[mm]		S	Elementi portanti - strutture orizzontali solai - spessore
Num [mm]		S/N	Elementi portanti - strutture orizzontali coperture - spessore
Num[mm <sup>2</sup> ]		S/N	Solaio - armatura - maglia elettrosaldata
Num[mm <sup>2</sup> ]		S/N	Solaio - armatura - spezzoni d'acciaio
Num [m]		S	Altezza media d'interpiano
Num		S	Numero di piani (compresi piani interrati)
Num[m <sup>2</sup> ]		S	Superficie media di piano
Num [m]		S/N	Larghezza totale dell'edificio
Num [m]		S/N	Lunghezza totale dell'edificio

Figura 28. Dati dimensionali solaio ed edificio del modulo PELL-School-RS

In aggiunta, nel modulo per ogni US vengono richiesti i dati dimensionali relativi alla struttura in telaio e/o in setti in CA. Questi dati riguardano:

- lunghezza e numero di campate in entrambe le direzioni;
- geometria delle sezioni di travi, pilastri e setti, con indicazione del quantitativo di armatura;
- dettagli costruttivi del pannello nodale;
- spessore del solaio e quantitativo di armatura.

In Figura 29 e in Figura 30 si riporta la schermata del modulo con la totalità dei dati dimensionali richiesti per edifici con struttura a telaio e setti in CA, rispettivamente.

Classe	Attributo	Tipologia	CAMPI da COMPILARE	Obbligatorio S/N	Descrizione
US	Codice Edificio	String (10)		S	Indica il codice dell'edificio scolastico
US	Codice Unità strutturale	String (10)		S	Indica il codice dell'unità strutturale
US-CA-Campate	Campate - numero	Num (integer)		S	Campate - Numero in Direzione longitudinale
US-CA-Campate	Campate - numero	Num (integer)		S	Campate - Numero in Direzione trasversale
US-CA-Campate	Campate - lunghezza	Num [m]		S	Campate - Lunghezza in Direzione longitudinale
US-CA-Campate	Campate - lunghezza	Num [m]		S	Campate - Lunghezza in Direzione trasversale
US-CA-Travi	Trave - sezione	Num [mm]		S	Travi - Larghezza media della sezione
US-CA-Travi	Trave - sezione	Num [mm]		S	Travi - Altezza media della sezione
US-CA-Travi	Travi - armatura - longitudinale	Num [mm <sup>2</sup> ]		S	Travi - Area armatura longitudinale in zona tesa
US-CA-Travi	Travi - armatura - longitudinale	Num [mm <sup>2</sup> ]		S	Travi - Area armatura longitudinale in zona compressa
US-CA-Travi	Travi - armatura - trasversale	Num [mm <sup>2</sup> ]		S	Travi - Area armatura trasversale
US-CA-Pilastri	Pilastri - sezione	Num [mm]		S	Pilastri - Larghezza media della sezione
US-CA-Pilastri	Pilastri - sezione	Num [mm]		S	Pilastri - Altezza media della sezione
US-CA-Pilastri	Pilastri - armatura - longitudinale	Num [mm <sup>2</sup> ]		S	Pilastri - Area armatura longitudinale
US-CA-Pilastri	Pilastri - armatura - trasversale	Num [mm <sup>2</sup> ]		S	Pilastri - Area armatura trasversale
US-CA-Pannello Noda	Pannello nodale - dettagli costruttivi	Enum	Barre longituc	S	Pannello nodale - Dettagli costruttivi

Figura 29. Dati dimensionali per edifici con struttura a telaio in CA

Attributo	Tipologia	CAMPI da COMPILARE	Descrizione
Codice Edificio	String (10)		Indica il codice dell'edificio scolastico
Codice Unità strutturale	String (10)		Indica il codice dell'unità strutturale
Setti - sezione	Num[mm]		Setti - Larghezza media della sezione
Setti - sezione	Num[mm]		Setti - Altezza media della sezione
Setti - armatura	Num [mm <sup>2</sup> ]		Setti - Area armatura longitudinale
Setti - armatura	Num [mm <sup>2</sup> ]		Setti - Area armatura trasversale

Figura 30. Dati dimensionali per edifici con struttura a setti in CA

Si evidenzia che nel caso di strutture a telaio in cemento armato, è necessario indicare per il pannello nodale la tipologia di dettagli costruttivi presenti tramite menu a tendina. La capacità del pannello nodale, infatti, è

fortemente influenzata dalla tipologia di dettagli costruttivi presenti, quali presenza o assenza di staffatura e tipologia di ancoraggio delle barre longitudinali delle travi (Pampanin et al. [30]). I dettagli costruttivi che è possibile identificare nel modulo sono riportati in Figura 31:

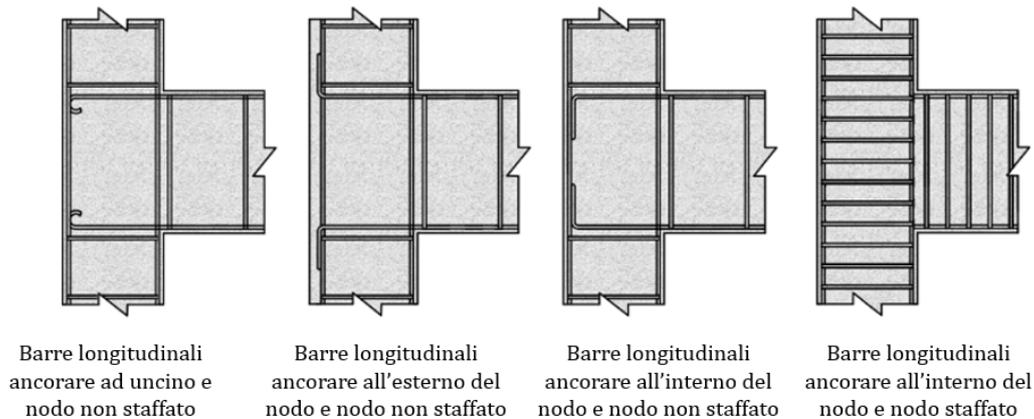


Figura 31. Dettagli costruttivi del pannello nodale individuabili nel modulo PELL-School-RS (immagine modificata da [31])

### 3.3 Manuale di compilazione scheda

Al fine di uniformare il più possibile le risposte e supportare i tecnici compilatori della scheda PELL-School-RS, è stato realizzato un manuale di compilazione della scheda. Al momento, infatti, la scheda si presenta in formato EXCEL e, sebbene sia stato predisposto un apposito spazio contenente le “definizioni” dei campi da compilare, è stato ritenuto utile realizzare anche un documento – manuale d’uso - con illustrazioni grafiche ed ulteriori informazioni riguardanti i dati richiesti. Il manuale di compilazione scheda ripercorre pertanto tutti i campi riportati nella scheda e riporta, laddove ritenuto necessario, immagini, fotografie e/o illustrazioni grafiche di supporto.

A titolo esemplificativo, si riportano di seguito un estratto del manuale di compilazione scheda a supporto dell’ identificazione di presenza di fenomeni di deterioramento (Figura 32). L’intero manuale d’uso - realizzato in questo studio - è riportato in Appendice A.

**Presenza di fenomeni di deterioramento - corrosione delle barre di armatura:** Indica la presenza di fenomeni di deterioramento delle barre di armatura. Nel caso di elementi strutturali in c.a., i fenomeni di corrosione possono presentarsi sotto forma di:

- presenza di fenomeni di percolazione del calcestruzzo;
- inadeguato spessore del copriferro;
- presenza diffusa di fessurazione nel calcestruzzo lungo le direzioni delle armature longitudinali e trasversali;
- evidenti distacchi del copriferro e barre di armatura esposte e visibilmente ossidate.

**Presenza di fenomeni di deterioramento - degrado del calcestruzzo:** Indica la presenza di fenomeni di deterioramento degli elementi strutturali dovuti ad un degrado del calcestruzzo.

**ESEMPIO DI FENOMENI DI DETERIORAMENTO**

Figura 32. Estratto del manuale di compilazione scheda: identificazione di presenza di fenomeni di deterioramento

### 3.4 Validazione della scheda PELL-School-RS

In aggiunta al modulo PELL-School-RS, è stato predisposto un modulo Google per una validazione preliminare della scheda proposta. Dal momento che non è ancora disponibile un riscontro dai tecnici ingegneri che saranno impegnati nella compilazione delle schede, in questa fase preliminare la scheda è stata sottoposta agli studenti del secondo ed ultimo anno della Laurea Magistrale in Ingegneria Civile presso l’Università di Roma “Sapienza” durante il corso di “Riabilitazione Strutturale di Edifici in Cemento Armato” tenuto dal Prof. Ing. Stefano Pampanin. In questo modo è stato possibile ottenere un primo feedback riguardo la scheda ed individuare eventuali criticità e/o refusi. È bene evidenziare che gli studenti di Ingegneria Civile a cui è stata sottoposta la scheda non sono (ancora) ingegneri in possesso di abilitazione alla professione, e pertanto questa fase di validazione necessiterà di un ulteriore riscontro derivante con gli ingegneri e/o tecnici compilatori. D’altra parte, va tuttavia specificato che gli studenti del corso di “Riabilitazione Strutturale di Edifici in Cemento Armato” conoscono, durante il corso, e sono in grado di applicare la procedura analitico-meccanica semplificata SLAMA di recente sviluppo (descritta nel capitolo 4), e dunque di dare un giudizio sulla qualità della scheda al fine dell’implementazione di tale procedura.

A titolo di esempio, in Figura 33 è riportata una schermata del modulo Google realizzato per la consegna e validazione della scheda. L’intero modulo è riportato in Appendice B. Il modulo potrà essere facilmente modificato in futuro per essere sottoposto anche a figure professionali quali ingegneri e tecnici specializzati.

Quanto tempo avete impiegato a compilare la scheda PELL-Seismic? (indicare tempo impiegato in formato hh:mm; esempi di risposta: 30min = 00:30 ; 2 ore e 15min = 02:15)

La tua risposta \_\_\_\_\_

Avete avuto difficoltà nella compilazione della scheda PELL-Seismic? \*

Sì

No

Altro: \_\_\_\_\_

Quanto ritenete che è stato complesso compilare la scheda PELL-Seismic? \*

Molto facile    1    2    3    4    5    Molto complesso

Figura 33. Schermata del modulo Google realizzato per la validazione della scheda PELL-School-RS

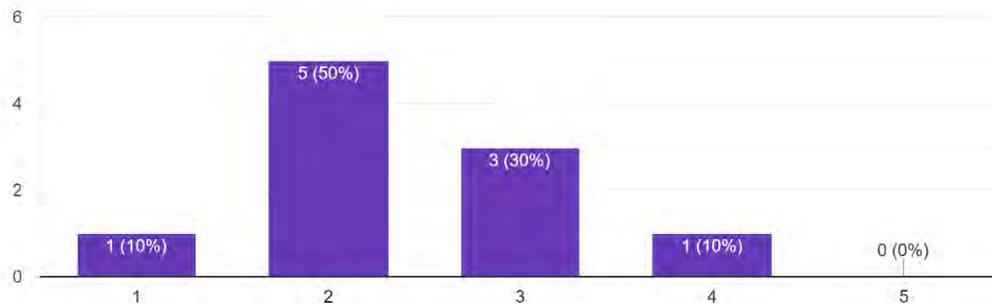
Si riportano di seguito, brevemente, i risultati del sondaggio relativo a 10 edifici caso studio.

*Tempo di compilazione della scheda:* il tempo medio impiegato per la compilazione della scheda è risultato di circa 1 ora, con un tempo minimo di compilazione di 30 min (2 casi) ed un tempo massimo di 2 ore (1 caso).

*Difficoltà nella compilazione della scheda:* il 50% degli studenti ha dichiarato di non avere avuto difficoltà nella compilazione della scheda. Il restante 50% si è avvalso dell’opzione “altro”, generalmente per indicare i campi che hanno ritenuto di più difficile compilazione. Tra questi sono emersi la voce relativa all’armatura

della maglia elettrosaldata del solaio e la sezione relativa ai setti (vedi paragrafo 3.4.2). Nessun gruppo ha dichiarato di avere avuto difficoltà nella compilazione della scheda (i.e., nessun gruppo ha risposto “sì” alla domanda).

*Complessità nel compilare la scheda:* è stato richiesto di indicare il grado di complessità di compilazione della scheda su una scala da 1 a 5, dove la risposta 1 indica “molto facile” e 5 indica “molto complesso”. I risultati del sondaggio sono riportati in Figura 34.

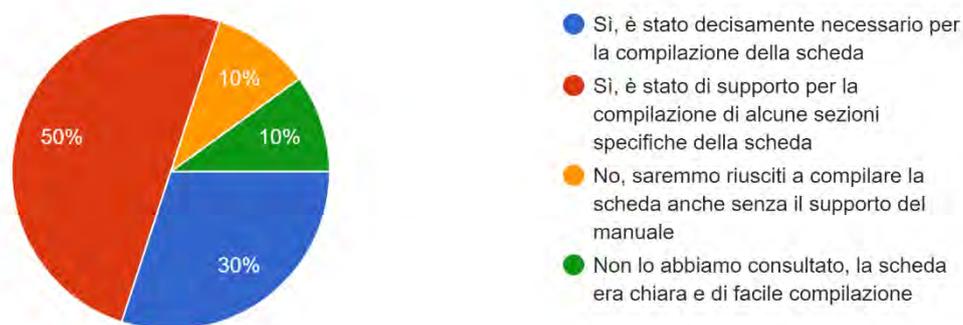


**Figura 34. Risposte al quesito sulla complessità di compilazione della scheda (1: molto facile; 5: molto complesso)**

Il grafico riportato in Figura 34 mostra che la maggior parte degli studenti ha trovato la scheda di facile compilazione: il 10% ha indicato un grado di complessità 1 (molto facile) ed il 50% un grado di complessità 2. Il 30% ha indicato in grado di complessità 3 (medio), mentre in un solo caso (10%) è stato indicato un grado di complessità 4 (complesso). Nessuno ha ritenuto la scheda estremamente complessa (grado 5).

*Dati sufficienti per l'implementazione della procedura SLaMA:* è stato richiesto agli studenti di indicare se, a loro parere, i dati richiesti dalla scheda siano sufficienti per l'implementazione della procedura SLaMA. Al quesito tutti i gruppi hanno risposto in modo positivo.

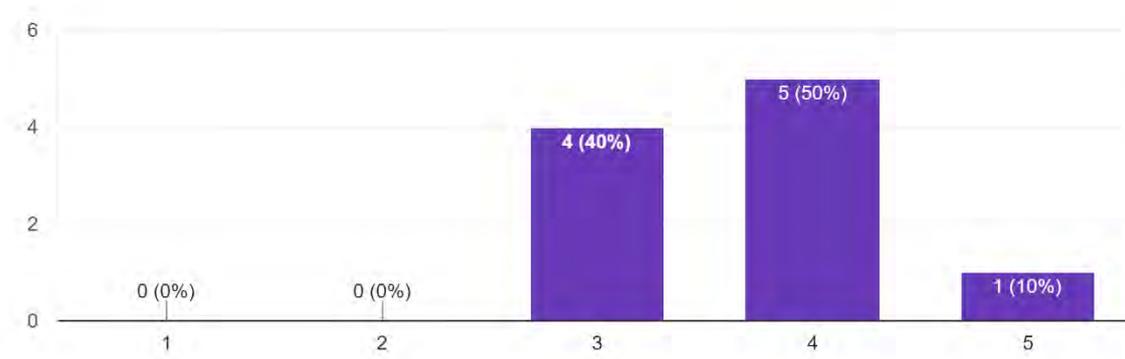
*Manuale di compilazione scheda:* è stato richiesto agli studenti di indicare se, a loro parere, il manuale di compilazione scheda sia effettivamente utile per la compilazione della scheda. Al quesito è stato posto sotto forma di risposta multipla. Le risposte ottenute sono mostrate in Figura 35.



**Figura 35. Giudizio relativo al manuale di compilazione scheda**

Come è possibile osservare dal grafico di Figura 35, il 30% degli studenti ha ritenuto che il manuale sia decisamente necessario per compilazione della scheda, mentre il 50% ha ritenuto che il manuale sia effettivamente di supporto per la compilazione di alcune sezioni specifiche della scheda; il restante 20% ha invece affermato che la compilazione della scheda non richiede il supporto del manuale: in particolare, il 10% ritiene che sarebbe riuscito a compilare la scheda anche senza il supporto del manuale, mentre un altro 10% ha affermato di non aver consultato il manuale, in quanto la scheda risultava già chiara e di facile compilazione.

*Giudizio e commento generale della scheda:* è stato richiesto di indicare un giudizio complessivo riguardo la scheda su una scala da 1 a 5, dove la risposta 1 indica “molto negativo” e 5 indica “molto positivo”. I risultati del sondaggio sono riportati in Figura 36.



**Figura 36. Giudizio complessivo della scheda (1: molto negativo; 5: molto positivo)**

Il grafico riportato in Figura 36 mostra come il giudizio globale sia nella maggior parte dei casi positivo: il 50% ha indicato un giudizio complessivo 4 (sopra la media) ed il 10% un giudizio 5 (molto positivo); il restante 40% ha indicato un giudizio 3 (medio) ed in nessun caso è stato indicato un giudizio 1 (molto negativo) o 2 (negativo). Tra i commenti ottenuti è stato riscontrato un generale apprezzamento della scheda come screening iniziale per la vulnerabilità sismica della struttura. La scheda nel complesso è stata ritenuta ben strutturata ed organizzata. In alcuni casi è stata inoltre apprezzata la presenza del manuale per la compilazione.

*Possibili future migliorie della scheda:* è stato chiesto agli studenti di indicare quali fossero, a loro parere, le possibili migliorie da implementare per la scheda. In diversi casi è stato ritenuto che la scheda sia già adeguata così come è strutturata. In altri casi, tra i suggerimenti più interessanti spicca quello di implementare la possibilità di caricare immagini (foto, disegni strutturali disponibili) che siano esplicative della criticità riscontrata per l’edificio in esame.

## 4 Procedura analitico-meccanica semplificata SLaMA ed applicazione a casi studio

La scheda di raccolta dati sviluppata per il modulo PELL-School-RS, oltre che rappresentare un database standardizzato ed interoperabile contenente i principali parametri e le criticità strutturali degli edifici scolastici a scala nazionale, permetterà inoltre di effettuare una valutazione preliminare di rischio sismico degli edifici attraverso l'implementazione di una procedura analitico-meccanica semplificata, in accordo con i più recenti sviluppi nel campo della valutazione di vulnerabilità sismica a livello internazionale. In particolare, per questo specifico obiettivo si intende fare riferimento alla procedura SLaMA (Simple Lateral Mechanism Analysis), riportata nelle recenti linee guida neozelandesi (NZSEE2017 [9]). L'approccio analitico-meccanico di questa procedura, facilmente implementabile in un foglio di calcolo, costituisce una valida alternativa alle analisi numeriche, generalmente basate sull'utilizzo di modelli ad elementi finiti, consentendo valutazioni di vulnerabilità sismica rapide, standardizzate ed eseguibili con diverso livello di conoscenza dell'edificio. In questo modo sarà possibile definire per gruppi di edifici una prima scala di vulnerabilità e di rischio sismico, supportando lo sviluppo di piani di intervento.

In questo capitolo vengono quindi descritti i passaggi chiave per l'implementazione della procedura SLaMA, discutendo i vantaggi della metodologia in termini sia di onere computazione che di identificazione delle criticità strutturali a livello locale (i.e., identificazione dei meccanismi fragili e della gerarchia delle resistenze a livello di sotto-assemblaggio nodo trave-pilastro) e globale (i.e., curva di capacità della struttura). Viene inoltre illustrata la procedura per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni, riportata nel DM 65 del 2017 [10]. Vengono quindi riportate alcune applicazioni della procedura SLaMA per l'analisi di rischio sismico di alcuni edifici caso studio, mostrandone la validità se confronta con analisi numeriche più raffinate. Infine, viene trattato in modo qualitativo la problematica relativa ad una riqualificazione integrata sismica, energetica ed architettonica del patrimonio edilizio italiano, riportando alcune metodologie per una valutazione di vulnerabilità e rischio integrata, nonché possibili soluzioni di intervento sismo-energetico integrato.

### 4.1 Descrizione della procedura SLaMA

In sintonia con l'approccio della "scuola" di Park, Paulay e Priestley, nelle linee guida neozelandesi NZSEE2017 [9] è riportata e descritta la procedura SLaMA (Simple Lateral Mechanism Analysis). SLaMA è una procedura semplificata che permette di avere una valutazione preliminare della capacità della struttura nei confronti dell'azione sismica a livello locale e globale. La procedura si basa su un approccio analitico-meccanico, ed è pertanto facilmente implementabile in un semplice foglio di calcolo (e.g., Excel).

La procedura nasce con l'obiettivo di:

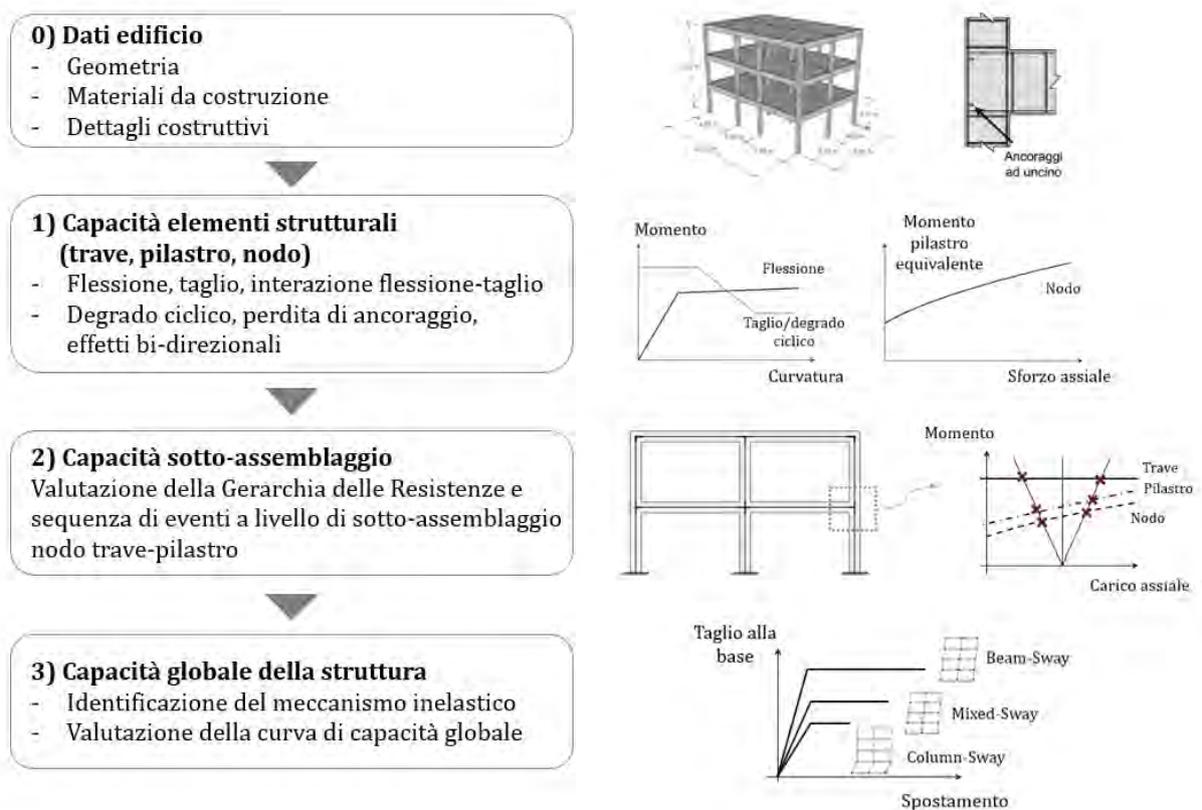
- aggiornare e migliorare gli strumenti di analisi utilizzati dagli ingegneri e/o tecnici del settore, facendo riferimento ai più recenti sviluppi a livello di ricerca in campo internazionale, nonché alle osservazioni sul campo a seguito dei più recenti eventi sismici;
- fornire una metodologia di analisi semplificata, ma basata su un approccio meccanico, in grado di evidenziare le criticità strutturali dell'edificio ed uniformare i giudizi dei tecnici valutatori;
- ristabilire il ruolo centrale, e conseguentemente richiamare le responsabilità professionali dell'ingegnere sismico (e.g. strutturista, geotecnico) affinché venga utilizzato un approccio olistico di comprensione del problema prima ancora di affidarsi al calcolatore e strumenti di analisi numerica (e.g., modelli agli elementi finiti).

A livello pratico, la procedura SLaMA permette di valutare la curva di capacità globale (i.e., curva forza-spostamento) della struttura, la quale può essere utilizzata per definire la classe di rischio sismico, in accordo con la procedura riportata nel DM 65 2017 [10] (il cui approccio è descritto in dettaglio nel paragrafo 4.2). SLaMA permette inoltre di identificare il limite superiore e inferiore della curva di capacità dell'edificio,

rappresentanti rispettivamente dal meccanismo di Beam-Sway (formazione delle cerniere plastiche in tutte le travi del telaio) e dal meccanismo di piano soffice (Column-Sway). Infine, la metodologia permette di individuare fin da subito i sotto-assemblaggi nodo trave-pilastro più critici (i.e., errata gerarchia delle resistenze), favorendo la scelta della più adeguata strategia di intervento.

La procedura SLaMA è stata ampiamente adottata e validata in letteratura [32-35]. Negli ultimi anni è stata proposta una sua estensione per considerare l'influenza dell'interazione tra tamponature e telaio strutturale [36, 37] e per l'applicazione della procedura anche alle strutture in muratura [38]. Sono inoltre in corso future estensioni per l'applicazione della procedura in scenari di post-terremoto [39].

In Figura 37 è riportato il diagramma di flusso della procedura SLaMA.



**Figura 37. Diagramma di flusso della procedura SLaMA**

I passaggi riportati in Figura 37 vengono discussi con maggiore dettaglio di seguito:

1) Dati dell'edificio:

Al fine di implementare la procedura è necessario disporre dei dati dell'edificio in termini di geometria, materiali da costruzione e dettagli costruttivi. I parametri principali per l'identificazione delle peculiarità e delle criticità strutturali sono stati precedentemente discussi in dettaglio nel capitolo 3.

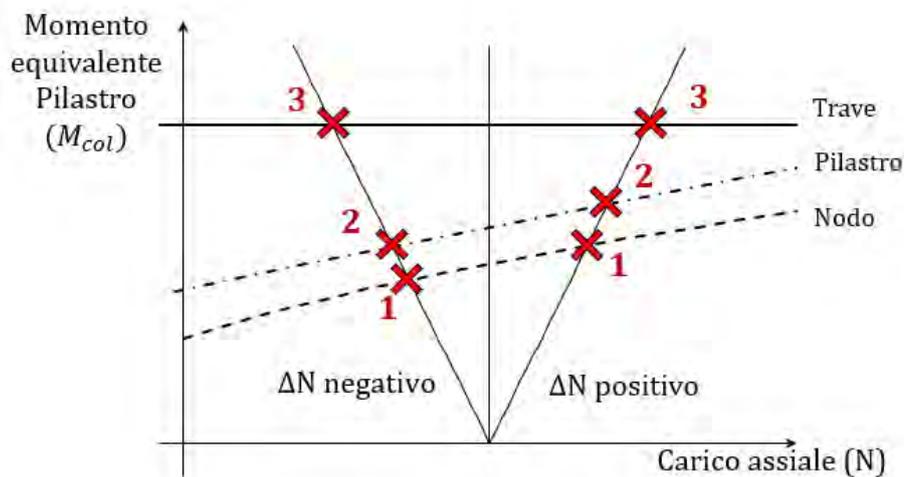
2) Valutazione della capacità degli elementi strutturali:

Il primo passaggio da eseguire è il calcolo della capacità degli elementi strutturali (travi, pilastri e nodi) in termini sia di forza/momento che di curvatura/rotazione/spostamento. Nel caso di travi e pilastri, è necessario valutare il legame momento-curvatura e l'interazione con la capacità a taglio. Altri possibili meccanismi di rottura (instabilità delle barre di armatura, perdita di ancoraggio, effetti bi-direzionali) possono essere tenuti in conto a livello di capacità locale. Per i pilastri è necessario valutare anche il diagramma di interazione sforzo assiale-momento. La capacità del pannello nodale invece (elemento strutturale particolarmente critico nel caso di edifici esistenti, in quanto nelle vecchie normative tecniche non si prevedevano staffe nei i nodi) viene ricavata a partire dalla tensione principale di trazione e dallo sforzo

assiale, ed espressa in termini di momento pilastro equivalente tramite considerazioni di equilibrio [30]. Si evidenzia che la capacità del pannello nodale è fortemente influenzata dal tipo di dettagli costruttivi presenti nella struttura. Questo dato è stato pertanto inserito all'interno della scheda PELL-Seismic-RS (Figura 31).

### 3) Valutazione della capacità a livello di sotto-assemblaggio:

Una volta valutata la capacità degli elementi strutturali, si passa alla valutazione della capacità a livello di sotto-assemblaggio nodo trave-pilastro. In primo luogo, è dunque necessario definire la capacità di ogni elemento in termini di momento pilastro equivalente, attraverso semplici considerazioni di equilibrio, al fine di rendere le capacità degli elementi confrontabili. Il confronto tra le capacità degli elementi strutturali viene effettuato sul piano momento-sforzo assiale, considerando gli elementi convergenti nello stesso sotto-assemblaggio. È bene evidenziare che sia la capacità del pilastro che quella del nodo dipende dallo sforzo assiale, a differenza della capacità della trave, e pertanto la gerarchia delle resistenze può essere diversa per due valori di carico assiale differente. È necessario dunque valutare, attraverso considerazioni di equilibrio esterno, la variazione di carico assiale nei pilastri dovuta all'azione dei carichi orizzontali. Attraverso il confronto sul piano momento-sforzo assiale è quindi possibile identificare la gerarchia delle resistenze per il sotto-assemblaggio in esame e l'elemento più critico (Figura 38).



**Figura 38. Esempio di valutazione della gerarchia delle resistenze per un sotto-assemblaggio nodo trave-pilastro tramite metodologia SLAMA**

### 4) Valutazione del meccanismo inelastico e della curva di capacità globale della struttura

La capacità globale della struttura viene determinata a partire dalla capacità di singoli sotto-assemblaggi. Una volta nota la gerarchia delle resistenze a livello di sotto-assemblaggio è possibile identificare il meccanismo inelastico più probabile. Considerando quindi i valori di capacità in termini di forza e spostamento, ancora una volta tramite considerazioni di equilibrio globale è possibile definire il taglio alla base e la capacità globale della struttura in termini di spostamento. Le stesse considerazioni vengono effettuate per definire i limiti superiore ed inferiore della curva di capacità, rappresentati rispettivamente dal meccanismo di Beam-Sway e Column-Sway.

## 4.2 *Classificazione del rischio sismico delle costruzioni*

Come precedentemente accennato, nell'Allegato A del DM 65 del 2017 [10] sono riportate le linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni. Nel documento vengono definite otto Classi di Rischio, con rischio crescente dalla lettera A+ alla lettera G. La determinazione della Classe di Rischio può essere effettuata applicando due metodi tra loro alternativi: il metodo convenzionale ed il metodo semplificato. Il metodo convenzionale è applicabile a qualsiasi tipologia di costruzione, ed è basato sull'applicazione dei normali metodi di analisi previsti dalle NTC 2018 [1]; dall'altro lato, il metodo semplificato si basa su una

classificazione macrosismica dell'edificio ed il suo utilizzo è limitato ai soli edifici in muratura. In entrambi i metodi, tuttavia, si fa riferimento al parametro PAM (Perdita Annuale Media), rappresentativo del costo di riparazione dei danni prodotti dagli eventi sismici che si manifesteranno nel corso della vita della costruzione, ripartito annualmente ed espresso come percentuale del Costo di Ricostruzione (%CR). Questo parametro può essere valutato come area sottesa alla curva rappresentativa della perdita economica, espressa in percentuale del costo di ricostruzione, legata al raggiungimento di un certo Stato Limite e la frequenza media annua di superamento (inverso del periodo di ritorno) dell'evento che porta al raggiungimento dello Stato Limite considerato. In Figura 39 si riporta un esempio di "curva PAM" per un edificio con vita nominale di 50 anni e classe d'uso II e la percentuale del costo di ricostruzione associata al raggiungimento di ogni Stato Limite:

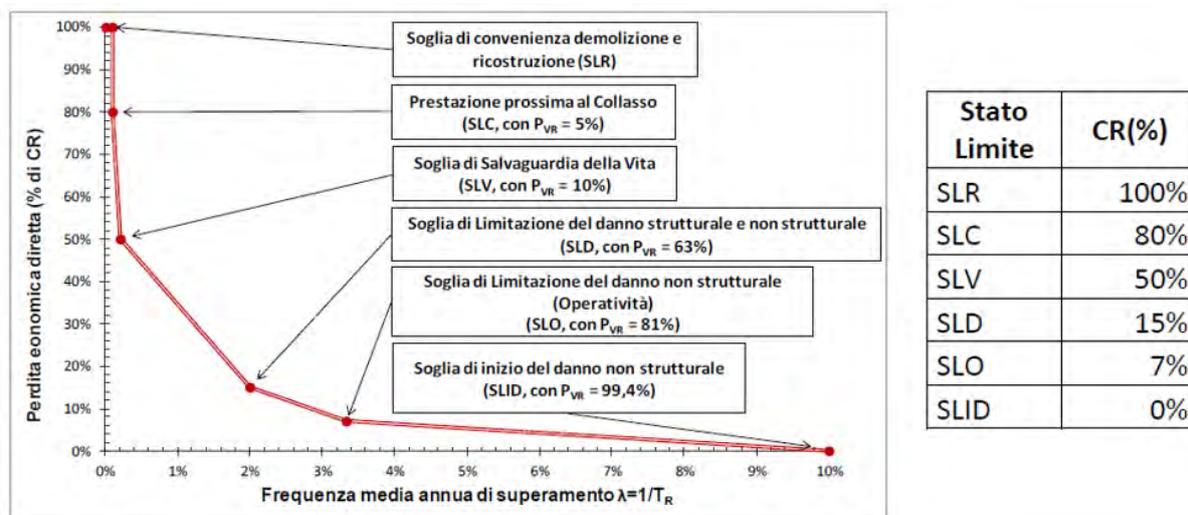


Figura 39. Andamento della curva che individua il PAM, riferito a una costruzione con vita nominale 50 anni e appartenente alla classe d'uso II (destra) e percentuale del costo di ricostruzione associata al raggiungimento di ogni Stato Limite (destra) [10]

#### 4.2.1 Metodo convenzionale

Nel metodo convenzionale, per la determinazione della Classe di Rischio, è necessario fare riferimento a due parametri:

- Il parametro economico PAM;
- Indice di Sicurezza della struttura IS-V (equivalente del parametro %NBS riportato nelle NZSEE2017[9])

Per il calcolo di tali parametri è necessario determinare l'accelerazione di picco al suolo (PGA, Peak Ground Acceleration) per le quali si raggiungono gli stati limite di operatività (SLO), danno (SLD), salvaguardia della vita (SLV) e collasso (SLC). Questa valutazione viene effettuata applicando le verifiche di sicurezza previste dalla normativa tecnica, e dunque il metodo convenzionale è applicabile a tutti i tipi di costruzione previsti dalla normativa. Nel documento vengono inoltre introdotti due Stati Limite aggiuntivi: lo Stato Limite di Inizio Danno (SLID) e lo Stato Limite di Ricostruzione (SLR). Allo SLID viene associata una perdita economica nulla, per un periodo di ritorno convenzionalmente fissato a 10 anni. Lo SLR rappresenta invece quello stato generale della struttura in cui risulta pressoché impossibile l'esecuzione di un intervento diverso dalla demolizione e ricostruzione. A tale stato limite è associato convenzionalmente un periodo di ritorno pari allo SLC e una perdita economica pari al 100% del costo di ricostruzione. Al fine di determinare la Classe di Rischio della struttura è necessario identificare preliminarmente la Classe PAM e la Classe IS-V. La Classe di Rischio sarà quindi pari alla più bassa tra le due classi identificate. I valori di riferimento per la definizione delle Classi PAM e delle Classi IS-V sono riportati in Tabella 4 e Tabella 5.

**Tabella 4. Identificazione della Classe PAM [10]**

Perdita Media Annuale attesa (PAM)	Classe PAM
$PAM \leq 0,50\%$	$A^+_{PAM}$
$0,50\% < PAM \leq 1,0\%$	$A_{PAM}$
$1,0\% < PAM \leq 1,5\%$	$B_{PAM}$
$1,5\% < PAM \leq 2,5\%$	$C_{PAM}$
$2,5\% < PAM \leq 3,5\%$	$D_{PAM}$
$3,5\% < PAM \leq 4,5\%$	$E_{PAM}$
$4,5\% < PAM \leq 7,5\%$	$F_{PAM}$
$7,5\% \leq PAM$	$G_{PAM}$

**Tabella 5. Identificazione della Classe IS-V [10]**

Indice di Sicurezza	Classe IS-V
$100\% < IS-V$	$A^+_{IS-V}$
$80\% \leq IS-V < 100\%$	$A_{IS-V}$
$60\% \leq IS-V < 80\%$	$B_{IS-V}$
$45\% \leq IS-V < 60\%$	$C_{IS-V}$
$30\% \leq IS-V < 45\%$	$D_{IS-V}$
$15\% \leq IS-V < 30\%$	$E_{IS-V}$
$IS-V \leq 15\%$	$F_{IS-V}$

Vale la pena notare che, come testualmente riportato nel DM 65, “una costruzione con periodo di riferimento (VR) pari a 50 anni, le cui prestazioni siano puntualmente pari ai minimi di quelle richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni per un edificio di nuova costruzione (e dunque che raggiunge i diversi stati limite esattamente per i valori di periodo di ritorno dell’azione sismica previsti dalle norme) ha un valore di PAM che la colloca in Classe PAM B” [10].

I passaggi da seguire per la classificazione del rischio sismico seguendo l’approccio convenzionale sono riassunti di seguito:

1. Attraverso un’analisi strutturale si determinano i valori di accelerazione di picco al suolo di capacità ( $PGA_C$ ) degli eventi sismici che portano al raggiungimento degli stati limite indicati dalla norma;
2. A partire dai valori di  $PGA_C$  si determinano i corrispondenti periodi di ritorno ( $T_{RC}$ ) degli eventi sismici associati;
3. Per ciascuno  $T_{RC}$  si determina il valore della frequenza media annua di superamento  $\lambda=1/ T_{RC}$ ;
4. Per ciascuno degli stati limite considerati si associa al corrispondente valore di  $T_{RC}$  il valore della percentuale di %RC, mediante la tabella riportata in Figura 39 (destra);
5. Si valuta il PAM come l’area sottesa alla spezzata individuata dalle coppie di punti ( $\lambda$ , %CR) e si individua la Classe PAM, mediante la Tabella 4;
6. Si determina l’indice di sicurezza IS-V come rapporto tra la  $PGA_C$  (di capacità) e la  $PGA_D$  (di domanda) del sito in cui è posizionato la costruzione, con riferimento allo SLV. Si individua la Classe IS-V, mediante la Tabella 5;
7. Si individua la Classe di Rischio della costruzione come la peggiore tra la Classe PAM e la Classe IS-V.

4.2.2 Metodo semplificato

Diversamente dal metodo convenzionale, il metodo semplificato è applicabile alle solo costruzioni in muratura. In questo approccio si fa riferimento alla classificazione tipologica riportata nelle EMS-98[40] al fine di attribuire una classe di vulnerabilità tipologica all’edificio. In particolare, nell’EMS-98 si individuano 7 tipologie di edifici in muratura (principalmente in funzione della struttura verticale) e 6 classi di vulnerabilità (V<sub>1</sub> – V<sub>6</sub>), con vulnerabilità crescente dal pedice 1 al pedice 6 (Figura 40).

Tipologia di struttura		Classe di vulnerabilità					
		V <sub>6</sub> (≡A <sub>EMS</sub> )	V <sub>5</sub> (≡B <sub>EMS</sub> )	V <sub>4</sub> (≡C <sub>EMS</sub> )	V <sub>3</sub> (≡D <sub>EMS</sub> )	V <sub>2</sub> (≡E <sub>EMS</sub> )	V <sub>1</sub> (≡F <sub>EMS</sub> )
MURATURA	Muratura di pietra senza legante (a secco)	○					
	Muratura di mattoni di terra cruda (adobe)	○—					
	Muratura di pietra sbazzata	—	○				
	Muratura di pietra massiccia per costruzioni monumentali		—	○—			
	Muratura di mattoni e pietra lavorata	—	○—	—			
	Muratura di mattoni e solai di rigidità elevata		—	○—	—		
	Muratura rinforzata e/o confinata			—	○—	—	

Figura 40. Approccio semplificato per l’attribuzione della Classe di Vulnerabilità agli edifici in muratura [10]

L’EMS-98 individua quindi per ogni tipologia muraria il valore più probabile di classe di vulnerabilità (cerchio nella Figura 40) e la dispersione intorno a tale valore (le linee continue rappresentano i valori più probabili; le linee tratteggiate rappresentano i valori meno probabili o addirittura eccezionali). Nel DM 65 è riportata una tabella che guida nell’identificazione della classe di vulnerabilità media e per la valutazione dell’eventuale scostamento in funzione delle peculiarità e criticità strutturali dell’edificio. Infine, viene associata ad ogni classe di vulnerabilità una Classe di Rischio, in funzione della zona sismica di appartenenza (Tabella 6).

Tabella 6. Classe PAM attribuita in funzione della classe di vulnerabilità assegnata all’edificio e della zona sismica [10]

Classe di Rischio	PAM	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
A+*	PAM ≤ 0,50%				V <sub>1</sub> ÷ V <sub>2</sub>
A*	0,50% < PAM ≤ 1,0%			V <sub>1</sub> ÷ V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub> ÷ V <sub>4</sub>
B*	1,0% < PAM ≤ 1,5%	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub> ÷ V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>5</sub>
C*	1,5% < PAM ≤ 2,5%	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>6</sub>
D*	2,5% < PAM ≤ 3,5%	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub> ÷ V <sub>6</sub>	
E*	3,5% < PAM ≤ 4,5%	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>		
F*	4,5% < PAM ≤ 7,5%	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>		
G*	7,5% ≤ PAM	V <sub>6</sub>			

### 4.3 Applicazione a edifici caso studio

Si riporta di seguito, a titolo di esempio, l'applicazione della procedura SLaMA con classificazione del rischio sismico per alcuni edifici caso studio. Gli edifici di seguito riportati sono parte di una serie di edifici scolastici (81) facenti parte del progetto U.E.F.A. - European Union ELENA Foggia Facility Assistance (Pampanin et al. [17]), che rappresenta un'iniziativa promossa dalla Camera di commercio di Foggia e finanziata dalla Commissione europea e dalla Banca Europea per gli investimenti nell'ambito dell'efficiamento energetico degli edifici per il raggiungimento degli obiettivi delle politiche europee sull'energia.

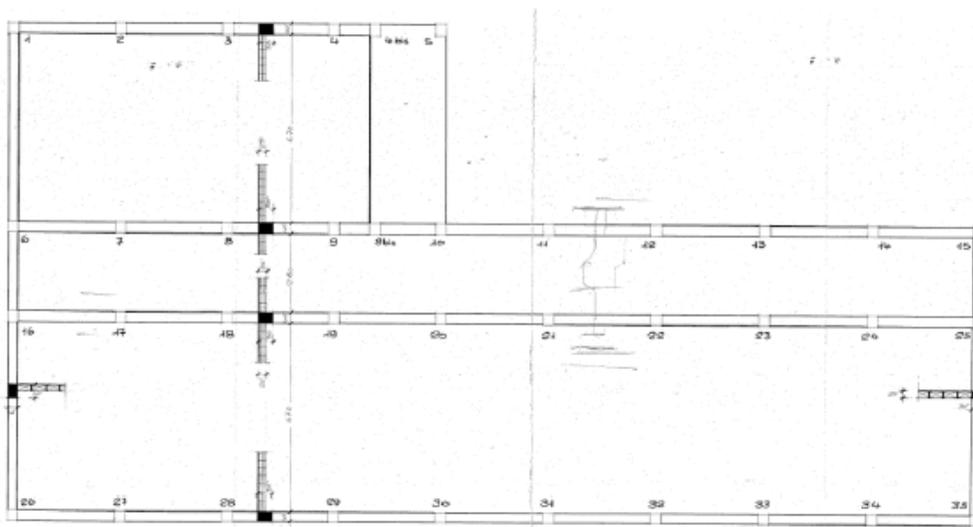
#### 4.3.1 Caso studio 1 – Liceo Bonghi, Lucera (FG)

Il primo caso studio analizzato è il Liceo Bonghi, edificio scolastico sito a Lucera in provincia di Foggia. L'edificio è stato costruito nei primi '70. Il fabbricato è costituito da più corpi di fabbrica, di differenti dimensioni, con presenza di un giunto tecnico esteso sia planimetricamente che altimetricamente. In Figura 41 viene riportata una facciata dell'edificio e il suo inquadramento territoriale:



**Figura 41. Facciata (sinistra) ed inquadramento territoriale (destra) dell'edificio caso studio**

In particolare, sono stati individuati 5 corpi di fabbrica (Corpo 1, Corpo 2, Corpo 3, Palestra, Auditorium). La presenza di un giunto tecnico permette di studiare il comportamento di ogni unità strutturale singolarmente. Nella seguente applicazione si è scelto di studiare il solo Corpo 3, caratterizzato da una dimensione planimetrica a "L", iscrivibile in un rettangolo di dimensioni pari a 34,50 m x 17,95 m. In Figura 42 si riporta una tavola storica contenente della pianta dell'unità strutturale:



**Figura 42. Pianta architettonica dell'unità strutturale in esame**

Nell'ambito del progetto di ricerca UEFA/ELENA [17] sono state realizzate delle schede di vulnerabilità sismica, contenenti le principali informazioni dell'edificio in termini di geometria, dettagli costruttivi,

tipologia di sistema sismo-resistente e criticità strutturali attese/riscontrate, con apposito spazio per i commenti. A titolo di esempio si riporta in Figura 43 e Figura 44 la scheda di acquisizione dell'edificio scolastico in esame. Tali schede rappresentano una versione preliminare della scheda proposta nell'ambito del progetto Pell-Seismic ed hanno contribuito allo sviluppo della scheda di acquisizione dati PELL-School-RS (presentata e discussa nel capitolo 3), in aggiunta alle altre schede istituzionali esistenti.

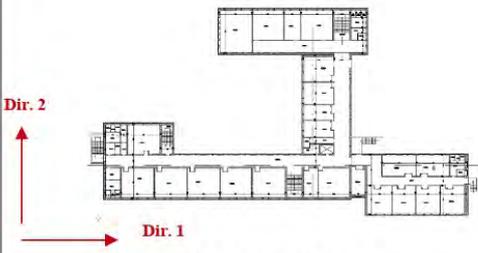
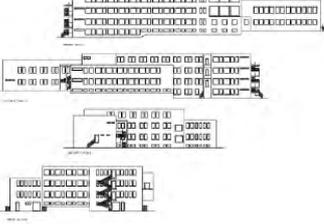
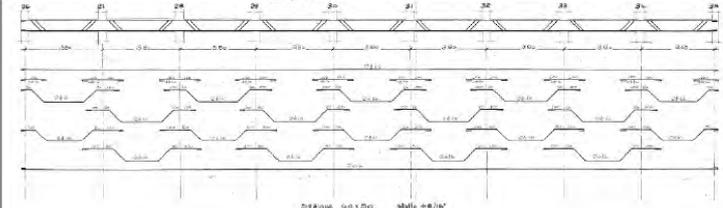
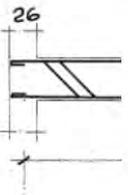
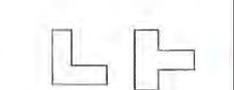
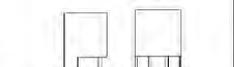
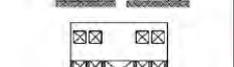
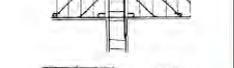
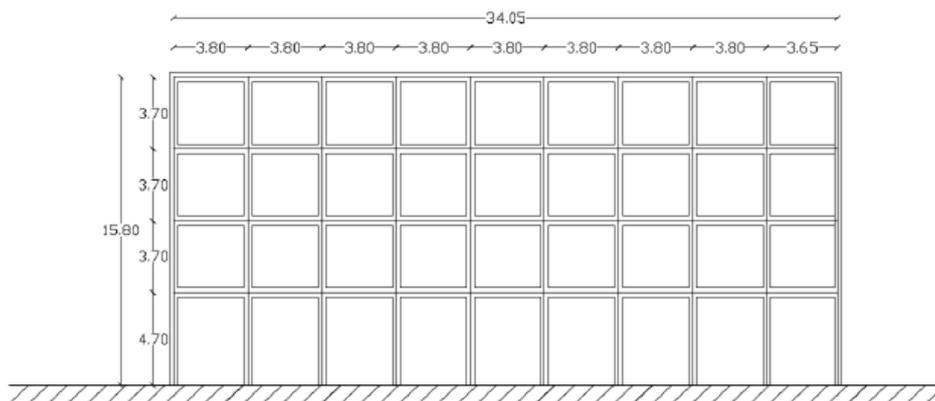
<b>SCHEDA DI VULNERABILITA' SISMICA (I LIVELLO) - EDIFICIO IN CALCESTRUZZO ARMATO</b> <i>Informazioni generali sull'edificio e identificazione delle criticità strutturali</i>					
Denominazione edificio:	Liceo "R. Bonghi"	ID:	40		
Indirizzo:	Viale Ferrovia, 19	Città:	Lucera		
Anno di costruzione:	1972-1977	Provincia:	Foggia		
<b>1. Inquadramento territoriale</b>					
					
<b>2. Geometria (pianta, prospetti)</b>					
					
<i>Note</i> ..... Non sono disponibili le sezioni dell'edificio.					
<b>3. Dettagli costruttivi</b>					
					
<i>Note</i> ..... Non si è in possesso di elaborati grafici che permettano di identificare i dettagli costruttivi della struttura.					
<b>4. Dimensioni globali dell'edificio</b>		Misurata	Stimata	<b>5. Dimensioni elementi strutturali</b>	
Dimensioni in pianta	57,35 x 45 [m]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Travi	500 x 400 ; 250 x 300 [mm]
Altezza edificio	14,70 [m]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Pilastri	400 x 400 ; 300 x 400 [mm]
Altezza interpiano	4,5 ; 3,8 ; 3,7 [m]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Setti	[mm]

Figura 43. Scheda di vulnerabilità sismica, parte 1 – Progetto UEFA/ELENA [17]

<p><b>6. Tipologia di sistema resistente</b></p> <p>Struttura a telai <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Struttura a pareti <input type="checkbox"/></p> <p>Altro ..... <input type="checkbox"/></p>	<p><b>Direzione 1</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p>	<p><b>Direzione 2</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/></p>	
<p><b>7. Criticità strutturali</b></p>			
<p>• <b>da geometria</b></p>			
<p>Irregolarità in pianta  <i>Commento</i> ..... Presenza di giunti sismici atti a suddividere la struttura irregolare, in ogni caso sono comunque presenti corpi ad "L".</p>		<p><b>SI</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>NO</b> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Irregolarità in altezza  <i>Commento</i> ..... Da prospetti.</p>		<p><input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p>	
<p>Possibili meccanismi di "colonna corta"  <i>Commento</i> ..... Presenza di finestre a nastro</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Possibili effetti martellamento  <i>Commento</i> ..... Dimensione dei giunti strutturali da verificare</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>• <b>dai materiali</b></p>			
<p>Scarsa qualità dei materiali  <i>Commento</i> ..... Dai risultati di prove in situ di cui si dispone si riscontra una forte variabilità delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo da corpo a corpo</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Presenza di barre di armatura liscia  <i>Commento</i> ..... Dedona dai dettagli di ancoraggio ad uncino.</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Presenza di fenomeni di deterioramento  <i>Commento</i> ..... Non sono stati riscontrati segni di deterioramento durante il sopralluogo.</p>		<p><input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p>	
<p>• <b>dai dettagli costruttivi</b></p>			
<p>Assenza di principi di gerarchia di resistenza  <i>Commento</i> ..... Tipica progettazione per carichi gravitazionali, fibre inferiori debolmente armate.</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Possibili criticità nel pannello nodale  <i>Commento</i> ..... Assenza armatura trasversale nodi.</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Inadeguati dettagli di armatura  <i>Commento</i> ..... Barre lisce ancorate ad uncino.</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Assenza di confinamento zone dissipative  <i>Commento</i> ..... Assenza di infittimento delle staffe nelle zone dove in cui si attendono le plasticizzazioni.</p>		<p><input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p><b>8. Ulteriori osservazioni</b></p>			
<p>Date le criticità osservate il meccanismo globale atteso risulta essere di limitata duttilità e resistenza. Si notano comunque alcune caratteristiche quali: dimensioni degli elementi strutturali, quantitativo di armature e configurazione dei telai; che permettono di stimare un rischio sismico medio in questa prima fase.</p>			

**Figura 44. Scheda di vulnerabilità sismica, parte 1 – Progetto UEFA/ELENA [17]**

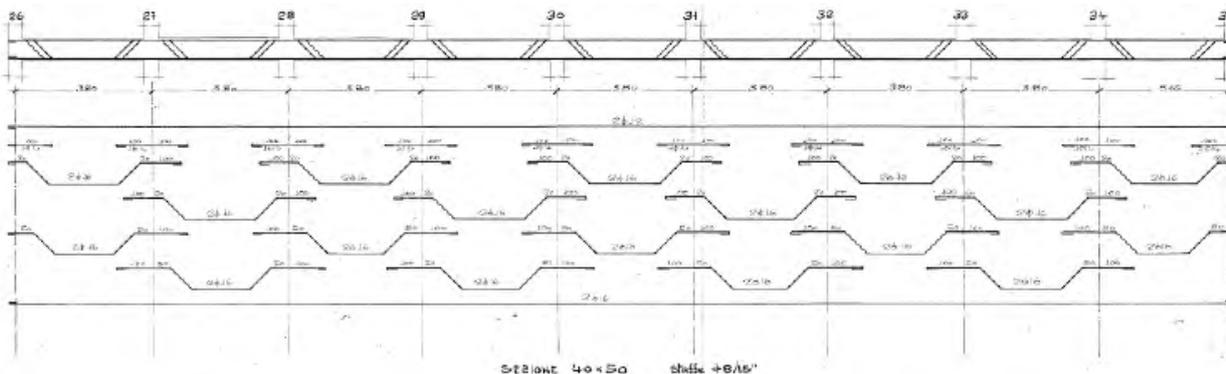
In altezza il fabbricato si sviluppa su 4 piani fuori terra. L'intera struttura è realizzata in calcestruzzo armato, con sistema resistente a telaio. I solai sono in latero-cemento e le fondazioni sono costituite da un sistema di travi rovesce. In Figura 45 si riporta la geometria del telaio sismo-resistente tipo.



**Figura 45. Geometria del telaio sismo-resistente**

Il telaio è composto da 9 campate e 4 orizzontamenti. La lunghezza delle campate è pari ad 3.8m ad eccezione dell’ultima campata, pari a 3.65m. L’altezza d’interpiano relativa al primo orizzontamento è pari a 4.7m, mentre per gli altri piani è pari a 3.7m. La lunghezza complessiva del telaio è di 34.05m, per un’altezza di 15.8m.

La geometria, il quantitativo di armatura ed i dettagli costruttivi degli elementi strutturali sono stati dedotti a partire dalle tavole storiche forniti in documentazione, di cui si riporta un estratto in Figura 46.



**Figura 46. Tavola storica di progetto di una travata del telaio in esame**

Dall’osservazione delle tavole di carpenteria è evidente che il telaio in esame presenta le tipiche criticità degli edifici progettati prima degli anni ‘70 (progettazione per i soli carichi verticali), quali una generale assenza di principi di gerarchia delle resistenze (travi forti e pilastri deboli), barre lisce ancorate ad uncino, scarso quantitativo di armatura trasversale, basso confinamento nelle zone dissipative ed assenza di staffatura nel pannello nodale.

Le caratteristiche meccaniche dei materiali sono state dedotte a partire dai risultati di una campagna di prove in situ, fornite in documentazione. In particolare, per il calcestruzzo è stato identificato un valore medio di resistenza a compressione pari a 16 MPa, mentre la tensione di snervamento ed ultima dell’acciaio sono pari rispettivamente a 392.65 MPa e 540 MPa. È possibile quindi concludere che l’edificio in esame presenta dei materiali con scarse caratteristiche meccaniche, soprattutto riguardo il calcestruzzo.

Per il caso studio in esame la capacità sismica è stata valutata sia mediante la procedura analitica SLAMA che attraverso un’analisi numerica agli elementi finiti con software strutturale SAP2000 (CSI [41]). Inoltre, è stata valutata la classe di rischio sismico delle configurazioni, seguendo quanto riportato nell’Allegato A del DM 65 del 7/03/2017 [10]. I risultati ottenuti applicando la procedura analitica SLAMA vengono riassunti in Figura 47- 49.

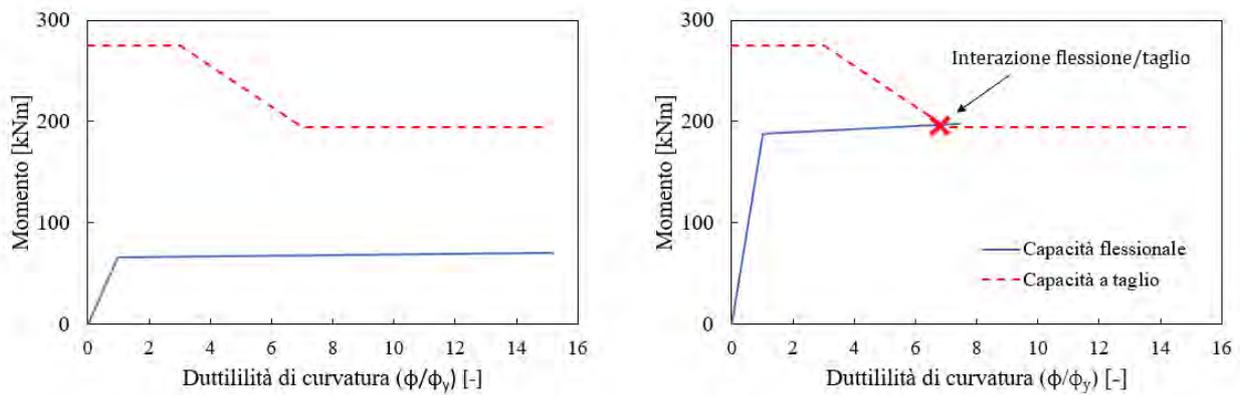


Figura 47. Capacità flessionale e a taglio delle travi del telaio: sezione soggetta a momento positivo (sinistra) e negativo (destra)

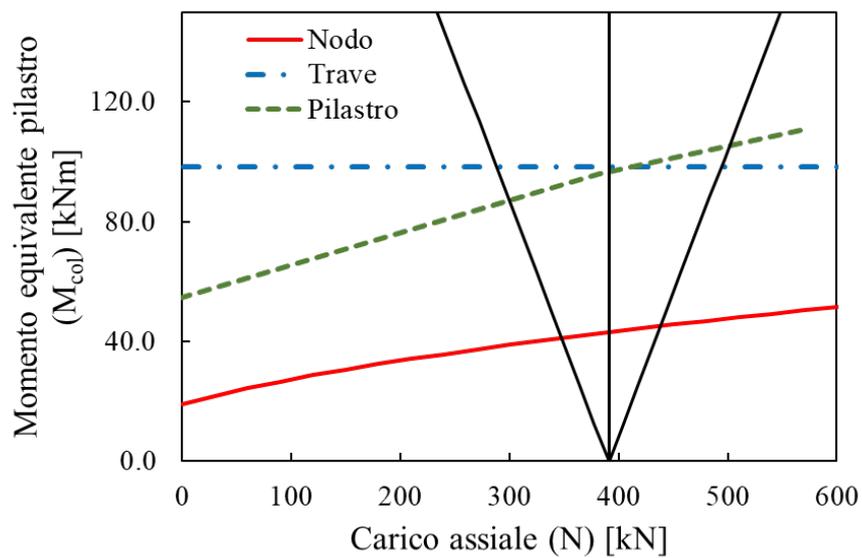


Figura 48. Gerarchia delle resistenze di un nodo esterno al primo piano

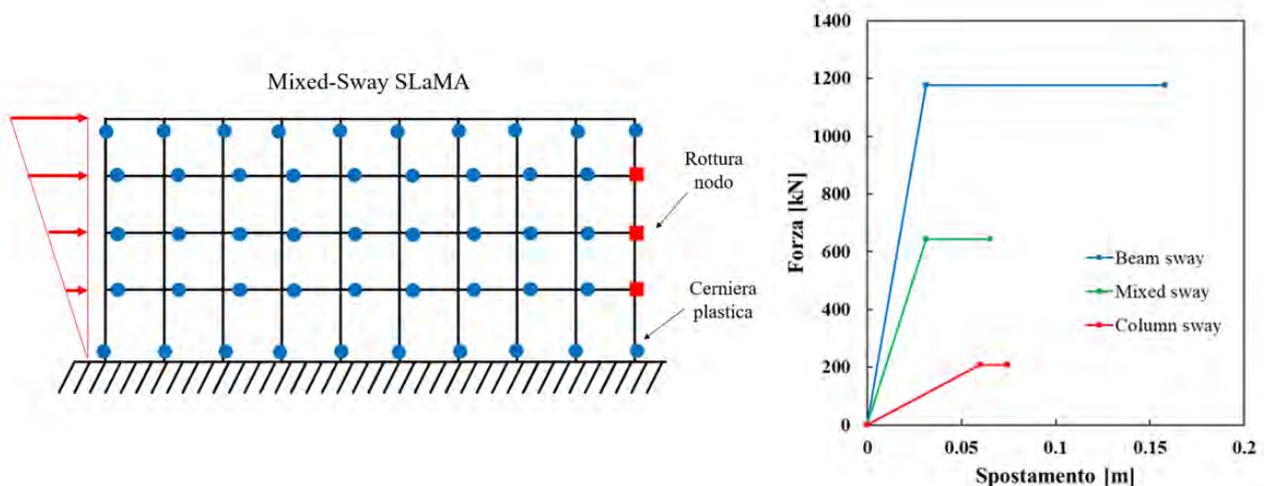
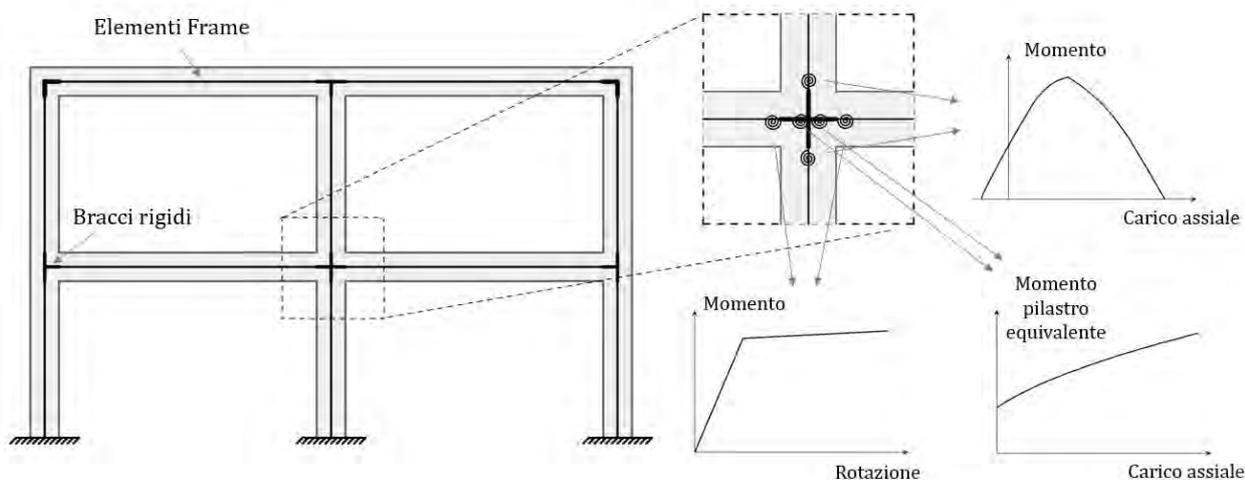


Figura 49. Meccanismo inelastico ottenuto (sinistra) e curve di capacità (Beam-Sway o curva limite superiore, Mixed-Sway o curva attesa, Column-Sway o curva limite inferiore) valutate tramite procedura SLAMA (destra)

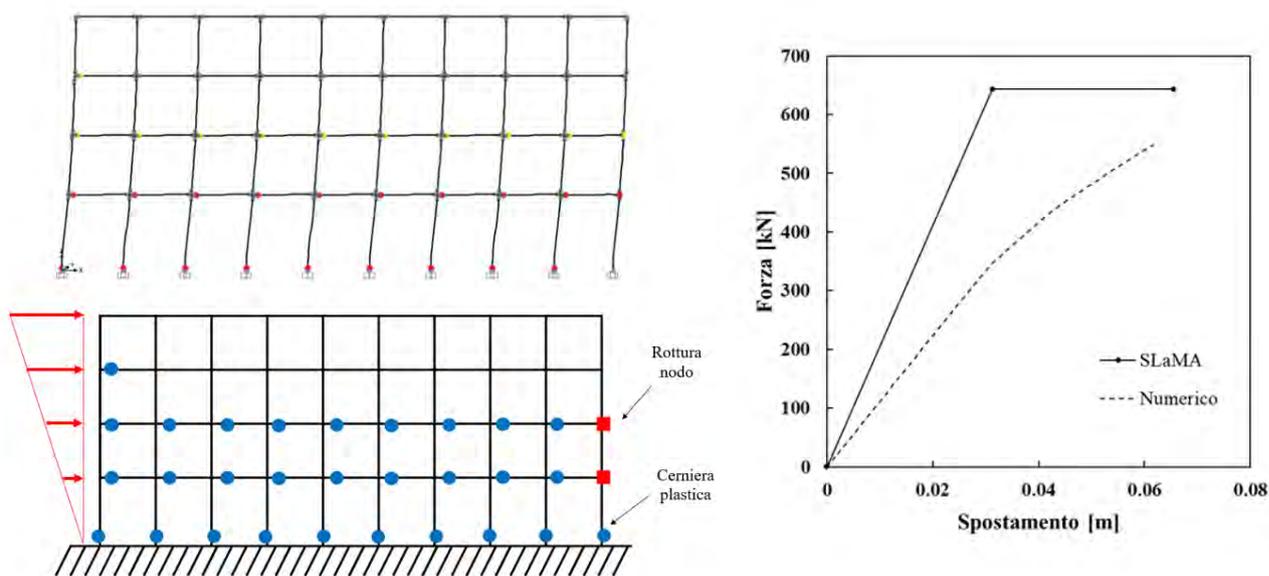
L'approccio di modellazione adottato per le analisi numeriche in SAP2000 consiste in una modellazione a plasticità concentrata con elementi *frame* monodimensionali ed è schematizzato in Figura 50.



**Figura 50. Schematizzazione dell'approccio di modellazione a plasticità concentrata utilizzato per le analisi numeriche in SAP2000**

I vincoli alla base dei pilastri sono degli incastrati perfetti (i.e., vengono trascurati gli effetti dell'interazione terreno-struttura) ed i solai sono considerati infinitamente rigidi nel loro piano (i.e., vincolo di diaframma). Gli elementi travi e pilastri sono modellati tramite elementi *frame* monodimensionali; le Cerniere Plastiche (CP) sono poste all'estremità degli elementi strutturali. In particolare, per le travi sono state definite delle CP flessionali, sfruttando il legame momento-rotazione della sezione. Per i pilastri invece sono state modellate delle cerniere con diagramma di interazione momento-carico assiale. Il pannello nodale è stato modellato tramite bracci rigidi, a cui sono state aggiunte delle molle rotazionali per la valutazione della capacità del nodo, in accordo con quanto suggerito nel lavoro di Pampanin et al. [30].

I risultati delle analisi numeriche effettuate in SAP2000 sono riportati in Figura 51.



**Figura 51. Meccanismo inelastico ottenuto con analisi numerica in SAP2000 (sinistra in alto) e sua schematizzazione (sinistra in basso); confronto tra procedura SLaMA e pushover numerica con software SAP2000 (destra)**

Come mostrato in Figura 49 ed in Figura 51, la procedura SLaMA è in grado di fornire una buona previsione del comportamento della struttura, sia in termini di meccanismo inelastico atteso che in termini di curva di capacità della struttura. La differenza riscontrata in termini di taglio alla base è principalmente dovuta ad una bassa duttilità del sistema strutturale, legata alla riduzione della lunghezza di cerniera plastica per tener conto degli inadeguati dettagli costruttivi. Questo comporta il raggiungimento della rotazione ultima per il primo elemento strutturale (SLV) prima che raggiunga la plasticizzazione negli altri elementi strutturali. Ne consegue una significativa riduzione di capacità in duttilità e una leggera sovrastima del taglio alla base in corrispondenza del punto ultimo da parte della procedura. È inoltre evidente che la procedura SLaMA in questo caso specifico comporti una sovrastima della rigidezza iniziale della struttura. Questo fenomeno è dovuto al fatto che la procedura coglie in maniera adeguata il valore dello spostamento a cui la struttura entra in campo plastico (i.e., il punto di entrata in campo plastico della curva bilineare SLaMA è quasi coincidente, in termini di spostamento, con il punto in cui la curva di capacità derivante dall'analisi numerica cambia rigidezza), tuttavia la procedura associa a questo valore la stessa capacità in termini di taglio alla base del punto di spostamento ultimo. Ne deriva dunque una generale sovrastima della rigidezza iniziale (evidente in questo caso studio specifico), che può tuttavia essere risolta attraverso opportune considerazioni di equilibrio per una valutazione più adeguata del taglio alla base in corrispondenza dell'entrata in campo plastico della struttura.

Una volta ottenute le curve di capacità della struttura è stato valutata la classe di rischio sismico. La valutazione è stata fatta utilizzando le curve ottenute mediante la procedura analitica SLaMA. In particolare, in primo luogo si è calcolato l'Indice di Sicurezza IS-V. La valutazione dei punti di prestazione sismica per i differenti stati limite è stata condotta applicando il Capacity Spectrum Method [42]. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 52.

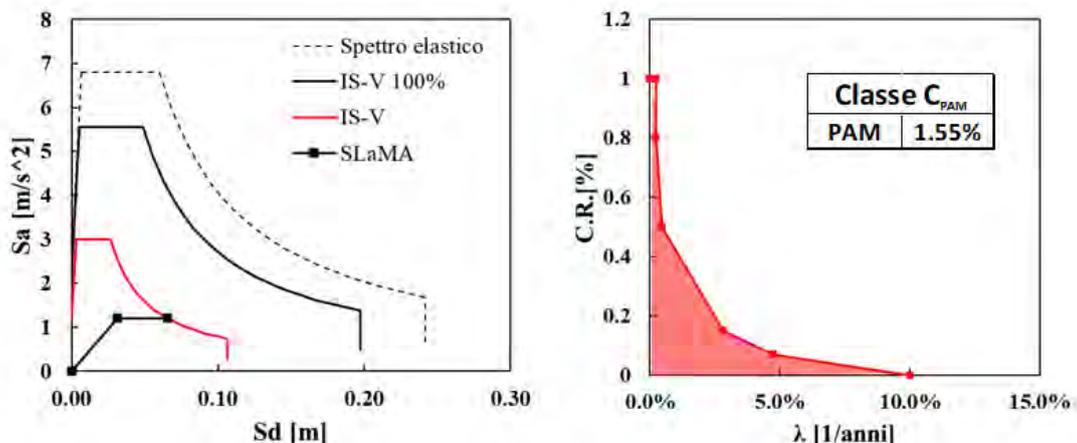


Figura 52. Valutazione dell'Indice di Sicurezza IS-V (sinistra) e dell'Indice PAM (destra)

Il risultato ottenuto è un indice IS-V pari a 54%, a cui corrisponde una Classe  $C_{IS-V}$ , ed un indice PAM è pari a 1.55%, a cui corrisponde una classe  $C_{PAM}$ . L'edificio si colloca quindi in classe di rischio C.

#### 4.3.2 Caso studio 2 - Liceo Classico Pietro Giannone

Il secondo edificio caso studio analizzato è il Liceo Classico Pietro Giannone, sito a San Marco in Lamis in provincia di Foggia. L'edificio scolastico è stato progettato nei primi anni '60 e costruito nell'anno 1964. In Figura 53 è riportata un'immagine dell'edificio ed una schermata del modello realizzato in ambiente BIM.



Figura 53. Immagine dell'edificio caso studio (sinistra) e modello architettonico 3D in ambiente BIM (destra)

L'intera struttura è realizzata in calcestruzzo armato. L'edificio ha una pianta che presenta alcune irregolarità e che nel complesso risulta iscrivibile in un rettangolo di dimensioni 45.6 m x 17.1 m. È costituito da 3 livelli fuori terra con altezza di interpiano costante pari a 3.2 m. La copertura è a falde inclinate con angoli di inclinazione compresi tra 15° e 20°. Per la definizione della geometria si è fatto riferimento ai disegni architettonici disponibili per l'edificio in esame. Si riporta in Figura 54 una pianta architettonica dell'edificio.

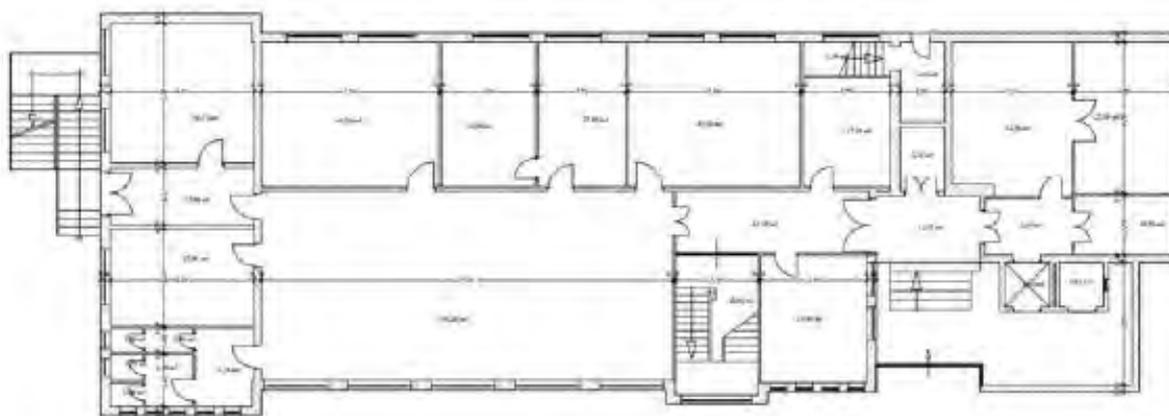


Figura 54. Pianta architettonica dell'edificio caso studio

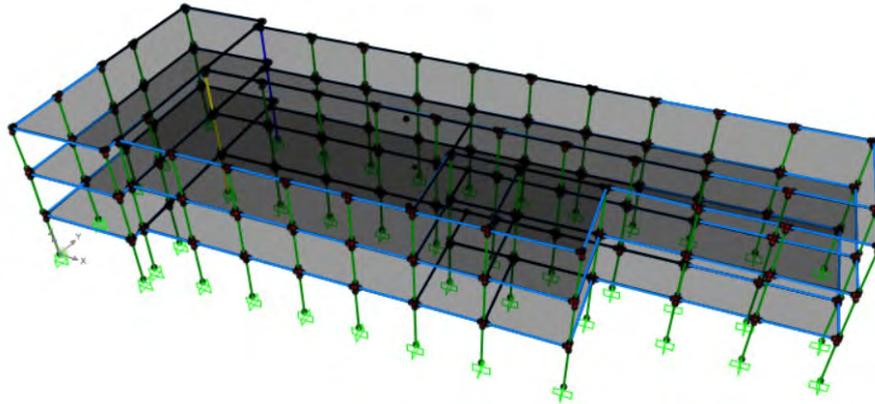
A differenza del primo caso studio, in questo caso non è stato possibile reperire alcun elaborato strutturale né tavole storiche di progetto. È stato pertanto necessario eseguire con un progetto simulato, in accordo con la normativa vigente all'epoca di costruzione dell'edificio, ovvero il Regio Decreto 16/11/1939 n. 2229 [43]. Anche le caratteristiche meccaniche dei materiali, non essendo note, sono state valutate facendo riferimento alla normativa e alle pratiche costruttive tipiche dell'epoca di costruzione dell'edificio (Figura 55).

1. Sezioni semplicemente compresse			2. Sezioni inflesse		
Conglomerato	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{r,28}$ minimo (kg/cm <sup>2</sup> )	Conglomerato	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{r,28}$ minimo (kg/cm <sup>2</sup> )
Conglomerato di cemento idraulico normale (Portland) .....	35	120	Conglomerato di cemento idraulico normale (Portland) .....	40	120
Conglomerato di cemento ad alta resistenza ed alluminoso .....	45	160	Conglomerato di cemento normale ad alta resistenza ed alluminoso .....	50	160
Quando sia eseguita la determinazione preventiva della resistenza cubica a 28 g., e questa venga costantemente controllata durante l'esecuzione del lavoro .....	$\frac{\sigma_{r,28}}{3}$		Quando sia eseguita la determinazione preventiva della resistenza cubica a 28 g., e questa venga costantemente controllata durante l'esecuzione del lavoro .....	$\frac{\sigma_{r,28}}{3}$	
ma non superiore a .....	60	180	ma non superiore a .....	75	225

Figura 55. Estratto del Regio Decreto 16/11/1939 n. 2229 relativo alle caratteristiche meccaniche dei materiali da costruzione [43]

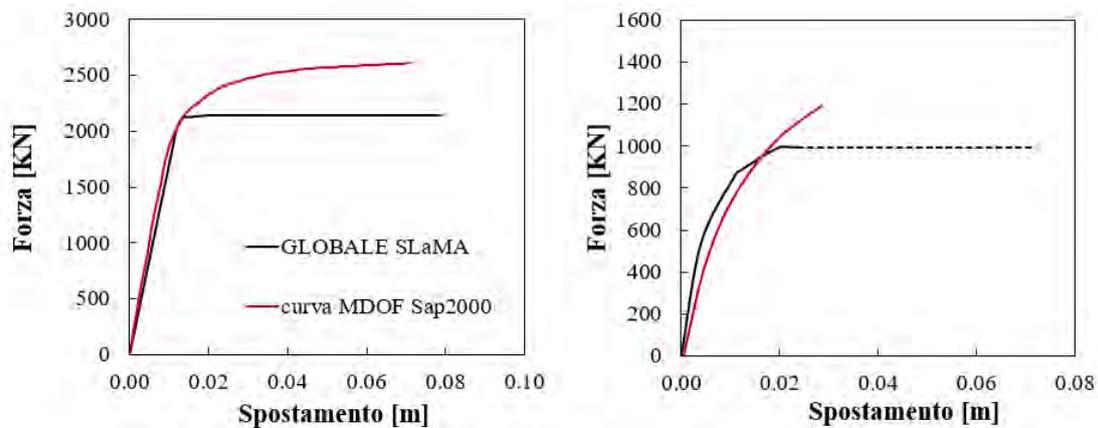
In generale, quindi, si è proceduto con il dimensionamento degli elementi strutturali attraverso una progettazione per soli carichi gravitazionali.

Anche per questo caso studio si è effettuato un confronto tra i risultati ottenuti mediante procedura SLaMA e quelli derivanti da un'analisi statica non-lineare effettuata con il software di calcolo strutturale SAP2000 [41]. In particolare, è stato realizzato un modello tridimensionale (3D) della struttura, di cui si riporta una schermata in Figura 56.



**Figura 56. Modello tridimensionale dell'edificio caso studio realizzato in SAP2000**

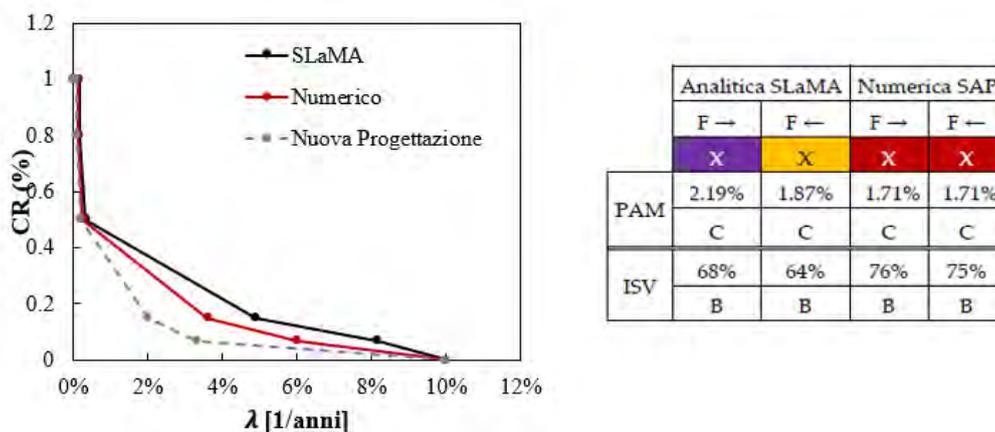
Il confronto tra i risultati ottenuti attraverso l'applicazione della metodologia SLaMA e quelli derivanti dalle analisi numeriche sono riportati in Figura 57.



**Figura 57. Confronto tra la curva di capacità globale ottenuta mediante procedura analitica SLaMA ed analisi numeriche considerando una spinta in direzione longitudinale (sinistra) e trasversale (destra)**

Dal confronto è possibile notare una buona corrispondenza tra le due curve di capacità. La differenza riguardo il valore di taglio alla base che si osserva è riconducibile alla modellazione 3D dell'edificio, che permette nelle analisi numeriche di tenere in conto anche dei contributi degli elementi strutturali fuori dal piano. Nel complesso, i risultati ottenuti testimoniano la validità della procedura SLaMA.

I risultati ottenuti per la valutazione dell'indice PAM e dell'indice IS-V in direzione longitudinale sono riportati in Figura 58.

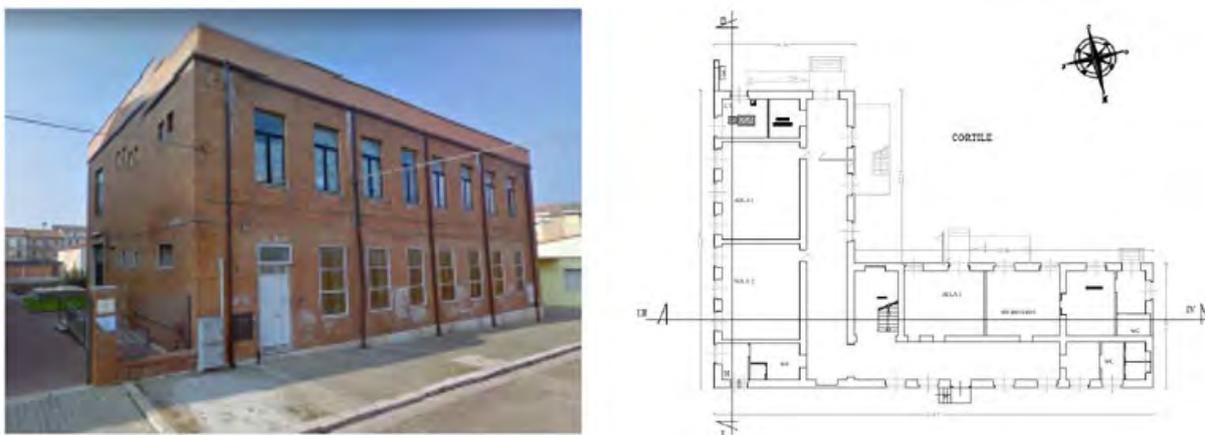


**Figura 58. Valutazione dell'indice PAM (sinistra) e confronto tra indici IS-V e PAM ottenuti considerando i risultati della metodologia SLaMA e delle analisi numeriche**

In questo caso è stato effettuato un confronto tra gli indici PAM ed IS-V ottenuti considerando la metodologia SLaMA e le analisi numeriche (Figura 58 destra). Come è possibile osservare, sebbene ci sia una differenza nel valore assoluto degli indici, la metodologia SLaMA è in grado di identificare la stessa classe IS-V e classe PAM (e dunque la stessa classe di rischio) dell'edificio se confrontata con un'analisi numerica più avanzata. In particolare, per il caso studio è stata identificata una classe di rischio C.

#### 4.3.3 Caso studio 3 – Istituto Fiani-Leccisotti

Il terzo edificio caso studio analizzato è l'Istituto "Fiani-Leccisotti", sito a Serracapriola, in provincia di Foggia. L'edificio è stato progettato e costruito negli anni '60. Si riporta in Figura 59 un'immagine dell'edificio e la pianta architettonica.



**Figura 59. Fotografie dell'edificio caso studio (sinistra) e pianta architettonica (destra)**

Il caso studio è un edificio di due piani, a pianta irregolare ad "L". Dalla documentazione in possesso si è potuto individuare una struttura portante in muratura realizzata in muratura di blocchi di tufo, sulla cui superficie esterna è disposto un rivestimento di mattoni pieni (Figura 60, sinistra). L'orditura dei solai è stata identificata dai risultati di un'indagine termografica (Figura 60, destra).



**Figura 60. Dettaglio della parete di rivestimento in mattoni pieni (sinistra) ed immagine da indagine termografica (destra)**

In accordo con le prescrizioni normative relative ai materiali esistenti, sono state definite le caratteristiche meccaniche della muratura portante, riassunte nella Tabella 7:

**Tabella 7. Caratteristiche meccaniche della muratura portante**

Caratteristiche meccaniche muratura			
Resistenza a compressione media	$f_{cm}$	2.6	MPa
Resistenza a compressione media - orizzontale	$f_{hm}$	2.6	MPa
Resistenza a trazione dei mattoni	$f_{bt}$	1.43	MPa
Coefficiente d'attrito	$\mu$	0.4	-
Modulo elastico	$E_m$	1400	MPa
Modulo di taglio	$G_m$	450	MPa
Resistenza a trazione della muratura	$f_t$	0.15	MPa
Resistenza a taglio iniziale	$f_{v0}$	0.1	MPa

La valutazione della capacità nel piano è stata effettuata applicando la procedura analitica semplificata SLaMA-URM (Sansoni [38]). Sebbene questa procedura non sia stata ancora inserita nel modulo PELL-Seismic, la seguente applicazione ha il solo scopo di illustrare che la procedura SLaMA potrà essere utilizzata in futuro anche nel caso di edifici con struttura portante in muratura.

Anche per questo edificio è disponibile la scheda di vulnerabilità sismica realizzata per il progetto UEFA/ELENA, riportata in Figura 61-62.

<b>SCHEDA DI VULNERABILITÀ SISMICA (I LIVELLO) - EDIFICIO IN MURATURA</b> <i>Informazioni generali sull'edificio e identificazione delle criticità strutturali</i>																																		
Denominazione edificio: IISS Fiani Leccisotti			ID: 57																															
Indirizzo: Via Niccolò Copernico			Città: Serracapriola																															
Anno di costruzione: Anni '60			Anno interventi significativi: /		Provincia: Foggia																													
<b>1. Inquadramento territoriale</b>																																		
<b>2. Geometria (pianta, prospetti)</b>																																		
<b>3. Dettagli costruttivi</b>																																		
<p>Note</p> <p>Indagini videoendoscopiche hanno consentito l'individuazione delle stratigrafie murarie.</p> <p>Indagini termografiche hanno consentito l'individuazione delle tessiture degli orizzontamenti intermedi.</p>																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">4. Dimensioni globali dell'edificio</th> <th rowspan="2">Misurata</th> <th rowspan="2">Stimata</th> <th rowspan="2">5. Dimensioni elementi strutturali</th> <th rowspan="2">Misurata</th> <th rowspan="2">Stimata</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dimensioni in pianta ..... 465 ..... [m<sup>2</sup>]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Strutture verticali ..... 550 ..... [mm]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Altezza edificio ..... 8.00 ..... [m]</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Strutture orizzontali ..... 350 ..... [mm]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Altezza interpiano ..... 3.60 ..... [m]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Copertura ..... 450 ..... [mm]</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>							4. Dimensioni globali dell'edificio	Misurata	Stimata	5. Dimensioni elementi strutturali	Misurata	Stimata					Dimensioni in pianta ..... 465 ..... [m <sup>2</sup> ]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Strutture verticali ..... 550 ..... [mm]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Altezza edificio ..... 8.00 ..... [m]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Strutture orizzontali ..... 350 ..... [mm]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Altezza interpiano ..... 3.60 ..... [m]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Copertura ..... 450 ..... [mm]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4. Dimensioni globali dell'edificio	Misurata	Stimata	5. Dimensioni elementi strutturali	Misurata	Stimata																													
Dimensioni in pianta ..... 465 ..... [m <sup>2</sup> ]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Strutture verticali ..... 550 ..... [mm]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																													
Altezza edificio ..... 8.00 ..... [m]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Strutture orizzontali ..... 350 ..... [mm]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																													
Altezza interpiano ..... 3.60 ..... [m]	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Copertura ..... 450 ..... [mm]	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																													

Figura 61. Scheda di vulnerabilità sismica, parte 1 – Progetto UEFA/ELENA [17]

<b>6. Tipologia strutturale prevalente</b>		<b>Verticale</b>	<b>Orizz. e cop.</b>	<b>Scale</b>
Muratura o Mista		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Calcestruzzo armato		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mista		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Altro.....		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<b>7. Tipologia strutturale</b>				
<b>Verticali</b> (Qualità informazione) <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Muratura di pietra senza legante (a secco)	<input type="checkbox"/>		
	Muratura di pietra sbazzata	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Muratura di pietra massiccia per costruzioni monumentali	<input type="checkbox"/>		
	Muratura di mattoni	<input type="checkbox"/>		
	Muratura rinforzata	<input type="checkbox"/>		
	Mista	<input type="checkbox"/>		
<b>Orizzontali</b> (Qualità informazione) <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		<b>Con catene</b>	<b>Senza catene</b>	
	Legno	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Putrelle e volte o tavelloni	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Laterocemento o solette in c.a.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Volte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Misti (volte – solai)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

<b>Copertura</b> (Qualità informazione) <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>		<b>Non spingente</b>	<b>Poco sping.</b>	<b>Sping.</b>
	Legno	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Laterocemento o solette in c.a.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Volte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Acciaio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Mista	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<b>Scale</b> (Qualità informazione) <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>		<b>Appoggiata</b>	<b>A sbalzo</b>
	Legno	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Muratura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Acciaio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C.a.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

<b>8. Criticità strutturali</b>		<b>SI</b>	<b>NO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>da geometria</b></li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Irregolarità in pianta</li> </ul>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Irregolarità in altezza (anche da presenza di piani sfalsati)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Possibili effetti martellamento</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>dai materiali</b></li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Cattiva qualità muraria (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Assenza di elementi trasversali (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Presenza di fenomeni di disgregazione (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>dai dettagli costruttivi</b></li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Assenza o inefficacia di catene e cordoli (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Assenza o inefficacia di collegamenti (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Presenza di orizzontamenti deformabili (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>dal quadro fessurativo</b></li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Presenza di lesioni (specificare tipo di meccanismo di collasso attivatosi) (Qualità dell'informazione <input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input checked="" type="checkbox"/><input type="checkbox"/>)</li> </ul>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

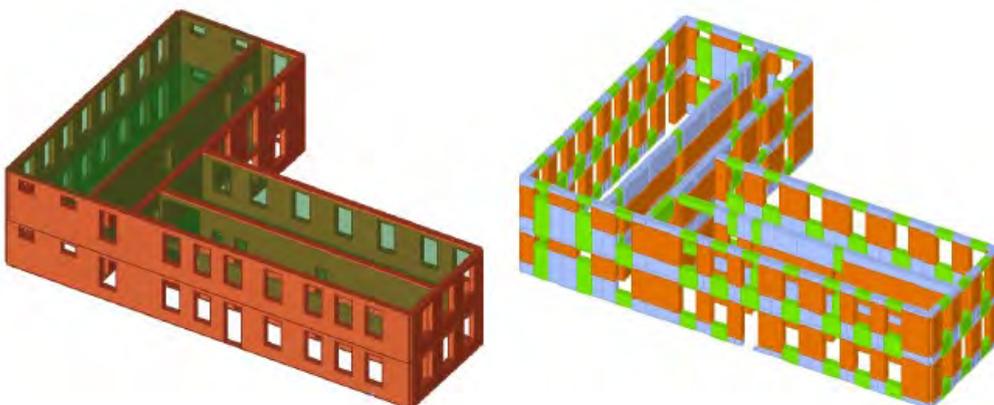
  

<b>9. Ulteriori osservazioni</b>
.....
.....

Figura 62. Scheda di vulnerabilità sismica, parte 2 – Progetto UEFA/ELENA [17]

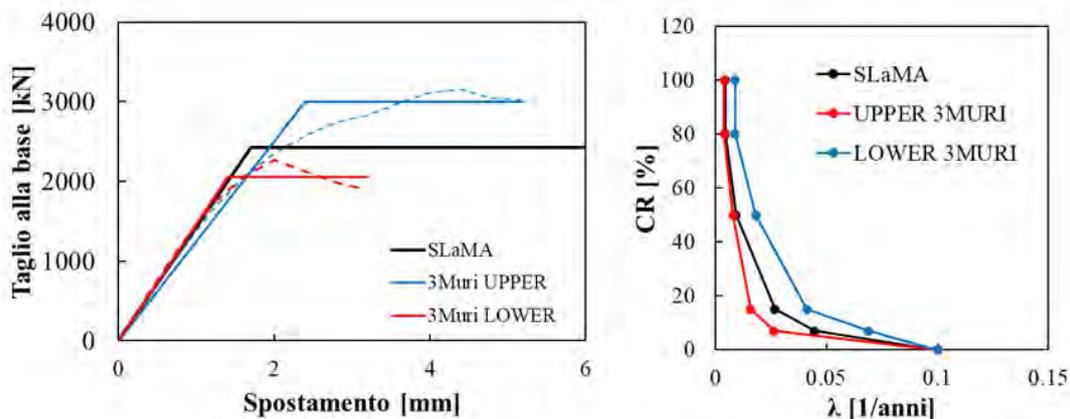
Anche in questo caso è stato effettuato un confronto tra i risultati ottenuti attraverso la procedura SLA-M-URM e quelli derivanti da un'analisi numerica. In particolare, le analisi numeriche sono state effettuate

utilizzando il software strutturale 3Muri (S.T.A. DATA [44]). In Figura 63 si riporta una schermata del modello realizzato.



**Figura 63. Modellazione della struttura in 3Muri**

Il software strutturale 3Muri fornisce, per ogni direzione della spinta, 3 curve di capacità: curva di capacità con eccentricità nulla tra centro di massa e centro di rigidità (1), con eccentricità positiva (2) o negativa (3), in accordo con le normative tecniche. Pertanto, si è scelto di considerare la curva di capacità con maggiore taglio alla base (Upper) e quella con minore taglio alla base (Lower) al fine di considerare un “fuso” per effettuare il confronto con la curva di capacità SLaMA. In Figura 64 è ripotato un confronto tra le curve di capacità SLaMA e numeriche e la relativa curva PAM.



**Figura 64. Confronto di risultati tra metodologia SLaMA e analisi strutturali con software 3Muri in termini di curva di capacità (sinistra) e parametro PAM (destra)**

I risultati riportati in Figura 64 mostrano una buona corrispondenza tra i risultati della metodologia SLaMA e quelli dell’analisi numerica effettuata con il software 3Muri. Inoltre, la percentuale di perdita annua media (PAM) ottenuta considerando la curva di capacità SLaMA rappresenta un valor medio rispetto ai risultati ottenuti con il software 3Muri.

#### 4.4 Valutazioni di vulnerabilità e soluzioni di interventi sismo-energetici integrati

L’integrazione del modulo “Risposta Sismica” all’interno della piattaforma PELL rappresenta una importante opportunità per un piano di intervento di riabilitazione globale dello stock di edifici a livello nazionale, come investimento a lungo termine per l’intero Paese. Tuttavia, al momento, in assenza di linee guida tecniche ad hoc per una valutazione integrata della vulnerabilità sismico-energetica e lo sviluppo di soluzioni tecnologiche per il miglioramento sia dell’efficientamento energetico sia delle capacità strutturali statiche e sismiche, le riqualificazioni architettoniche, energetiche e sismiche vengono spesso eseguite in modo indipendente, combinando al più le riqualificazioni architettoniche ed in parte energetiche.

Eppure, un intervento integrato di riqualificazione architettonica-energetica e sismica potrebbe comportare costi significativamente inferiori rispetto alla somma dei due interventi realizzati separatamente. Ancor più importante, tenendo conto degli incentivi fiscali introdotti dall'Eco-Bonus e dal Sisma-Bonus, un intervento integrato sismico-energetico potrebbe risultare di fatto comparabile, se non di poco superiore, in termini di costi rispetto ad un singolo intervento sismico e/o energetico, con ovvi vantaggi da un punto di vista dei risultati finali ottenuti in termini sia di miglioramento della sicurezza sia di riduzione delle perdite economiche e di investimento [8].

In questo paragrafo viene dunque descritta in modo qualitativo la possibilità di applicazione della procedura SLaMA per valutazioni di stime integrate delle perdite economiche (componente sismica ed energetica), in accordo con i più recenti sviluppi a livello internazionale. Vengono inoltre presentate possibili soluzioni d'intervento sismico-energetico integrato.

Al fine di ottenere una classificazione "di rischio" univoca per la prestazione sismico-energetica di un edificio, è necessario tenere in conto in modo integrato sia della perdita economica legata all'avvenimento di un evento sismico nell'arco della vita utile della struttura, sia alla spesa (diretta in bolletta) legata consumo energetico per il riscaldamento (e, se presente, raffrescamento) dell'edificio. Tra gli indicatori presenti in letteratura, si pone particolare attenzione in questo paragrafo all'indice GRI (Green and Resilient Indicator), introdotto da Calvi et al. [45]. Questo indice si basa sui valori di Expected Annual Losses (EAL, equivalente della PAM) relativi alla parte energetica ( $EAL_E$ ) ed alla parte sismica ( $EAL_S$ ). Per la parte sismica, è possibile fare riferimento in maniera semplificata all'indice PAM, in accordo con il DM 65 2017[10] (descritto nel paragrafo 4.2). Diversamente, la classificazione energetica secondo l'approccio da normativa si basa sull'individuazione dell'indice di prestazione globale ( $EP_g$ ). La  $EAL_E$  deve essere quindi ricavata moltiplicando questo indice per il costo di 1kWh (EUC) e normalizzando il risultato al Costo di Ricostruzione (RC) dell'edificio (Figura 65, sinistra). Note le due componenti economiche, è possibile identificare la classe GRI dell'edificio ed identificare una classe GRI univoca (Figura 65, destra):

$$EAL_E = \frac{EP_{\tau o} \left[ kWh/m^2 \right] \times EUC \left[ \text{€}/kWh \right]}{RC \left[ \text{€}/m^2 \right]}$$

GRI Classification (Green and Resilient Indicators)	$EAL_E$ or $EAL_S$ (%)
 A+	$EAL < 0.50$
 A	$0.50 < EAL < 0.75$
 B	$0.75 < EAL < 1.50$
 C	$1.50 < EAL < 2.50$
 D	$2.50 < EAL < 3.50$
 E	$3.50 < EAL < 4.50$
 F	$4.50 < EAL < 7.50$

Figura 65. Formula per il calcolo della  $EAL_E$  (sinistra) e tabella per la classificazione del Green and Resilient Indicator (GRI)

La procedura SLaMA-School potrà quindi supportare la classificazione univoca di prestazione sismo-energetica dell'edificio, permettendo la valutazione dell'indice PAM tramite gli approcci previsti dall'attua normativa tecnica.

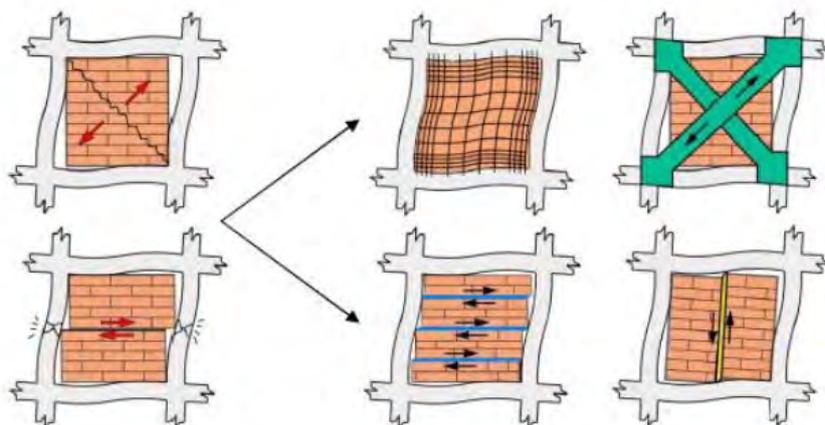
Passando agli interventi di riqualificazione integrata, è in generale evidente che la prestazione sismica degli elementi non-strutturali di facciata assume un ruolo di primario interesse per la salvaguardia/protezione di (e dunque dell'investimento legato a) interventi di efficientamento energetico, quali l'isolamento termico esterno "a cappotto" (o isolamento interno su tamponature perimetrali esistenti), e/o la sostituzione degli infissi. Tuttavia, è noto che componenti non-strutturali sono gli elementi più vulnerabili in presenza di azione sismica, anche di moderata intensità. Risulta infatti evidente dalle ispezioni post-terremoto la presenza di edifici che riportano danni alle sole componenti non-strutturali, quali tramezzi, coperture, controsoffitti e tamponature, spesso senza aver danneggiato o compromesso il sistema strutturale (scheletro) sismo-resistente (Figura 66).



**Figura 66. Esempio di danneggiamento di elementi non-strutturali (facciate, partizioni, controsoffitti) a seguito dei terremoti di L’Aquila 2009 e Christchurch 2011 (Nuova Zelanda) (Christchurch: Baird et al. [46], Dhakal et al. 2016 [47]; L’Aquila: De Sortis et al. [48])**

Dunque, in accordo con una progettazione di tipo prestazionale, il materiale/elemento isolante dovrebbe essere adeguatamente protetto dalle azioni sismiche, imponendo un livello di danno trascurabile o comunque molto limitato agli Stati Limite di Esercizio (SLO ancor più che SLD).

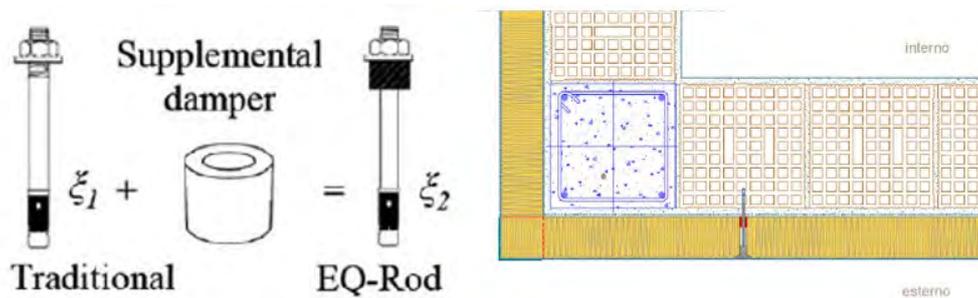
È quindi evidente che il primo passo da compiere per realizzare un intervento di riqualificazione integrato sismico-energetico deve essere mirato a salvaguardare l’integrità delle componenti non-strutturali dell’edificio, con particolare attenzione nei confronti delle tamponature. Con particolare riferimento proprio alle tamponature, le strategie d’intervento più utilizzate per questi elementi prevedono o il loro rinforzo sismico o la loro disconnessione con il telaio circostante (Figura 67)



**Figura 67. Strategie e tecniche d’intervento di miglioramento sismico per la tamponatura mirate alla disconnessione o all’integrazione della parte di riempimento (Di Vece e Pampanin [49])**

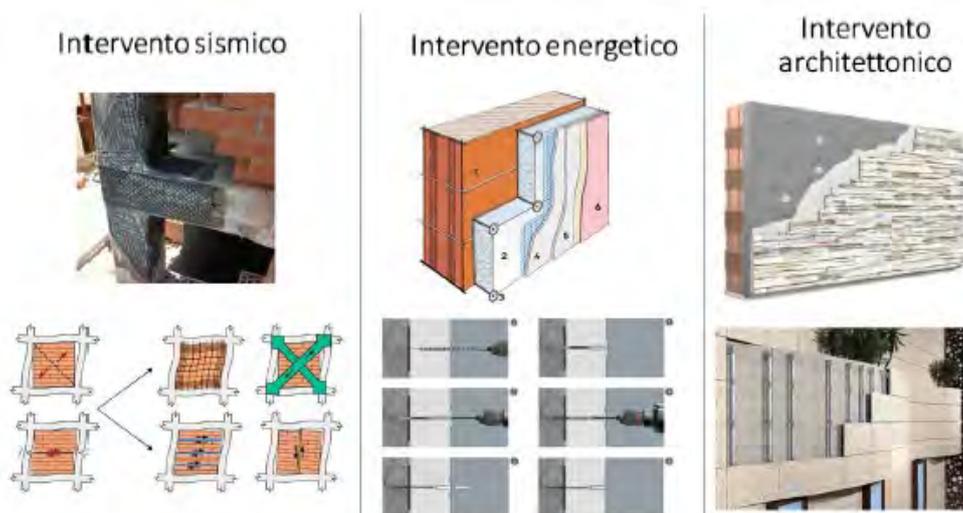
La salvaguardia dell’intervento energetico può essere garantita introducendo opportuni dettagli costruttivi, in grado di assorbire gli spostamenti-deformazioni relativi se non ridurle con meccanismi dissipativi concentrati e di rendere l’intervento rimovibile e sostituibile. Tra questi si evidenzia la possibilità di utilizzare ancoranti dissipativi tipo EQ-Rod (Quintana-Gallo et al. [50]) al fine di proteggere l’intervento architettonico,

come ad esempio un cappotto/facciata a doppia pelle, applicando i principi dell'isolamento sismico e della dissipazione dell'energia (Figura 68).



**Figura 68. Proposta di dettaglio costruttivo per tassello con anello in gomma in analogia con la soluzione EQ-Rod [50]**

In aggiunta, la realizzazione di un intervento energetico quale l'isolamento termico esterno a cappotto rappresenta di per sé una possibile soluzione di riqualificazione architettonica. Infatti, la scelta di un adeguato strato di finitura o la possibilità di realizzazione di un rivestimento della facciata a doppia pelle può rappresentare un'interessante proposta architettonica in grado di dare una nuova vita all'edificio esistente (Figura 69).



**Figura 69. Schematizzazione di intervento sismico, energetico ed architettonico integrato**

In conclusione, si evidenzia come la scelta di un intervento sismo-energetico ed architettonico integrato non comporti uno stravolgimento delle pratiche costruttive odierne, ma al contrario sia perseguibile mediante semplici accorgimenti a livello di dettagli costruttivi. I vantaggi derivanti da questo tipo di intervento sono molteplici, in quanto una riqualificazione integrata permette, da un lato, di ridurre i consumi di energia dell'edificio con conseguente ritorno economico traducibile in un risparmio nelle bollette, dall'altro lato, la salvaguardia delle componenti non strutturali nei confronti degli eventi sismici, rendendo il tempo di ritorno dell'investimento realmente perseguibile, il tutto accompagnato da una possibilità di riqualificazione architettonica, in grado di fornire all'edificio esistente una nuova veste in chiave moderna.

## 5 PROCEDURA SLaMA-SCHOOL

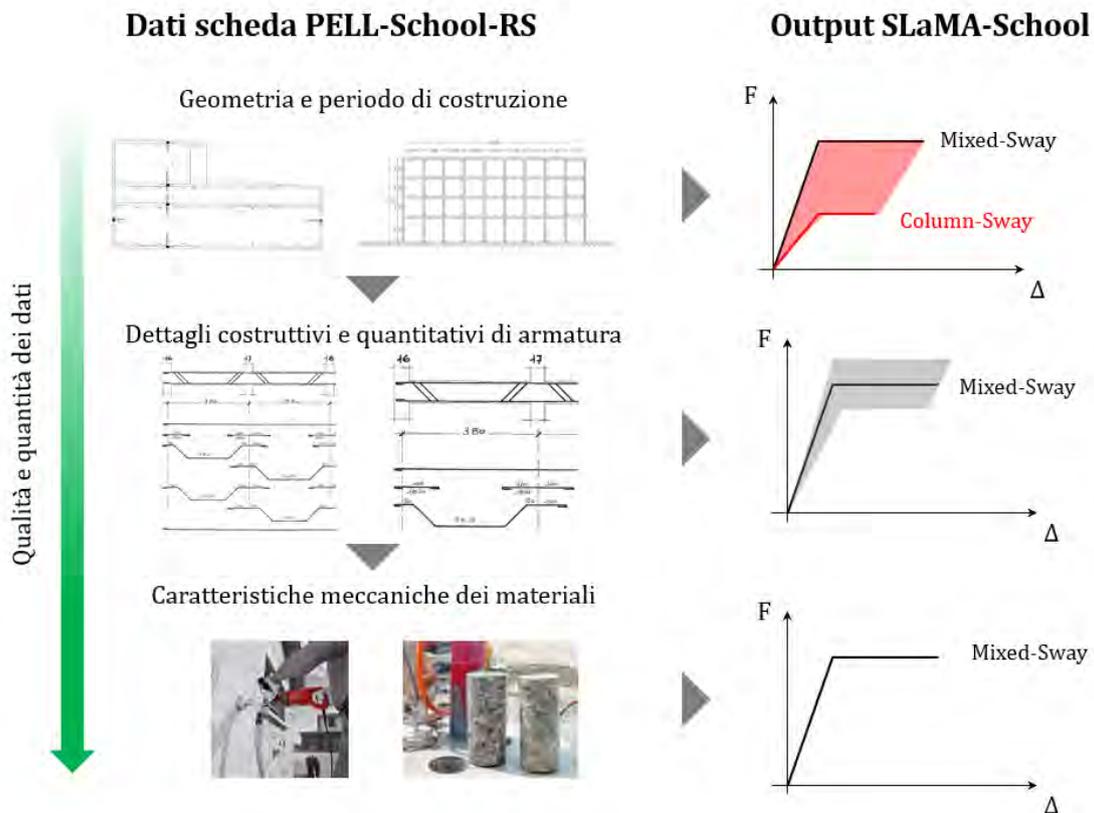
In questo capitolo viene presentata la procedura SLaMA-School ed una sua applicazione illustrativa ad un edificio caso studio. Attraverso un collegamento diretto con la scheda di acquisizione dati PELL-School-RS, la procedura SLaMA-School consentirà di ottenere una valutazione preliminare della classe di rischio sismico della struttura, identificata da un range di valori attesi per l'indice IS-V e PAM [10] in funzione della qualità e quantità dei dati raccolti. Attraverso lo sviluppo di uno specifico codice di calcolo è infatti possibile applicare la procedura analitico-meccanica SLaMA considerando differenti possibili scenari per la struttura in esame, al fine di tenere in conto le incertezze derivanti dal mancato o parziale inserimento di dati su materiali e dettagli costruttivi. Il risultato finale della procedura verrà quindi fornito sotto forma di range di valori attesi, plausibili ed eccezionali per i parametri IS-V e PAM (descritti precedentemente nel paragrafo 4.2). In questo modo è possibile identificare un range di classi di rischio sismico attese anche nel caso di acquisizione dati parziale, e supportare dunque la definizione di una scala di priorità d'intervento per un piano di riqualificazione sismica a livello nazionale, identificando gli edifici più a rischio e che richiedono una valutazione di vulnerabilità sismica più dettagliata e conseguenti interventi di riabilitazione strutturale.

In questo paragrafo in una prima fase viene presentata e descritta la metodologia SLaMA-School, illustrandone i passaggi fondamentali e gli output significativi. In seguito, viene presentata una sua applicazione ad un edificio caso studio. In particolare, per il caso studio in esame sono stati simulati differenti scenari di acquisizione dati ed è stata applicata la metodologia SLaMA tenendo conto delle incertezze relative a ciascuno scenario. È importante ricordare che il risultato della procedura SLaMA-School va considerato come preliminare anche nel caso in cui si è in possesso di tutti i dati necessari per un'analisi di vulnerabilità sismica, in quanto la procedura deve essere di supporto a (e non sostitutiva di) una valutazione più raffinata della prestazione sismica eseguita con analisi numeriche.

### 5.1 Metodologia

La procedura SLaMA-School ha come obiettivo quello di eseguire un'analisi di vulnerabilità sismica a diversi livelli di conoscenza attraverso un approccio analitico-meccanico semplificato. Sfruttando le informazioni acquisite tramite la scheda del modulo PELL-School-RS, sarà possibile identificare in maniera preliminare la curva di capacità della struttura più probabile con i rispettivi limiti inferiori e superiori. In particolare, verranno effettuate alcune ipotesi (generalmente a favore di sicurezza) con l'obiettivo di determinare un range di valutazione di vulnerabilità, con indicazione aggiuntiva dei limiti inferiori e superiori. Infine, tramite un confronto tra capacità e domanda verranno valutati i parametri IS-V e PAM e quindi la classe di rischio sismico della struttura corrispondente.

L'idea alla base della metodologia è illustrata in Figura 70.



**Figura 70. Illustrazione grafica della metodologia SLAMA-School**

Come mostrato in Figura 70, l'output della procedura SLAMA-School viene fornito sotto forma di "fuso" (range), in funzione della quantità e qualità dei dati forniti. In tutti i casi verranno sempre forniti i limiti superiori ed inferiori di capacità dell'edificio, rappresentati rispettivamente dal meccanismo di Beam-Sway (formazione di tutte le cerniere plastiche, CP, nelle travi) e di Column-Sway (piano debole/soffice o soft-storey).

In linea generale, il requisito minimo per poter applicare la procedura consiste nel conoscere la geometria dell'edificio ed il periodo di costruzione. Questi dati possono essere ottenuti a partire da disegni architettonici, sopralluoghi e rilievi e documentazione originale di progetto, nonché immagini satellitari (i.e. anche a livello semplificato di Google Street/droni). Inoltre, le normative dell'epoca di costruzione fornivano dei valori minimi e massimi per le aree sezionali degli elementi strutturali. Qualora non siano note le caratteristiche meccaniche dei materiali, i dettagli costruttivi e quantitativi di armatura degli elementi strutturali, al fine di ottenere una curva di capacità della struttura è necessario eseguire un progetto simulato, in accordo con la normativa e pratica costruttiva dell'epoca. L'informazione del periodo di progettazione e costruzione risulta di fondamentale interesse, dunque, per identificare la normativa o manuali di riferimento per il progetto simulato, nonché per avere una prima idea delle principali criticità strutturali attese. Si riporta a titolo d'esempio in Figura 71 l'evoluzione storica delle normative tecniche, con particolare riferimento all'evoluzione delle prescrizioni per la progettazione in zona sismica; in Tabella 8 si riporta invece l'evoluzione delle prescrizioni per la tipologia di calcestruzzo nelle differenti normative storiche.

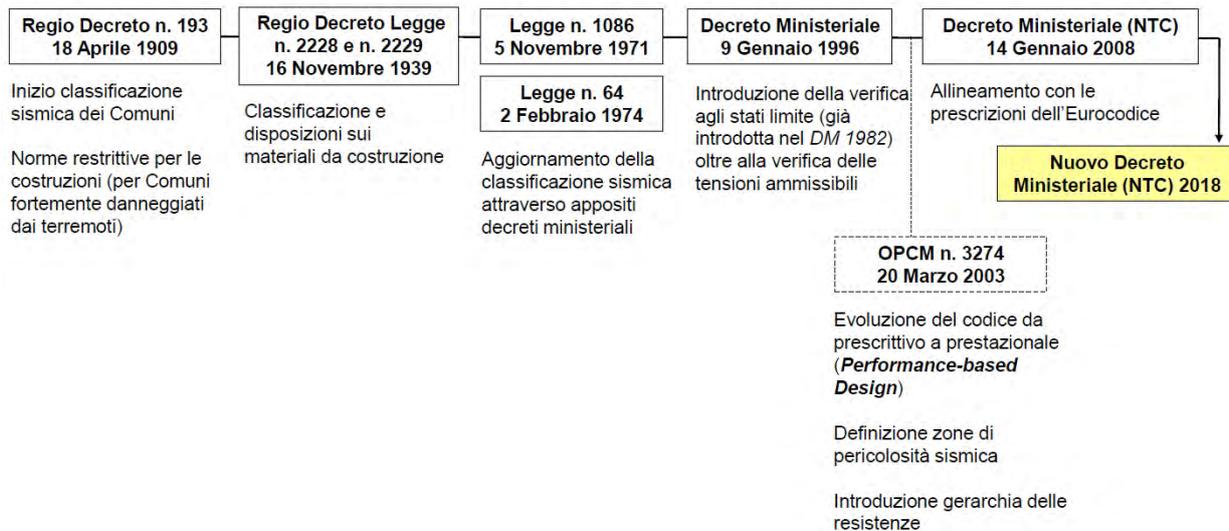


Figura 71. Evoluzione delle normative tecniche

Tabella 8. Evoluzione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo

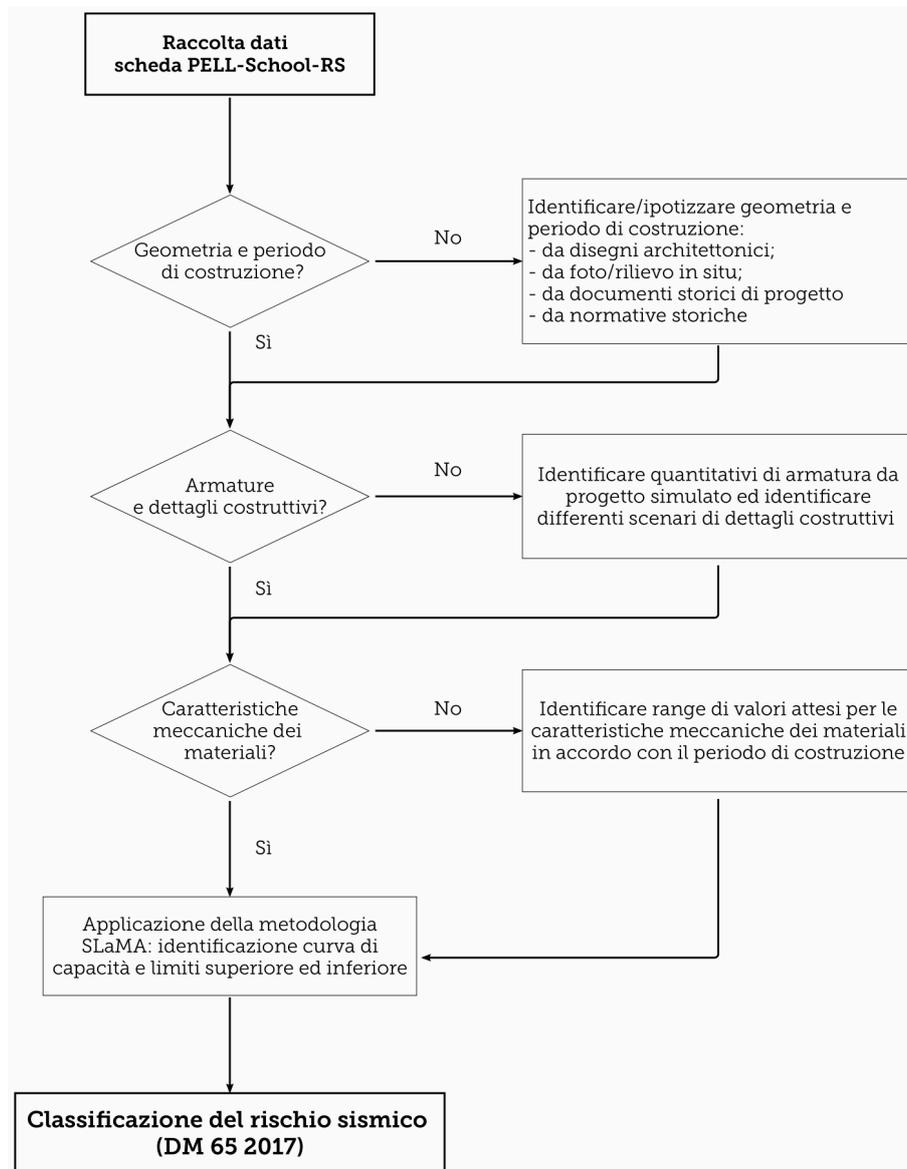
R.D.2229 16/11/1939	D.M. 30/05/1972	D.M. 27/07/1985	OPCM 20/03/2003	D.M. 14/01/2008
Tipologia calcestruzzo: Normale ( $\geq 120 \text{ kg/cm}^2$ ) e Alta Resistenza ( $\geq 160 \text{ kg/cm}^2$ )	Tipologia calcestruzzo: 150, 200, 250, 300, 400, 500	Tipologia calcestruzzo: minimo 150	Tipologia calcestruzzo: minimo C20/25	Tipologia calcestruzzo: da C20/25 a C90/105
Valori medi di resistenza a compressione ( $\sigma_{r,28}$ )	Valori caratteristici di resistenza a compressione ( $R'_{bk}$ )	Valori caratteristici di resistenza a compressione ( $R'_{bk}$ )	Valori caratteristici di resistenza a compressione ( $f_{ck}$ e $R_{ck}$ )	Valori caratteristici di resistenza a compressione ( $f_{ck}$ e $R_{ck}$ )
Formulazioni per i valori ammissibili di tensione a compressione, trazione, flessione, flessione-compressione e taglio	Formulazioni per i valori ammissibili di tensione a compressione, trazione, flessione, flessione-compressione e taglio	Formulazioni per i valori ammissibili di tensione a compressione, trazione, flessione, flessione-compressione e taglio		Formulazione dei valori caratteristici, medi e di progetto per le resistenze a compressione e trazione

Una volta effettuato il progetto simulato, applicando la procedura SLaMA è quindi possibile ottenere la curva di capacità della struttura ed i limiti superiore ed inferiore. In questo scenario specifico di acquisizione dati, in assenza di ulteriore documentazione, viene suggerito, a scopo precauzionale, di individuare come range di capacità atteso quello compreso tra la curva inferiore (Column-Sway) e la curva di capacità della struttura (Mixed-Sway), indicando come valori eccezionali quelli compresi tra la curva di Mixed-Sway e Beam-Sway.

Qualora si disponesse anche dei disegni strutturali storici di progetto e/o di indagini in situ sul quantitativo di armatura e sui dettagli costruttivi, sarà possibile modificare e restringere ulteriormente il range/fuso di capacità. In questo caso, la valutazione della curva di capacità viene effettuata al variare delle caratteristiche meccaniche dei materiali, individuando dei valori medi e di dispersione in accordo con il periodo di costruzione e con quanto indicato nella più rilevante letteratura scientifica. È così possibile ottenere una curva di capacità “fuso”, in funzione dei valori di resistenza dei materiali considerando le incertezze. Viene in aggiunta riportata anche l’indicazione relativa al meccanismo di Column-Sway e Beam-Sway, al fine di identificare range di valori plausibili ed eccezionali di prestazione. Discorso analogo è applicabile al caso in cui si possiedono informazioni riguardanti le caratteristiche meccaniche dei materiali e non si conoscano i dettagli costruttivi della struttura.

Infine, nel caso siano forniti tutti i dati necessari per effettuare una valutazione di vulnerabilità sismica, la procedura fornisce come output le curve di capacità dell’edificio, in maniera deterministica in accordo con l’attuale normativa tecnica, a supporto di una valutazione futura più accurata tramite analisi numeriche.

In Figura 72 si riporta il diagramma di flusso della metodologia SLaMA-School, che riassume i passaggi principali della procedura in funzione dell'acquisizione dati.



**Figura 72. Digramma di flusso della metodologia SLaMA-School**

Infine, le criticità strutturali riscontrate/attese, riportate nella scheda di acquisizione dati, potranno essere utilizzate per applicare dei fattori riduttivi alla capacità della struttura (aumentandone dunque la vulnerabilità) o per modificare la scelta del meccanismo inelastico più probabile nel range “fuso” individuato tramite l’approccio analitico-meccanico. A titolo di esempio, se nella scheda di raccolta dati venisse indicata come criticità strutturale la possibile presenza di un meccanismo di piano debole/soffice (ad esempio a causa della interazione negativa con le tamponature, per la presenza di un piano pilotis e/o per una generale assenza di principi di gerarchia delle resistenze) la curva di capacità attesa sarebbe maggiormente prossima a quella del meccanismo di Column-Sway.

Nel paragrafo successivo viene riportato un esempio di applicazione della procedura SLaMA-School per un edificio caso studio. In particolare, l’edificio è stato selezionato tra una serie di edifici casi studio situati nel comune di Sora in provincia di Frosinone, di cui è stato fornito del materiale strutturale parziale per il progetto PELL.

## 5.2 Edificio caso studio e scenari di acquisizione dati

L'edificio caso studio considerato è la Scuola Elementare Materna "Achille Lauri", edificio scolastico sito a Sora in provincia di Frosinone. Il complesso scolastico è formato da più corpi di fabbrica, realizzati in epoche successive. In Figura 73 viene riportata una facciata dell'edificio e il suo inquadramento territoriale.



Figura 73. Facciata (sinistra) ed inquadramento territoriale (destra) dell'edificio caso studio

In Figura 74 si mostra la locazione del comune di Sora sul territorio nazionale e regionale, con particolare riferimento alla mappa di pericolosità sismica fornita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

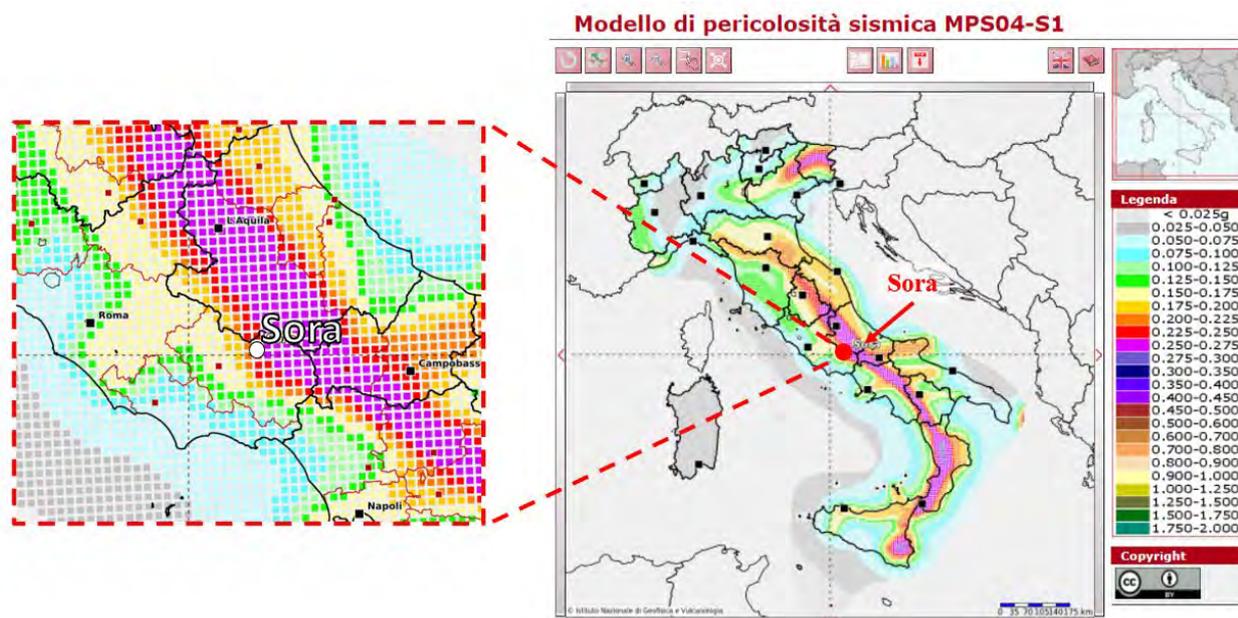
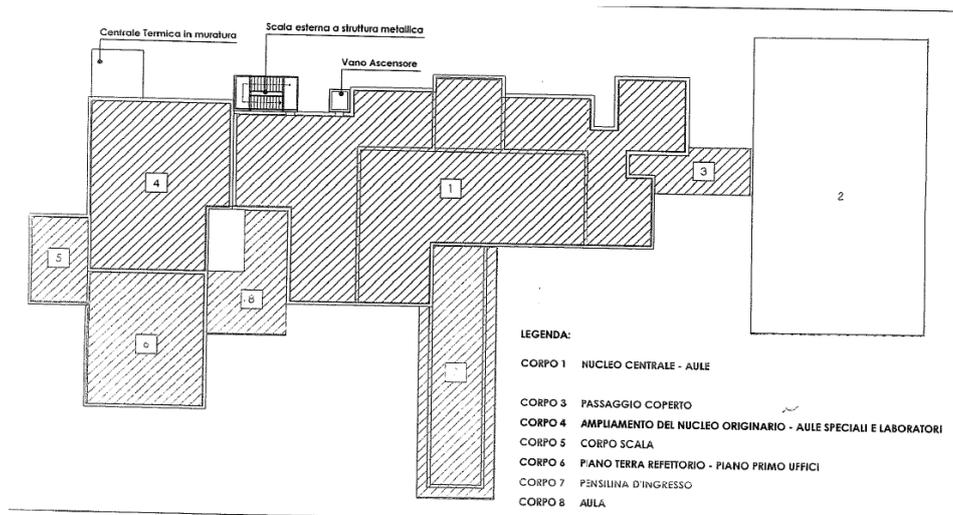


Figura 74. Mappa sismica e locazione del comune di Sora (INGV: <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

Come è possibile osservare dalla Figura 74, il comune di Sora si trova in una zona ad elevata sismicità, caratterizzata da accelerazioni di picco al suolo (PGA) per un evento con probabilità di superamento del 10% in 50 anni comprese in range di 0.225-0.250 g.

I diversi manufatti sono provvisti di giunti tecnici, che permettono di considerare ognuno di essi come struttura a sé stante. Più precisamente, il complesso è formato da 8 manufatti in C.A. Si riporta in Figura 75 uno schema grafico che mette in evidenza la forma e la composizione del complesso scolastico.



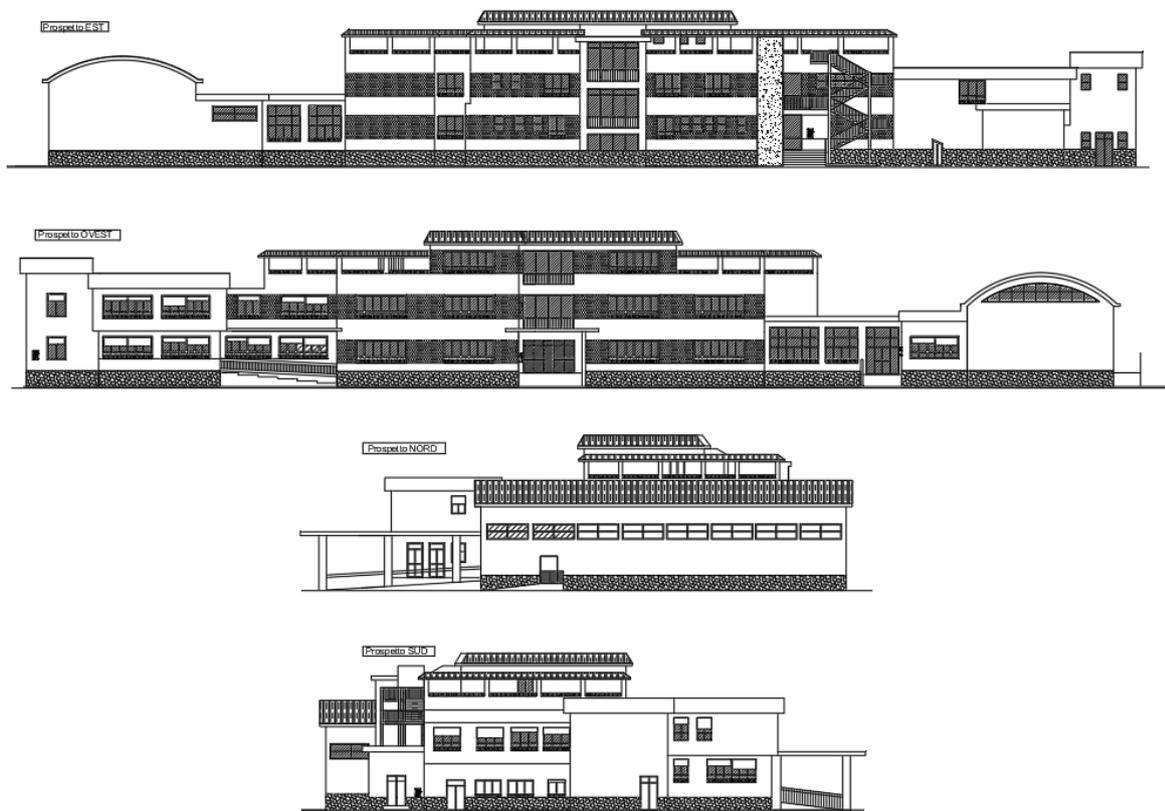
**Figura 75. Forma e composizione del complesso scolastico**

L'intero complesso è stato progettato e realizzato in un periodo compreso tra il 1966 ed il 1985, ricordando che le diverse unità strutturali sono state progettate in periodi differenti. Il numero di piani varia da un minimo di 1 ad un massimo di 3 piani e la pianta del complesso è inscritta in un rettangolo di dimensioni 40 x 84 m. L'altezza massima dell'edificio è di circa 10.9 m.

Tra i documenti forniti sono presenti dei disegni architettonici digitali, contenenti piante, sezioni e prospetti del complesso scolastico (Figura 76 – 77). Tra i documenti forniti sono inoltre presenti le schede PdCM di Livello 1 e 2 compilate per ogni unità strutturale.



**Figura 76. Pianta edificio caso studio**



**Figura 77. Prospetti edificio caso studio**

A titolo di esempio, si è scelto analizzare il corpo 4 (vedi Figura 75), ricordando che la procedura è applicabile ad unità strutturali. Questo corpo è stato progettato nel 1980 e realizzato nel 1981; è composto di 2 piani fuori terra con altezza media d'interpiano di 3 m ed una superficie media di piano di 185 mq. La struttura del corpo è formata da telai in calcestruzzo armato in due direzioni e risulta regolare in pianta ed in elevazione. La copertura è di tipo non spingente pesante e sono presenti travi rovesce in fondazione.

Con riferimento alla scheda di acquisizione dati realizzata per il modulo PELL-School-RS, sono stati simulati 4 differenti scenari di acquisizione dati, a livello di conoscenza crescente:

- **Scenario 1:** Nella scheda vengono riportati i soli dati relativi alla geometria della struttura (numero di piani, superficie media di piano, altezza d'interpiano, numero e lunghezza delle campate in direzione trasversale ed ortogonale, altezza e larghezza media di travi e pilastri) ed al periodo di costruzione. Sono assenti i dati relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali, quantitativi di armatura e dettagli costruttivi.
- **Scenario 2:** Nella scheda sono presenti tutti i dati riportati nello scenario 1 con l'aggiunta dei dati relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali da costruzione. Sono assenti i dati relativi ai quantitativi di armatura e dettagli costruttivi;
- **Scenario 3:** Nella scheda sono presenti tutti i dati riportati nello scenario 1, con l'aggiunta dei dati relativi ai quantitativi di armatura e dettagli costruttivi. Sono assenti le caratteristiche meccaniche dei materiali;
- **Scenario 4:** Nella scheda sono riportati tutti i dati necessari per eseguire un'analisi di vulnerabilità sismica (geometria, materiali, quantitativi di armatura e dettagli costruttivi).

I 4 scenari di acquisizione dati vengono mostrati in modo schematico in Figura 78.

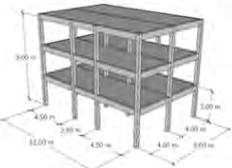
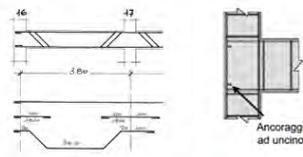
Scenari di acquisizione dati	Geometria e periodo di costruzione 	Dettagli costruttivi e quantitativi di armatura 	Caratteristiche meccaniche dei materiali 
Scenario 1	✓ Dato acquisito	✗ Dato NON acquisito	✗ Dato NON acquisito
Scenario 2	✓ Dato acquisito	✗ Dato NON acquisito	✓ Dato acquisito
Scenario 3	✓ Dato acquisito	✓ Dato acquisito	✗ Dato NON acquisito
Scenario 4	✓ Dato acquisito	✓ Dato acquisito	✓ Dato acquisito

Figura 78. Illustrazione schematica dei differenti scenari di acquisizione dati considerati

Il reale stato di acquisizione del materiale per l'edificio scolastico caso studio corrisponde allo scenario 2. È importante evidenziare, dunque, che per il caso studio non si è in possesso di dati sufficienti a soddisfare i requisiti dello scenario 3 e 4 (non sono presenti tavole storiche di progetto o indagini in situ sui quantitativi di armatura e dettagli costruttivi). Tuttavia, si è scelto di simulare in ogni caso anche questi scenari di acquisizione, a titolo esclusivamente illustrativo, al fine di esporre nella sua completezza la metodologia SLAMA-School.

È bene evidenziare infine che gli scenari 2 e 3 risultano avere un livello raccolta dati analogo (ovvero parziale) e compreso tra il livello minimo (scenario 1) e massimo (scenario 4). La numerazione degli scenari, dunque, **non** è da intendersi come un ordine crescente di qualità di raccolta dati.

### 5.2.1 Scenario di acquisizione dati n° 1

Nel primo scenario di acquisizione dati sono noti la sola geometria e periodo di progettazione/realizzazione della struttura. I dati dimensionali, relativi al solo corpo 4 ed inseribili nella scheda PELL-School-RS, vengono di seguito elencati:

- **Periodo di progettazione / costruzione:** 1980 / 1981
- **Numero di piani:** 2
- **Superficie media di piano:** 185 mq
- **Altezza media d'interpiano:** 3 m
- **Numero di campate direzione longitudinale:** 3
- **Numero di campate direzione trasversale:** 3
- **Lunghezza media campate in direzione longitudinale:** 5m
- **Lunghezza media campate in direzione trasversale:** 5m
- **Altezza media della sezione delle travi:** 60 cm
- **Larghezza media della sezione delle travi:** 40 cm
- **Altezza media della sezione dei pilastri:** 40 cm
- **Larghezza media della sezione dei pilastri:** 40 cm

Come precedentemente riportato, il primo passo da compiere in assenza di dati sul quantitativo di armatura negli elementi strutturali consiste nell'effettuare un progetto simulato. Dal momento che l'edificio è stato progettato nel 1980, le principali normative di riferimento per il progetto simulato sono:

- Legge n. 64 del 2/02/1974 [25] e D.M. del 3/3/1975 [51]
- D.M. 16/06/1976 [52]
- D.M. del 3/10/78 [53]

L'informazione relativa al periodo di progettazione risulta di fondamentale importanza per una prima valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio. In particolare, il D.M. 3/3/1975, primo decreto attuativo della Legge 64/1974, ha introdotto per la prima volta dei requisiti di verifica per le costruzioni in zona sismica. Pertanto, l'edificio in esame è stato progettato considerando la presenza di azioni orizzontali; tuttavia, la normativa dell'epoca non prevedeva la progettazione in capacità, e tipicamente i dettagli costruttivi tipici degli edifici in quegli anni risultano inadeguati.

I carichi agenti sulla struttura sono stati determinati in accordo con il D.M. del 3/10/1978. In particolare, per l'edificio in esame si è considerato un peso degli elementi strutturali in C.A. pari a 25 kN/mc, un carico antropico di 350 Kg/mq ed un carico da neve di 60 Kg/mq.

Il D.M. del 3/3/1975 prevedeva che la risultante delle forze orizzontali fosse calcolata in funzione del coefficiente d'intensità sismica  $C$  (funzione del grado di sismicità  $S$ , in accordo con la classificazione sismica dell'epoca), del coefficiente di risposta sismica  $R$  e del peso complessivo delle masse strutturali  $W$ . Nel caso specifico, il taglio alla base valutato da progetto simulato è risultato pari ad un 10% del peso complessivo delle masse strutturali. Le azioni sismiche verticali invece non venivano di norma considerate, ad eccezione di casi particolari come luci superiori ai 20 m o strutture di tipo spingente e sbalzi.

Nel D.M. del 16/06/1976 sono riportate le norme tecniche per l'esecuzione delle opere in calcestruzzo armato normale e precompresso e per le strutture metalliche. Le verifiche di resistenza degli elementi strutturali venivano effettuate utilizzando l'approccio delle tensioni ammissibili. È tuttavia importante evidenziare che il documento già all'epoca permetteva anche la verifica tramite l'approccio agli stati limite, ma essendo questo approccio alternativo al metodo delle tensioni ammissibili e non obbligatorio, non veniva usato nella pratica professionale.

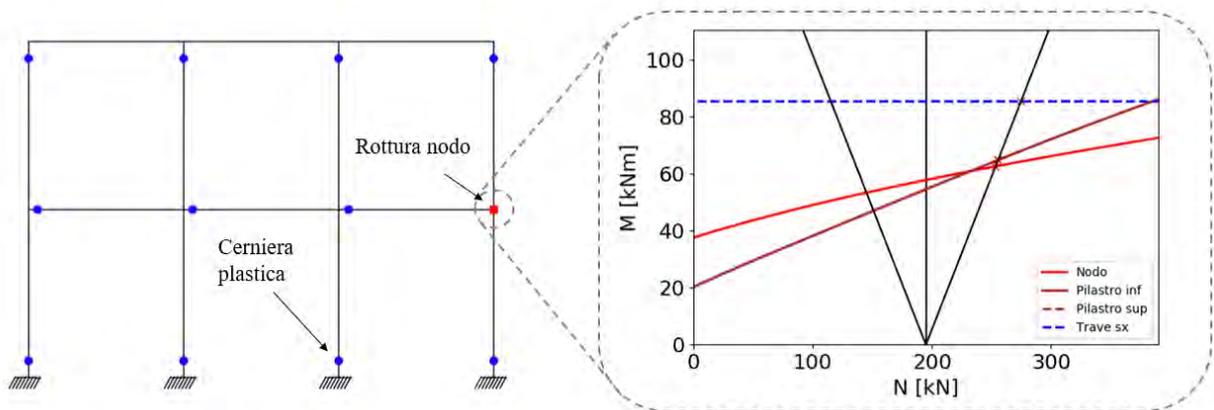
Per le strutture armate non erano ammessi valori di resistenza a compressione caratteristica del calcestruzzo  $R'_{bk}$  inferiori a 150 Kg/cm<sup>2</sup>. A favore di sicurezza, si è scelto di considerare in prima analisi questo valore di resistenza a compressione. Nel documento è riportata anche la formulazione per ricavare il valore di  $R'_{bk}$  in funzione del valore di resistenza a compressione medio del calcestruzzo  $R'_{bm}$ . Per le armature era possibile l'impiego di barre lisce, di tipo FeB22k o FeB32k, o ad aderenza migliorata, di tipo FeB38k ed FeB44k. I valori delle tensioni ammissibili sono stati valutati in accordo con le prescrizioni della normativa. A favore di sicurezza, sono state considerate barre di armatura lisce di tipo Fe B 22 k. Si riportano di seguito i valori delle tensioni ammissibili considerate:

- **Tensione ammissibile nel calcestruzzo:** 60 kg/cm<sup>2</sup>
- **Massima tensione tangenziale del calcestruzzo:** 14 kg/cm<sup>2</sup>
- **Tensione ammissibile nell'acciaio:** 1200 kg/cm<sup>2</sup>

Per il dimensionamento del quantitativo di armature di travi e pilastri si è considerato un coefficiente di omogenizzazione della sezione "n" pari a 10, in accordo con il DM 1976. Sono state inoltre considerate le prescrizioni relative al quantitativo di armatura minima per elementi inflessi e per i pilastri, nonché le prescrizioni per quantitativo di armatura trasversale. Nel DM 1976 viene inoltre espressamente riportato che le barre di armatura lisce dovevano essere ancorate alle estremità tramite uncini, mentre non erano previste prescrizioni per l'armatura nel pannello nodale. Pertanto, si è scelto di considerare un pannello nodale non staffato con barre longitudinali delle travi ancorate ad uncino.

Per l'applicazione della metodologia SLaMA sono stati considerati, a favore di sicurezza, i quantitativi minimi di armatura valutati tramite progetto simulato. I risultati di sintesi dell'analisi vengono illustrati di seguito.

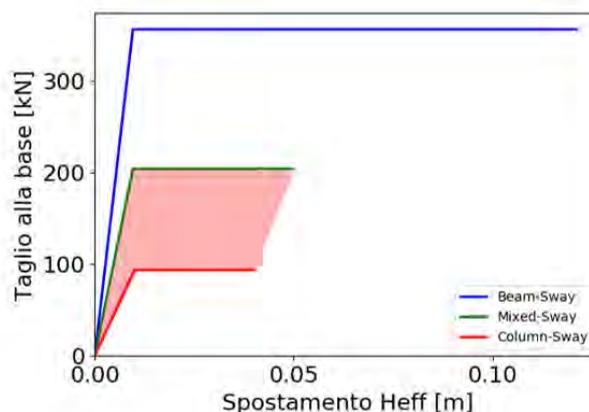
In Figura 79 è riportato il meccanismo inelastico ottenuto e la gerarchia delle resistenze per un sotto-assemblaggio nodo trave-pilastro.



**Figura 79. Meccanismo inelastico (sinistra) e gerarchia delle resistenze di un sotto-assemblaggio nodo trave-pilastro (destra) – Scenario 1**

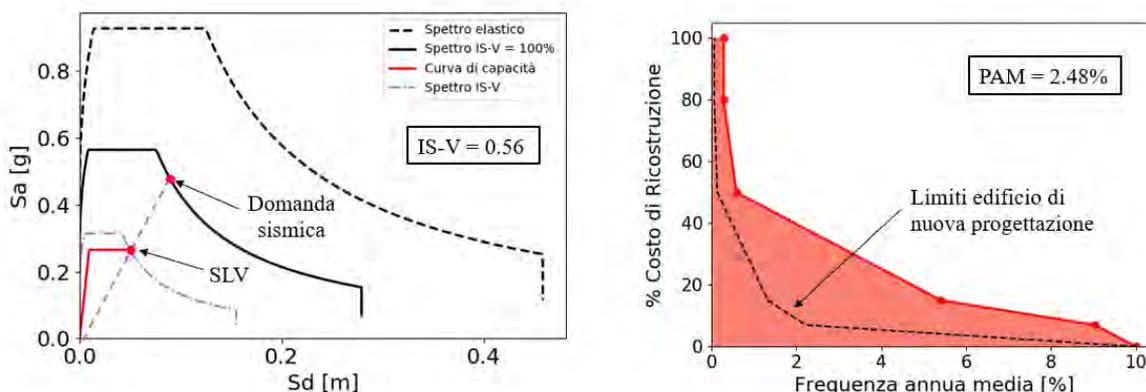
Il meccanismo inelastico ottenuto è un meccanismo misto che coinvolge la formazione delle cerniere plastiche nelle travi del primo impalcato e nei pilastri all'ultimo piano e la rottura a taglio dei nodi esterni. In particolare, osservando la gerarchia delle resistenze del nodo esterno, è possibile notare che i valori di resistenza di nodo e pilastro risultano molto vicini, e la sequenza degli eventi è fortemente influenzata dal valore di carico assiale agente; diversamente, la trave di sinistra (soggetta a momento negativo quando il telaio è spinto da sinistra a destra) presenta dei valori di resistenza più elevati.

In Figura 80 si riporta la curva di capacità del telaio in esame (Mixed-Sway), assieme ai limiti superiori (Beam-Sway) ed inferiori (Colum-Sway); viene inoltre evidenziato il range di valori di prestazione attesi, che a causa dell'insufficiente materiale a disposizione, viene considerato compreso tra il limite inferiore e la curva di capacità Mixed-Sway calcolata/stimata per la struttura.



**Figura 80. Curve di capacità della struttura e range di valori di prestazione attesi – Scenario 1**

Per ogni curva di capacità è stata valutata la classe di rischio sismico in accordo con il DM 65 del 2017, come illustrato precedentemente nel paragrafo 4.2. In Figura 81 si riporta il confronto tra curva di capacità e domanda sismica, secondo l'approccio Capacity Spectrum Method [42], per lo SLV e la curva PAM valutata per il caso di Mixed-Sway. Nel caso del parametro PAM, viene anche fornita come confronto la curva PAM di un edificio che rispetta per ogni stato limite i requisiti minimi previsti dalla normativa tecnica.



**Figura 81. Confronto tra capacità e domanda su piano ADRS (sinistra) e valutazione del parametro PAM (destra) - Scenario 1**

La valutazione del confronto tra capacità e domanda su piano ADRS è stata effettuata in accordo con il “metodo B” riportato nella Circolare esplicativa del 2019 [54]. Dai grafici di Figura 81 è possibile notare che la struttura non rispetta i requisiti previsti dalla normativa tecnica nel caso di edifici di nuova progettazione.

La stessa procedura è stata applicata alle curve di Column-Sway e Beam-Sway, per ottenere i valori limite dei parametri IS-V e PAM. In Tabella 9 si riportano i valori ottenuti per la classificazione del rischio sismico. Si sottolinea che l’indice IS-V viene riportato come valore percentuale nella Tabella 9, al fine di renderne più semplice la lettura (ed in analogia con l’indice %NBS [9] di provenienza).

**Tabella 9. Classificazione del rischio sismico – Scenario 1**

	IS-V	Classe IS-V	PAM	Classe PAM
<b>Beam-Sway</b>	119.3%	A+	0.87%	A
<b>Mixed-Sway</b>	55.6%	C	2.48%	C
<b>Column-Sway</b>	33.0%	D	4.30%	E

Il range di valori attesi per l’indice IS-V nello scenario di acquisizione dati numero 1 è compreso tra un valore minimo di 33% ed un valore massimo di 55.6% (corrispondenti rispettivamente ad una Classe IS-V “D” e “C”). Nel caso del parametro PAM, il range comprende un valore massimo di 4.3% ed un valore minimo di 2.48% (corrispondenti rispettivamente ad una Classe PAM “E” e “C”). La classe di rischio finale è dunque compresa tra un minimo corrispondente alla “E” ed un massimo corrispondete alla classe “C”. I risultati evidenziano che, nel caso del meccanismo Column-Sway, si ha un significativo incremento del parametro PAM (i.e., un significativo incremento delle perdite economiche attese) che comporta un notevolmente aumento del rischio sismico associato alla struttura.

Nel caso del Beam-Sway si arriva ad un valore del parametro IS-V pari a 119% (classe “A+”) e del parametro PAM pari a 0.87% (classe “A”). Sebbene questi valori siano ritenuti eccezionali per questo scenario di acquisizione, sono comunque di grande interesse per la scelta di possibili strategie di retrofit. In particolare, i risultati ottenuti evidenziano che si può puntare ad ottenere un adeguamento sismico della struttura se si sceglie come strategia di retrofit quella di ristabilire la corretta gerarchia delle resistenze a livello di sotto-assemblaggio nodo trave-pilastro.

**5.2.2 Scenario di acquisizione dati n° 2**

Nel secondo scenario di acquisizione dati, oltre a tutti i dati raccolti nello scenario 1, si ha disposizione anche l’informazione relativa alle caratteristiche meccaniche dei materiali. È importante evidenziare che questo scenario è quello effettivamente rappresentativo del caso studio in esame: avendo a disposizione infatti i soli disegni architettonici e la scheda PdCM Livello 1 e 2, è possibile risalire alla geometria dell’edificio, al periodo di costruzione ed alle caratteristiche meccaniche dei materiali da costruzione (riportati nella scheda PdCM);

diversamente, non essendo in possesso dei disegni strutturali, si ha un'incertezza legata ai quantitativi di armatura ed ai dettagli costruttivi della struttura.

Nella scheda PdCM Livello 1 e 2 dell'unità strutturale caso studio viene riportato un valore di resistenza a compressione media del calcestruzzo in fondazione ed in elevazione pari a 19 MPa, mentre viene riportato un valore di resistenza a trazione media dell'acciaio utilizzato per le barre di armatura pari a 255 MPa. In Figura 82 si riporta un estratto della scheda PdCM dell'edificio.

74) Resistenza dei materiali (valori medi utilizzati nell'analisi)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Cis fondazione	Cis elevazione	Acciaio in barre	Acciaio profilati	Bulloni chiodi	Muratura 1	Muratura 2	Altro
A	Resistenza a Compressione (N/mm <sup>2</sup> )	19	19	255				
B	Resistenza a Trazione (N/mm <sup>2</sup> )			255				
C	Resistenza a taglio (N/mm <sup>2</sup> )							
D	Modulo di elasticità Normale (GPa)	24,8	24,8	206				
E	Modulo di elasticità Tangenziale (GPa)	11,3	11,3	79				

Figura 82. Estratto della scheda PdCM relativa alle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Nella scheda fornita viene inoltre affermato che per la struttura è stato raggiunto un Livello di Conoscenza (LC) 2 e che per i materiali sono state effettuate anche delle prove non distruttive con ultrasuoni e prove schelerometriche (Figura 83); non si è tuttavia in possesso di tale documentazione.

H	Quantità prove svolte sui materiali (cemento armato)	1) Elemento primario trave	1 -Provini cis	1	2 -Provini acciaio	1			
		2) Elemento primario pilastro	1 -Provini cis	1	2 -Provini acciaio	1			
		3) Elemento primario parete	1 -Provini cis		2 -Provini acciaio				
		4) Elemento primario nodo	1 -Provini cis		2 -Provini acciaio				
		5) Elemento primario altro (specificare)	1 -Provini cis		2 -Provini acciaio				
		6) Eventuali prove non distruttive svolte (elencare): a) ULTRASUONI							
		b) SCALEROMETRIE							

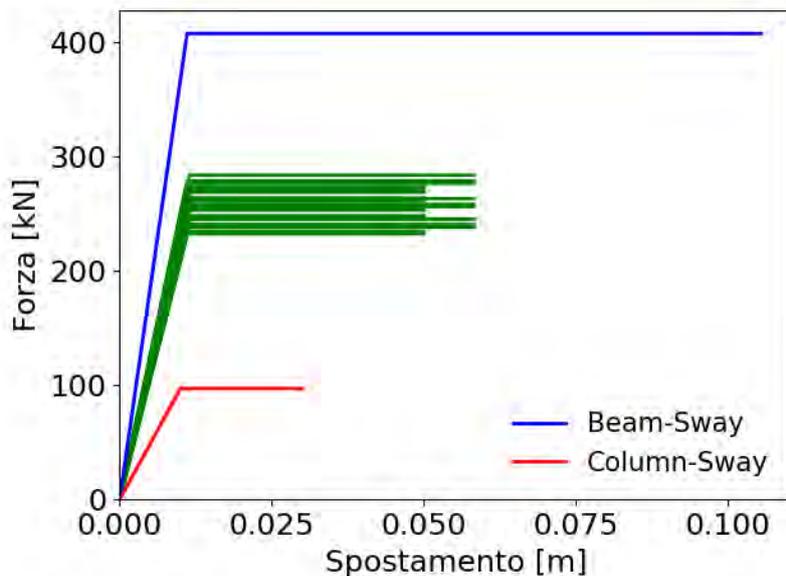
Figura 83. Estratto della scheda PdCM relativa alle prove effettuate

I quantitativi di armatura minimi sono stati valutati ancora una volta tramite progetto simulato, in analogia con quanto effettuato per lo scenario 1. Per tener conto delle incertezze relative al quantitativo di armatura ed ai dettagli costruttivi, vengono ipotizzati differenti scenari e per ognuno di questi viene applicata la procedura analitica SLAMA al fine di ottenere differenti curve di capacità per ogni realizzazione. In particolare, per questo specifico caso studio, dal momento che il meccanismo inelastico con i quantitativi minimi di armatura prevede la formazione delle cerniere plastiche in travi e pilastri, nonché la rottura a taglio dei nodi (vedi Figura 79), sono stati ipotizzati differenti quantitativi di armatura longitudinale per gli elementi strutturali e differenti dettagli costruttivi per il pannello nodale. Si evidenzia che, essendo l'edificio non eccessivamente datato (1980), non sono state osservate rotture fragili o interazioni flessione/taglio dovute al quantitativo di armatura trasversale, anche considerando il quantitativo di armatura minimo derivante da progetto simulato. Pertanto, nel caso specifico si è scelto di non far variare questo dato, dal momento che un incremento del quantitativo di armatura trasversale negli elementi strutturali non avrebbe prodotto differenze nella risposta sismica della struttura. È importate evidenziare tuttavia che quanto appena detto è vero solamente nel momento in cui si trascurano gli effetti del confinamento, come avviene di consueto nella pratica professionale. Diversamente, se gli effetti del confinamento venissero tenuti in conto nell'analisi

strutturale, incrementare il quantitativo di armatura trasversale provocherebbe una differente risposta strutturale, e pertanto sarebbe necessario tenere conto anche di questa fonte di incertezze.

A partire dal quantitativo di armatura minimo valutato da progetto simulato, per le travi sono stati considerati 3 differenti scenari, derivanti dall'utilizzo di differenti diametri di barre di armatura. In particolare, si è scelto di utilizzare un quantitativo di armatura inferiore pari a 6.16 cmq, 6.03 cmq e 6.63 cmq, corrispondenti, rispettivamente, a 4φ14, 3φ16 e 2φ18+1φ14. In analogia, anche per i pilastri sono stati considerati 3 differenti scenari di quantitativo di armatura. In particolare, è stato considerato un quantitativo di armatura pari a 6.16 cmq, 8.04 cmq, 10.18 cmq, corrispondenti, rispettivamente, a 4φ14, 4φ16 e 4φ18. Infine, per il pannello nodale è stata considerata l'assenza di staffatura e sono stati considerati 3 differenti dettagli costruttivi per l'ancoraggio delle barre di armatura: barre ancorate ad uncino, barre ancorate all'esterno del nodo e barre ancorate all'interno del nodo (vedi Figura 31). A questi dettagli corrispondono differenti valori del coefficiente  $k_j$ , coefficiente utilizzato per calcolare la capacità del pannello nodale in accordo con le NZSEE2017[9], ovvero rispettivamente valori di 0.2, 0.3 e 0.4. I valori di questo coefficiente vengono utilizzati per ricavare la tensione principale di trazione del pannello nodale; in assenza di staffe, la capacità a taglio del pannello nodale dipende da questa tensione principale e dal valore di carico assiale agente sul nodo.

In totale quindi sono state considerati 27 possibili scenari; per ognuno di essi è stata applicata la procedura analitica SLaMA e la classificazione del rischio sismico. Questo è stato possibile tramite la realizzazione di uno script ad-hoc, realizzato in linguaggio di programmazione Python. Le curve di capacità ottenute sono riportate in Figura 84, assieme alle curve di capacità limite inferiore e superiore.



**Figura 84. Scenario 2 - Curve di capacità SLaMA al variare dei dettagli costruttivi del pannello nodale e dei quantitativi di armatura in pilastri e travi**

Al variare del quantitativo di armatura e dei dettagli costruttivi è possibile osservare che la resistenza del telaio in esame varia in un range compreso tra circa 240kN e 280kN. Lo spostamento di snervamento, corrispondente all'entrata in campo plastico, resta pressoché invariato considerando le differenti realizzazioni, mentre la capacità in termini di spostamento ultimo tende a variare in un range di valori comunque limitato.

Per ogni realizzazione sono stati valutati i parametri IS-V e PAM e le corrispondenti classi di rischio. I risultati sono riassunti in Tabella 10. Analogo discorso è stato effettuato anche per le curve limite inferiore e superiore (Tabella 11)

**Tabella 10. Classificazione del rischio sismico per ogni realizzazione - Scenario 2**

ID	IS-V	Classe IS-V	PAM	Classe PAM
1	58.9%	C	1.9%	C
2	60.6%	B	1.7%	C
3	62.5%	B	1.6%	C
4	58.7%	C	1.9%	C
5	60.4%	B	1.8%	C
6	62.2%	B	1.6%	C
7	59.4%	C	1.8%	C
8	61.0%	B	1.7%	C
9	62.9%	B	1.5%	C
10	65.2%	B	1.8%	C
11	61.8%	B	1.6%	C
12	63.6%	B	1.5%	B
13	64.9%	B	1.8%	C
14	61.5%	B	1.6%	C
15	63.4%	B	1.5%	B
16	65.7%	B	1.7%	C
17	62.2%	B	1.6%	C
18	64.0%	B	1.4%	B
19	65.2%	B	1.8%	C
20	67.5%	B	1.6%	C
21	70.2%	B	1.4%	B
22	64.9%	B	1.8%	C
23	67.3%	B	1.6%	C
24	69.9%	B	1.4%	B
25	65.7%	B	1.7%	C
26	68.0%	B	1.5%	C
27	70.6%	B	1.3%	B

**Tabella 11. Classificazione del rischio sismico curve di capacità della struttura - Scenario 2**

	IS-V	Classe IS-V	PAM	Classe PAM
<b>Beam-Sway</b>	119.7%	A+	0.71%	A
<b>Mixed-sway</b>	58.7% - 70.6%	C - B	1.3% - 1.9%	C - B
<b>Column-Sway</b>	30.6%	D	4.51%	F

Dai risultati ottenuti è possibile osservare che il parametro IS-V varia in un range di valori compreso tra un valore minimo di 58.7% (classe "C") ad un valore massimo di 70.6% (classe "B"). Nel caso del parametro PAM i limiti del range di variazione sono un valore massimo di 1.9% (classe "C") ed un valore minimo di 1.3% (classe "B").

In questo scenario di acquisizione dati i valori relativi al Column-Sway rappresentano valori plausibili, qualora fossero indicati nella scheda di acquisizione dati informazioni riguardanti un atteso meccanismo di piano soffice, in funzione delle criticità strutturali riscontrate. In particolare, nello scenario 2 la curva di capacità del meccanismo di Column-Sway porta ad un valore di IS-V pari a 30.6% (classe "D") ed un valore di PAM pari a 4.51% (classe "F"). Diversamente, i valori relativi al meccanismo di Beam-Sway rimangono valori eccezionali anche per questo scenario di acquisizione dati, e di maggiore utilità per la scelta delle strategie di retrofit. In

questo caso, la curva di capacità del Beam-Sway porta ad un valore di IS-V pari a 119.7% (classe “A+”) ed un valore di PAM pari a 0.71% (classe “A”).

### 5.2.3 Scenario di acquisizione dati n° 3

Nel terzo scenario di acquisizione dati si assume di essere in possesso dei dettagli costruttivi e dei quantitativi di armatura degli elementi strutturali (ad esempio tramite disegni originali dell’epoca e/o rilievi in situ), in aggiunta a tutte le informazioni riportate nello scenario 1. È bene evidenziare nuovamente che per il caso studio in esame non si è in realtà possesso di materiale sufficiente a raggiungere questo livello di acquisizione dati e conoscenza della struttura; pertanto, questo scenario viene solamente ipotizzato/simulato, al fine di illustrare un’applicazione della metodologia SLaMA-School anche in presenza di una simile acquisizione dei dati.

Al fine di simulare l’acquisizione dati anche per l’armatura ed i dettagli costruttivi degli elementi strutturali, sono stati ipotizzati dei quantitativi di armatura a partire dal progetto simulato. I dati vengono riportati in Figura 85, dove è riportato un estratto della scheda PELL-School-RS con la compilazione dei campi nella sezione “telai in CA”.

Attributo	Tipologia	CAMPI da COMPILARE	Obbligatorio S/N	Descrizione	Not
Codice Edificio	String (10)		S	Indica il codice dell'edificio scolastico	
Codice Unità strutturale	String (10)		S	Indica il codice dell'unità strutturale	
Campate - numero	Num (integer)	3	S	Campate - Numero in Direzione longitudinale	
Campate - numero	Num (integer)	3	S	Campate - Numero in Direzione trasversale	
Campate - lunghezza	Num [m]	5	S	Campate - Lunghezza in Direzione longitudinale	
Campate - lunghezza	Num [m]	5	S	Campate - Lunghezza in Direzione trasversale	
Trave - sezione	Num [mm]	400	S	Travi - Larghezza media della sezione	
Trave - sezione	Num [mm]	600	S	Travi - Altezza media della sezione	
Travi - armatura - longitudinale	Num [mm2]	1410	S	Travi - Area armatura longitudinale in zona tesa	
Travi - armatura - longitudinale	Num [mm2]	603	S	Travi - Area armatura longitudinale in zona compressa	
Travi - armatura - trasversale	Num [mm2]	101	S	Travi - Area armatura trasversale	
Pilastrri - sezione	Num [mm]	400	S	Pilastrri - Larghezza media della sezione	
Pilastrri - sezione	Num [mm]	400	S	Pilastrri - Altezza media della sezione	
Pilastrri - armatura - longitudinale	Num [mm2]	804	S	Pilastrri - Area armatura longitudinale	
Pilastrri - armatura - trasversale	Num [mm2]	56.5	S	Pilastrri - Area armatura trasversale	
Pannello nodale - dettagli costruttivi	Enum	Barre longitudinali ancorare ad uncino e nodo non staffato	S	Pannello nodale - Dettagli costruttivi	

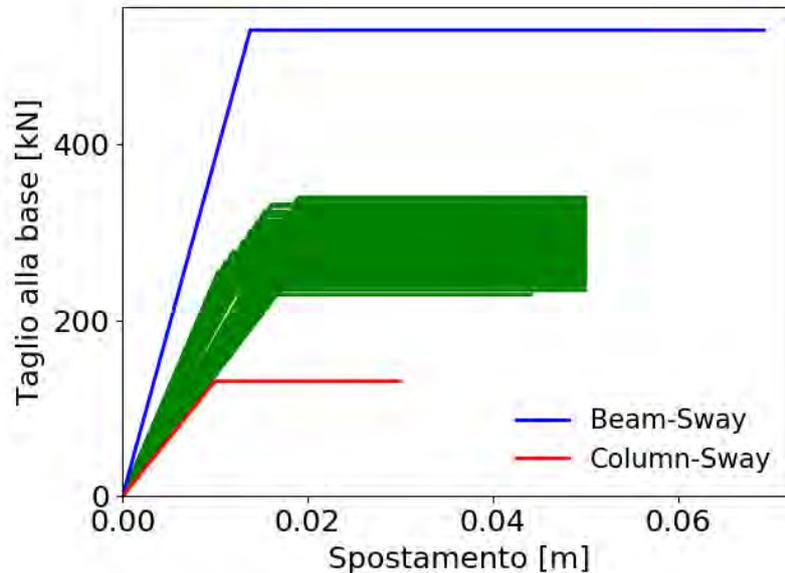
Figura 85. Estratto scheda PELL-School-RS compilata per lo scenario di acquisizione dati 3

In questo scenario non si è in possesso dell’informazione relativa alle caratteristiche meccaniche dei materiali; è pertanto necessario fare delle assunzioni, a partire dal periodo di costruzione ed in accordo con la normativa dell’epoca ed i più rilevanti lavori presenti nella letteratura scientifica.

Le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo sono state valutate in accordo con il lavoro di Gentile et al. [30], dove vengono individuate differenti classi di edifici appartenenti a differenti range di periodo di costruzione e per ogni classe si riporta un valore di resistenza media a compressione del calcestruzzo e di deviazione standard. In particolare, per la classe di edifici compresa nel range di periodi di costruzione 1977-2007 i valori considerati fanno riferimento al lavoro di Cristofaro et al. [55] e sono riferiti a test sui materiali condotti negli anni ’80. Pertanto, è stata considerata una resistenza media a compressione di 25.7 MPa ed un coefficiente di variazione CoV (rapporto tra la deviazione standard ed il valore medio) pari a 33.7%. Per l’acciaio delle barre di armatura è stato fatto riferimento al lavoro di Verderame et al. [56], dove per l’acciaio FeB22k vengono identificati come valori di resistenza media a trazione e deviazione standard, rispettivamente, di 325.11 MPa e 39.83 MPa (CoV = 12.2%).

A partire dai valori di resistenza dei materiali in termini di media e deviazione standard, sono state considerate differenti realizzazioni della struttura, effettuando un campionamento nel range di valori compresi tra un minimo di media meno due deviazioni standard ed un massimo di media più due deviazioni standard. Sia per il calcestruzzo che per l’acciaio sono stati quindi campionati 9 valori equidistanti in questo range, in accordo

con il lavoro di Gentile et al. 2021 [30], per un totale di 81 realizzazioni. Per ognuna delle 81 realizzazioni identificate è stata applicata la metodologia SLaMA, ottenendo differenti curve di capacità per ogni realizzazione. I risultati ottenuti sono illustrati in Figura 86; le curve di capacità del Beam-Sway e del Column-Sway fanno riferimento ai risultati ottenuti considerando i valori medi di resistenza dei materiali.



**Figura 86. Curve di capacità SLaMA al variare delle caratteristiche meccaniche dei materiali – Scenario 3**

Le curve di capacità identificate dalla procedura SLaMA presentano una resistenza che si aggira nell'intorno di 280 kN, con un valore minimo di circa 230 kN ed un valore massimo di circa 340 kN. Le curve presentano alle volte differenti capacità in termini di spostamento. In particolare, lo spostamento ultimo varia da un valore minimo di circa 4.5 cm a un valore massimo di 0.5 cm. Infine, dal grafico è possibile osservare che anche lo spostamento di snervamento, corrispondente all'entrata in campo plastico, della curva bilineare risente dell'influenza della capacità dei materiali.

In analogia con quanto effettuato nello scenario 2, anche per questo scenario sono stati valutati parametri IS-V e PAM per ogni realizzazione. I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 12, dove sono riportati i range di valore minimo e massimo ottenuti considerando ogni realizzazione e le corrispondenti classi IS-V e PAM.

**Tabella 12. Classificazione del rischio sismico – Scenario 3**

	IS-V	Classe-IS-V	PAM	Classe-PAM
<b>Beam-Sway</b>	121.6%	A+	0.57%	A
<b>Mixed-sway</b>	53.7% - 72.4%	C - B	2.04% - 1.03%	C - B
<b>Column-Sway</b>	32.5%	D	4.33%	E

L'indice IS-V risulta compreso in un range di valori che va da un minimo di 53.7% ad un massimo di 72.4%, a cui corrispondono rispettivamente la classe "C" e "B". Nel caso del parametro PAM, il range di valori va da un massimo di 2.04% (classe "C") ad un minimo di 1.03% (classe "B"). In generale, dunque, la classe rischio identificata per questo scenario di acquisizione dati è compresa tra una classe "C" ed una classe "B".

Nel caso del Column-Sway (limite inferiore) l'indice IS-V ottenuto è pari a 32.5%, a cui corrisponde una classe "D", mentre il parametro PAM è pari a 4.33% (classe "E"). Infine, per il Beam-Sway sono stati ottenuti valori di IS-V e PAM pari a 121.6% e 0.57%, rispettivamente, che collocano la struttura in classe IS-V "A+" ed in classe PAM "A".

#### 5.2.4 Scenario di acquisizione dati n° 4

Nell'ultimo scenario di acquisizione dati, vengono forniti tutti i dati necessari per effettuare un'analisi di vulnerabilità sismica dell'edificio. È importante evidenziare che il materiale relativo al caso studio è parziale,

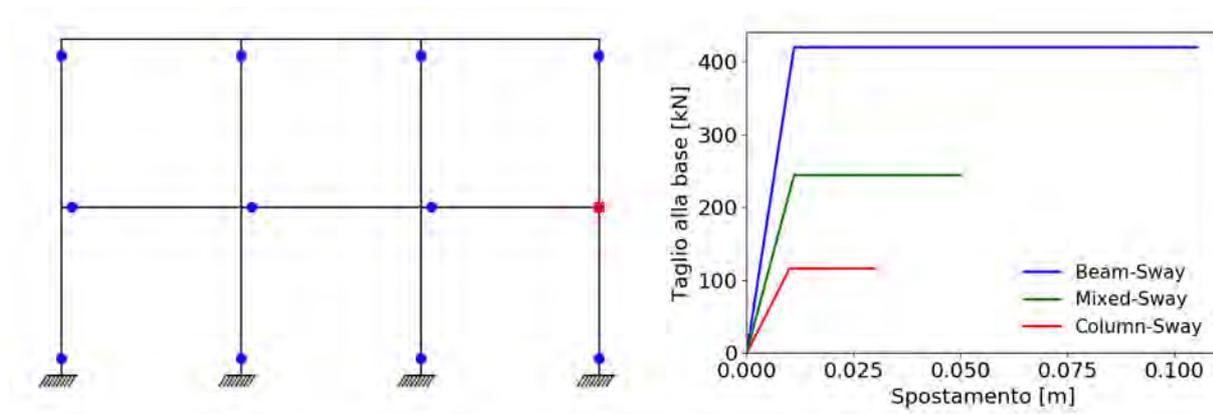
e pertanto anche questo scenario di acquisizione verrà ipotizzato/simulato a scopo puramente illustrativo della metodologia, in analogia con quanto precedentemente effettuato anche per lo scenario 3.

Essendo forniti in questo scenario tutti i dati necessari per un’analisi di vulnerabilità sismica, il risultato in output sarà di tipo deterministico (o meglio semi-probabilistico, in accordo con l’approccio delle normative tecniche) e non più sotto forma di “fuso”. Verranno tuttavia forniti in ogni caso i limiti di capacità superiore ed inferiore, identificati rispettivamente dal meccanismo di Beam-Sway e Column-Sway.

È bene ricordare che la procedura SLAMA-School utilizza come dati di input quelli collezionati nella scheda PELL-School-RS e, qualora si avessero a disposizione, i dati derivanti da disegni strutturali e relazioni tecniche. Con riferimento alla sola scheda, come per il caso in esame, l’analisi SLAMA effettuata fornirà i risultati relativi ad un edificio archetipo rappresentativo dell’edificio in esame, in quanto come parametri di input vengono richiesti dei valori medi di altezza d’interpiano, lunghezza della campata, altezza e larghezza della sezione di travi e pilastri e quantitativo di armatura. D’altronde, la procedura SLAMA-School non intende essere sostitutiva di un’analisi di vulnerabilità e rischio sismico maggiormente dettagliata nel caso di un singolo edificio, ma piuttosto si pone l’obbiettivo di fornire un primo valore di stima, nonché di riferimento e controllo, del rischio sismico del singolo e/o di un portafoglio di edifici al fine di supportare la realizzazione di una scala di priorità d’intervento per un piano di riqualificazione sismica a livello nazionale.

I dati relativi alla geometria ed il periodo di costruzione sono gli stessi già elencati nello scenario 1 (paragrafo 5.2.1), mentre i materiali da costruzione sono gli stessi riportati nello scenario 2, valutati a partire dalla scheda PdCM Livello 1 e 2, a disposizione per l’unità strutturale caso studio (paragrafo 5.2.2). I dettagli costruttivi ed il quantitativo di armatura sono stati ipotizzati a partire dal periodo di costruzione ed in accordo con il progetto simulato dell’edificio. In particolare, i quantitativi di armatura ed i dettagli costruttivi considerati sono gli stessi dello scenario 3 (paragrafo 5.2.3).

In Figura 87 si riporta il meccanismo inelastico ottenuto e le curve di capacità del telaio analizzato tramite procedura SLAMA.



**Figura 87. Meccanismo inelastico (sinistra) e curve di capacità SLAMA (destra) – Scenario 4**

Il meccanismo inelastico ottenuto è un Mixed-Sway, analogo a quello già illustrato nello scenario 1 (Figura 79). Per ogni curva di capacità (Mixed-Sway, Beam-Sway e Column-Sway) è stata effettuata la classificazione del rischio sismico. I risultati sono riassunti in Tabella 13.

**Tabella 13. Classificazione del rischio sismico - Scenario 4**

	IS-V	Classe IS-V	PAM	Classe PAM
<b>Beam-Sway</b>	119.7%	A+	0.71%	A
<b>Mixed-sway</b>	60.8%	B	1.78%	C
<b>Column-Sway</b>	30.6%	D	4.51%	F

Per il caso studio in esame, nel caso dello scenario di acquisizione dati n° 3 è stata identificato un valore dell'indice IS-V pari a 60.8% (classe "B") ed un valore del parametro PAM pari a 1.78% (classe "C"). La classe di rischio finale risulta quindi una classe "C".

Nel caso del limite inferiore, identificato dal meccanismo di Column-Sway, il parametro IS-V e PAM sono risultati pari a 30.6% (classe "D") e 4.51% (classe F). Diversamente, nel caso del limite superiore (i.e., Beam-Sway) il parametro IS-V e PAM sono risultati rispettivamente pari a 119.7% e 0.71%, identificando una classe "A+" IS-V ed una classe "A" PAM.

### 5.2.5 Sintesi risultati scenari di acquisizione

In conclusione, si riporta di seguito una sintesi dei risultati ottenuti per i differenti scenari di acquisizione dati analizzati. L'output finale della metodologia SLaMA-School consiste nell'identificazione di range di valori attesi, plausibili ed eccezionali per la classificazione del rischio sismico, in funzione della quantità e qualità dei dati raccolti nella scheda PELL-School-RS.

Per l'edificio caso studio, si riporta in Figura 88 ed in Figura 89 la valutazione del parametro IS-V e PAM, rispettivamente, con l'identificazione dei range di valori attesi, plausibili ed eccezionali per ogni scenario di acquisizione dati. Nei grafici vengono inoltre riportati i limiti delle classi IS-V e PAM, in accordo con il DM 65 2017.

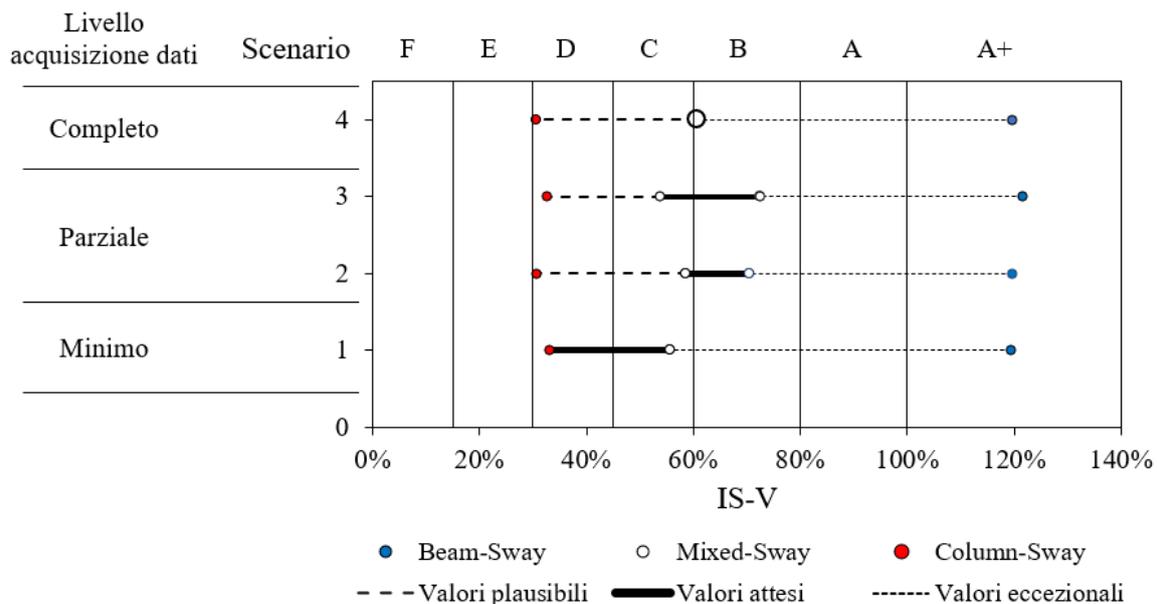


Figura 88. Sintesi dei risultati dell'indice di rischio IS-V e classe di rischio<sub>IS-V</sub> per i differenti scenari

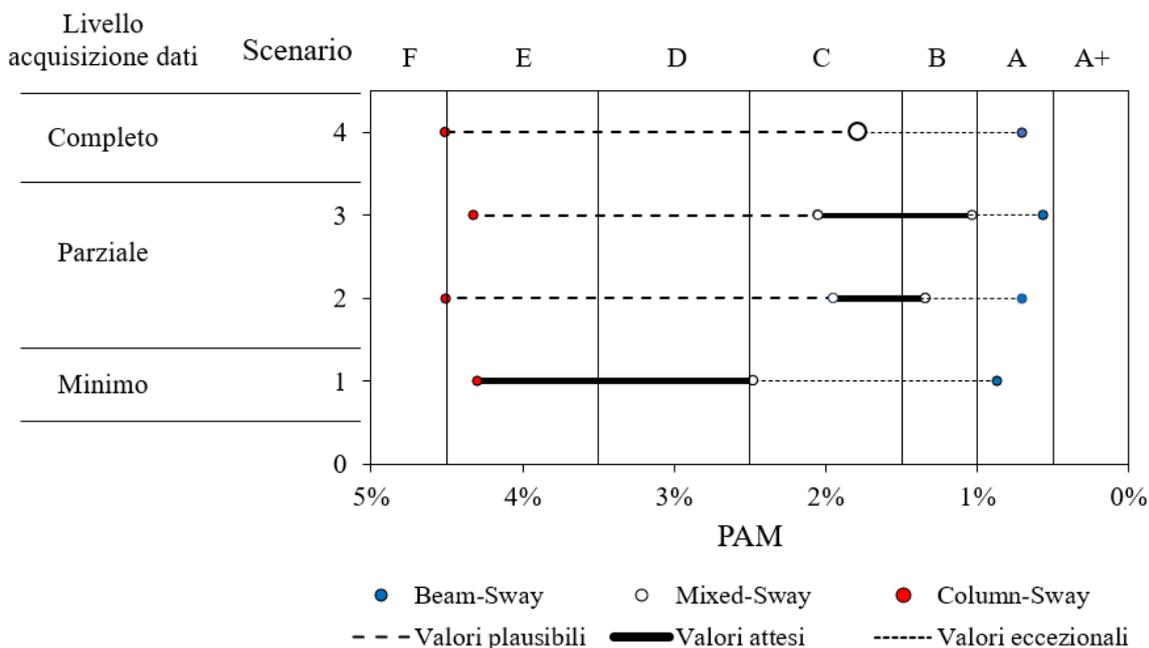


Figura 89. Sintesi dei risultati del parametro PAM classe di rischio<sub>PAM</sub> per i differenti scenari

In Figura 90 viene riportata la sintesi della classificazione del rischio sismico per ogni scenario di acquisizione dati.

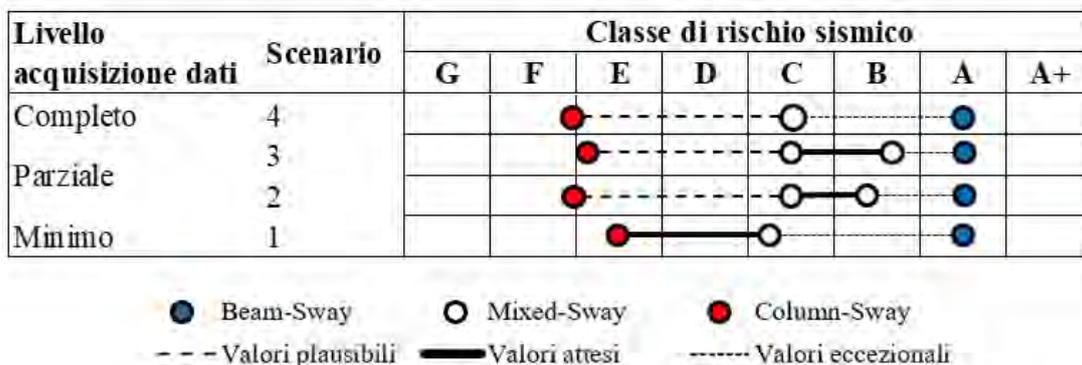


Figura 90. Sintesi dei risultati della classificazione del rischio sismico per i differenti scenari

I range di valori attesi vengono rappresentati dal tratto di linea continuo e più spesso nei grafici. Come precedentemente illustrato nella metodologia, per lo scenario 1, in assenza dei dati relativi al quantitativo di armatura e dettagli costruttivi degli elementi strutturali, nonché delle caratteristiche meccaniche dei materiali, il calcolo dei parametri necessari per la classificazione del rischio è stato effettuato tramite progetto simulato e considerando i quantitativi minimi di armatura e di resistenza dei materiali a favore di sicurezza. Il range di valori identificato dalla procedura per questo specifico scenario risulta essere cautelativo, a causa delle numerose ed importanti incertezze, e compreso tra il valore del Column-Sway e del Mixed-Sway. I valori rappresentati dal Beam-Sway vengono considerati valori eccezionali e di supporto per la scelta della migliore strategia d'intervento. Il range identificato per i valori attesi nel caso di scenario 1 risulta il più ampio tra tutti gli scenari di acquisizione dati analizzati.

Muovendosi verso lo scenario di acquisizione dati n° 2, il range di valori attesi si restringe per entrambi i parametri IS-V e PAM. Discorso analogo vale per lo scenario 3. In entrambi questi scenari si è in possesso di informazioni parziali sulla struttura; nello scenario 2, infatti, oltre alle informazioni derivanti dallo scenario 1, si è in possesso anche delle informazioni relative alle caratteristiche meccaniche dei materiali; diversamente,

nello scenario 3 non si conoscono le caratteristiche meccaniche dei materiali ma si è in possesso dell'informazione relative ai dettagli costruttivi e quantitativi di armatura. È bene evidenziare che, sebbene la numerazione degli scenari possa far pensare che quest'ultimi siano elencati in ordine crescente di qualità e/o quantità di acquisizione dati, in realtà gli scenari 2 e 3 risultano avere un livello raccolta dati analogo (ovvero parziale) e compreso tra il livello minimo (scenario 1) e massimo (scenario 4). Pertanto, non ci si aspetta che il fuso di valori si restringa passando dallo scenario 2 allo scenario 3. Per entrambi gli scenari il meccanismo di Mixed-Sway viene analizzato considerando differenti realizzazioni della struttura, al variare dei parametri fonte di incertezza e non riportati nella scheda (i.e., dettagli costruttivi ed armature nello scenario 2; materiali da costruzione nello scenario 3). Per il caso studio in esame, il range di valori attesi dello scenario 2 risulta minore rispetto a quello dello scenario 3. Tuttavia, è importante evidenziare che questo risultato è rappresentativo del solo caso studio specifico date le sue peculiarità, mentre in letteratura è stato dimostrato come l'incertezza legata ai dettagli costruttivi sia in realtà maggiormente influente rispetto a quella legata ai materiali da costruzione, specie negli edifici progettati prima degli anni '70 (Gentile et al. 2021 [30]). Per questi due scenari, il range di valori compreso tra il valore minimo del "fuso" ed il Column-Sway è rappresentativo dei valori plausibili, da adottare nel caso in cui tra le criticità strutturali raccolte nella scheda venga riportata l'elevata possibilità di avere un meccanismo di piano soffice. I valori limite superiore invece rimangono valori eccezionali a supporto della scelta della migliore strategia di retrofit.

In conclusione, l'output dello scenario 4 (completa acquisizione di dati nella scheda) è di fatto di tipo "deterministico" (nel senso che fornisce una curva univoca piuttosto che un range o fuso di curve), e fornisce i valori di IS-V e PAM identificati dai meccanismi di Beam-Sway, Mixed-Sway e Column-Sway. Con riferimento alla sola scheda, come per il caso in esame, il range di valori plausibili risulta essere quello compreso tra i valori del limite inferiore e quelli del meccanismo di Mixed-Sway, mentre i valori identificati dal limite superiore rimangono eccezionali. In funzione dei dati raccolti nella scheda, ed in particolar modo delle criticità strutturali riscontrate, sarà possibile muoversi in questi range di valori, penalizzando la prestazione della struttura con opportuni coefficienti riduttivi. È bene evidenziare ancora una volta che, anche nel caso di una completa raccolta dati nella scheda, l'output della procedura non dovrà essere considerato definitivo ma bensì preliminare e di supporto a future analisi di vulnerabilità sismica più raffinate e di maggiore dettaglio per il singolo caso studio. La procedura SLAMA-School infatti, attraverso la connessione con la scheda PELL-School-RS, avrà l'obiettivo di supportare una raccolta dati per gli edifici scolastici a livello nazionale, con l'identificazione di una prima classificazione del rischio sismico della struttura per la definizione di una scala di priorità d'intervento per un piano di riqualificazione sismica del territorio nazionale.

## 6 Conclusioni e sviluppi futuri

Al termine dell'annualità sono stati raggiunti gli obiettivi ed i risultati attesi. In particolare:

- *Predisposizione e validazione di schede di rilievo.* L'acquisizione di dati geometrici, strutturali e di criticità è di fondamentale importanza per poter eseguire analisi di vulnerabilità sismica e di classificazione del rischio sismico degli edifici scolastici. Per questo motivo, tenendo conto di schede di rilievo istituzionali esistenti nonché aggiungendo ulteriori parametri con l'obiettivo di garantire un livello di screening completo degli edifici, è stata una scheda di rilievo per il modulo di "Risposta Sismica" (PELL-School-RS), rappresentante un database interoperabile anche con moduli non sismici. In particolare, in aggiunta alle informazioni relative alla posizione dell'edificio e alla tipologia ed organizzazione del sistema sismo-resistente, sono state inserite nuove voci relative alle criticità di geometria, criticità costruttive e dei materiali, criticità dei dettagli costruttivi e dati dimensionali sugli elementi strutturali. Inoltre, è stato realizzato un manuale di supporto alla compilazione della scheda con il fine di aiutare i tecnici specializzati e gli ingegneri nella corretta valutazione delle criticità che influenzano l'entità del danneggiamento e della perdita di funzionalità delle scuole a seguito di un evento sismico. È stato infine predisposto un modulo Google per la raccolta di valutazioni e giudizi sulla scheda proposta, in termini di completezza dei dati raccolti, di facilità di applicazione della scheda e di possibili miglioramenti. I dati raccolti mostrano che la scheda, grazie anche al manuale di supporto, risulta essere completa e di facile implementazione.
- *Sviluppo e validazione della procedura SLaMA-School.* Con riferimento ai più recenti sviluppi nel campo della valutazione di vulnerabilità sismica degli edifici esistenti, la procedura SLaMA (Simple Lateral Mechanism Analysis) riportata nelle linee guida neozelandesi è stata validata come metodo di analisi per la definizione di una prima scala di vulnerabilità e rischio sismico degli edifici esistenti. La procedura SLaMA-School, così indicata nella sua applicazione ad edifici scolastici, è facilmente implementabile in un foglio di calcolo e consente di definire per gruppi di edifici una prima scala di vulnerabilità e di rischio sismico, supportando lo sviluppo di piani di intervento a scala nazionale ed inclusivi di tempi-costi. I vantaggi della procedura sono stati mostrati tramite l'applicazione della SLaMA ad una serie di edifici scolastici caso studio. I risultati delle analisi svolte, con riferimento sia ad edifici in calcestruzzo armato che in muratura, mostrano come la SLaMA-School rappresenti una valida alternativa ai modelli numerici, consentendo valutazioni di vulnerabilità sismica rapide, standardizzate ed eseguibili con diverso livello di conoscenza degli edifici. Inoltre, la procedura può essere implementata tenendo conto dei dati raccolti dalla scheda sviluppata per il modulo PELL-School-RS. In aggiunta, come discusso nella relazione, la procedura SLaMA potrà essere integrata in un approccio di valutazione multi-prestazionale, in particolare sismico-energetica, per consentire una stima rapida delle perdite e costi integrati attesi, quindi per la definizione di strategie e tecniche di intervento integrato.
- *Definizione di curve di capacità range-fuso per edifici scolastici.* Con riferimento ad un edificio scolastico caso studio, è stata presentata e discussa la procedura SLaMA-School, che ha permesso di valutare la classificazione di rischio sismico dell'edificio a differenti livelli di acquisizione dati, individuando curve di capacità range fuso in funzione della qualità e quantità dei dati raccolti. La procedura di valutazione SLaMA-School, pertanto, potrà essere implementata con diverso livello di conoscenza dell'edificio scolastico, a partire dalla sola disponibilità di informazioni geometriche e meccaniche dell'edificio o classi di edificio (archetipi); il range di curve di capacità (curve limiti superiori ed inferiori forza-spostamento), quindi un range di sicurezza/prestazione, associate all'edificio per il quale si ha una conoscenza base, potranno essere continuamente raffinate in fasi successive in funzione dell'acquisizione di ulteriori dati, informazioni o verifiche caratterizzanti l'edificio.

Tenendo conto del lavoro svolto finora, tra gli sviluppi prossimi e futuri del lavoro si riportano i seguenti:

- *Influenza delle criticità strutturali sulla capacità sismica della struttura.* Le criticità strutturali riscontrate e/o attese, raccolte nella scheda di acquisizione dati PELL-School-RS, potranno essere utilizzate per abbattere la capacità sismica della struttura e dunque incrementarne il rischio sismico ad essa associato. In particolare, attraverso opportune calibrazioni con analisi parametriche su modelli numerici e/o sulla

base di prove sperimentali, potranno essere individuati dei coefficienti riduttivi da utilizzare per ridurre la prestazione della struttura, valutata con un approccio meccanico SLaMA, in accordo con i più recenti sviluppi disponibili in letteratura scientifica.

- *Sviluppo dell'algoritmo SLaMA-School all'interno della piattaforma CIPCast.* In collaborazione con ENEA, la procedura/algoritmo SLaMA-School sarà implementata all'interno della piattaforma CIPCast per la valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico a scala territoriale.

## 7 Appendice A: Manuale di compilazione scheda

In questa appendice si riportano le schermate relative al manuale di compilazione scheda, realizzato a supporto degli ingegneri e tecnici specializzati coinvolti nella compilazione della scheda PELL-School-RS (Figura 91-101).




Public  
Energy  
Living  
Lab



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

### Scheda PELL-Edifici - Risposta Sismica

**IDENTIFICAZIONE UNITA' STRUTTURALI, UA** (estratto da manuale AeDES):  
 All'interno degli edifici o aggregati strutturali si individuano **unità strutturali US** omogenee e in genere distinguibili dalle unità strutturali adiacenti per tipologia costruttiva, differenza di altezza, età di costruzione, sfalsamento dei piani, etc.  
 Le **unità strutturali US** costituiscono, quindi, organismi strutturali unici e possono essere distinti ed identificati, ad esempio, sulla base dei seguenti criteri:

- fabbricati costruiti in epoche diverse;
- fabbricati costruiti con materiali diversi;
- fabbricati costruiti con solai posti a quote diverse.

Nel caso di edifici in **cemento armato**, in generale, la definizione delle unità strutturali risulta generalmente meno problematica in quanto si considerano **unità strutturali US** i fabbricati isolati da spazi o giunti rispondenti alla prescrizione normativa

**Nome Edificio Scolastico:** Indica la denominazione dell'edificio scolastico preso in esame.

**Codice Edificio Scolastico:** Indica il codice univoco composto da dieci cifre che identifica l'edificio scolastico all'interno dell'Anagrafe. Il codice è attribuito in fase di inserimento della scheda edificio dall'Amministratore di sistema dell'ARES 2.0 (Regione). I primi sei caratteri rappresentano il codice ISTAT del Comune dove l'edificio è ubicato; gli ultimi quattro caratteri il progressivo di rilevazione dell'edificio scolastico all'interno del Comune.

**Codice Unità Strutturale:** Indica il codice con cui viene indicata la specifica Unità Strutturale (US).

**Anno di costruzione:** Si intende l'anno di fine lavori di costruzione dell'unità strutturale in oggetto. Nel caso in cui l'anno non sia noto, il rilevatore deve far riferimento ad una delle classi di età del "Periodo di costruzione".

**Fonte dei Dati (FD):**

**Tipologia:** Indica la fonte dei dati ricavati per l'US, ossia tramite giudizio esperto, interviste, ispezioni dirette o da documentazione disponibile.

**Disegni digitali architettonici:** Indica la disponibilità di documentazione digitale, quali file CAD, in cui sono riportate piante architettoniche, prospetti, sezioni, planimetrie.

**Disegni digitali strutturali:** Indica la disponibilità di documentazione digitale, quali file CAD, in cui sono riportate piante strutturali, sezioni, carpenterie (travi, pilastri, nodi, solai, fondazioni).

**Disegni cartacei originali:** Indica la disponibilità di documentazione originale del progetto, quindi dei disegni cartacei architettonici e/o strutturali.

**Documentazione storica di progetto:** Indica la disponibilità di documenti originali relativi al progetto strutturale dell'US, quindi contenente le assunzioni di calcolo (schemi statici, materiali, carichi) e la metodologia adottata per la verifica degli elementi strutturali.

**Relazioni di vulnerabilità sismica:** Indica la disponibilità di documenti relativi alla valutazione della vulnerabilità sismica dell'US, quali la relazione generale, di calcolo, geologica e di prove sui materiali.

Figura 91. Manuale di compilazione scheda: parte 1

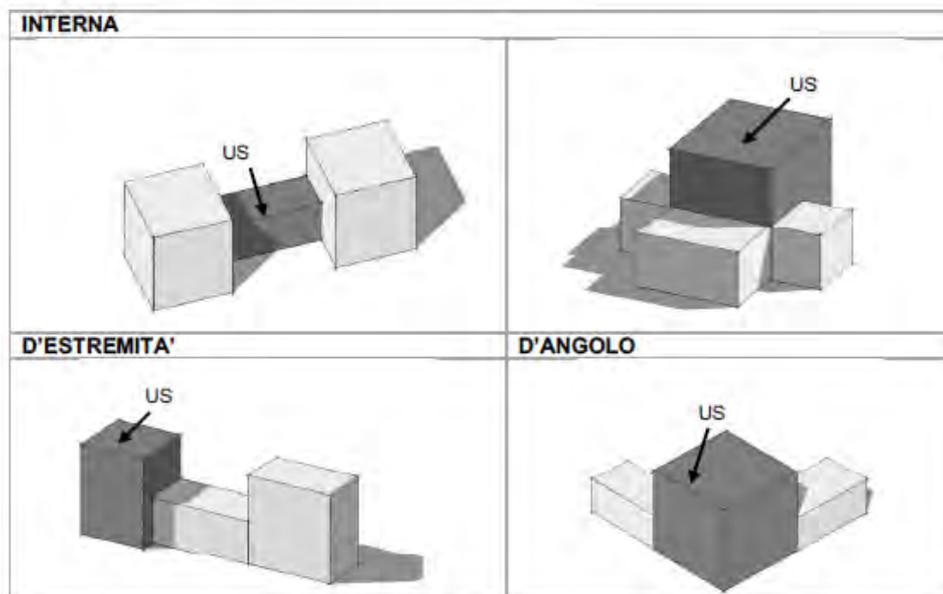
**Documentazione fotografica:** Indica la disponibilità di documentazione fotografica (esterni e/o interni) sull'US in esame.

**Riferimento:** Indicare la persona di riferimento e l'archivio cartaceo e/o digitale presso il quale tale documentazione è reperibile.

**Note:** E' possibile inserire delle note per evidenziare ulteriori aspetti utili nella descrizione della fonte dei dati per l'US in esame.

**Posizione strutturale:** Deve essere indicata, rispetto alla totalità dell'edificio scolastico, la posizione dell'unità strutturale in oggetto.

- *Isolata:* nel caso in cui l'US coincida con l'edificio scolastico;
- *Interna:* US compresa tra altre parti di edificio "lineare"; o comunque aderente ad altre due o più US su lati non consecutivi;
- *D'estremità:* quando l'US si trovi adiacente per una parte ad altre dell'edificio e libera su tre lati;
- *D'angolo:* quando l'US si trovi adiacente per due lati consecutivi ad altre porzioni dell'edificio e libera sugli altri.

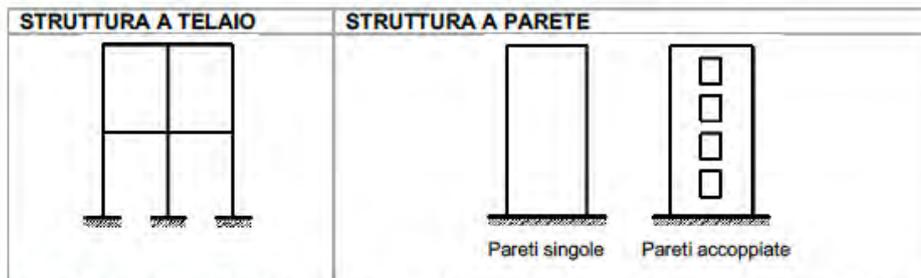


**Tipologia di sistema resistente:** Indica la tipologia ed organizzazione del sistema resistente dell'US in calcestruzzo armato.

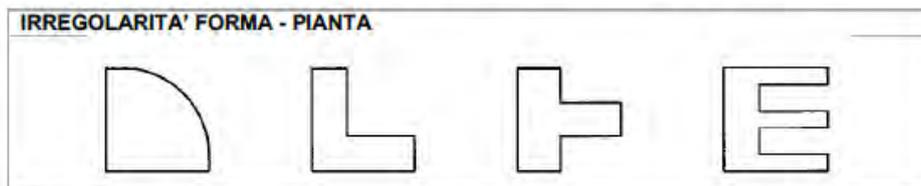
- *Struttura a telai in c.a. in due direzioni:* quando è presente una struttura sismo-resistente a telai (secondo la definizione delle norme tecniche al punto 7.4.3.1) nelle due direzioni ortogonali;
- *Struttura a telai in c.a. in una sola direzione:* quando è presente una struttura sismo-resistente a telai (secondo la definizione delle norme tecniche al punto 7.4.3.1) in una sola direzione;
- *Struttura a pareti in c.a. in due direzioni:* quando è presente una struttura sismo-resistente a pareti (secondo la definizione delle norme tecniche al punto 7.4.3.1) nelle due direzioni ortogonali;

Figura 92. Manuale di compilazione scheda: parte 2

- *Struttura a pareti in c.a. in una sola direzione*: quando è presente una struttura sismo-resistente a pareti (secondo la definizione delle norme tecniche al punto 7.4.3.1) in una sola direzione;
- *Struttura mista telaio-pareti*: quando è presente una struttura sismo-resistente mista telaio-pareti (secondo la definizione delle norme tecniche al punto 7.4.3.1);
- *Struttura a nucleo*: quando è presente una struttura a telaio abbinata ad un nucleo in c.a., il quale costituisce il vano scale/ascensore. Questo, se posto in posizione eccentrica rispetto al centro di massa dell'edificio, conferisce irregolarità in pianta alla struttura.



**Criticità di Geometria (CG) - Irregolarità di forma in pianta:** Indica la presenza di piante non dotate di due assi di simmetria ortogonale, ad esempio realizzate a L, T, U, E, P.

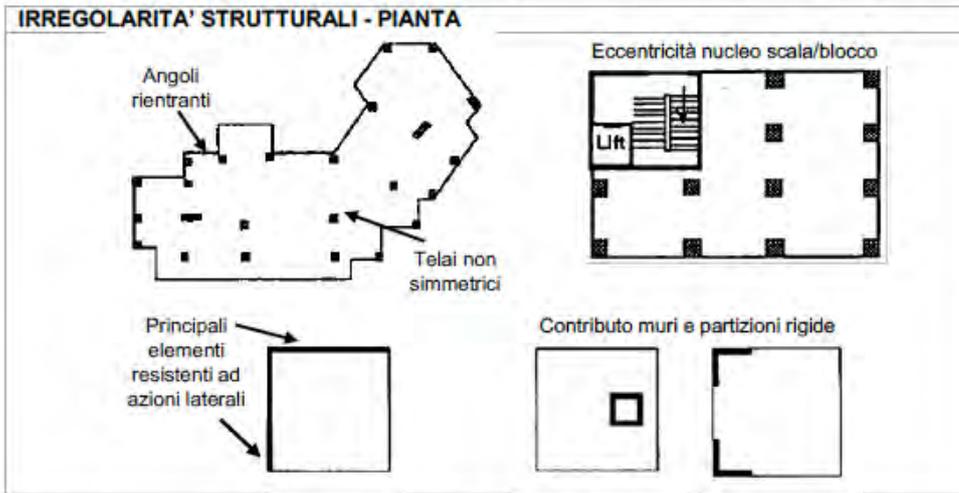


**Criticità di Geometria (CG) - Irregolarità strutturali in pianta:** Indica la presenza di irregolarità in pianta legate al sistema strutturale in calcestruzzo armato:

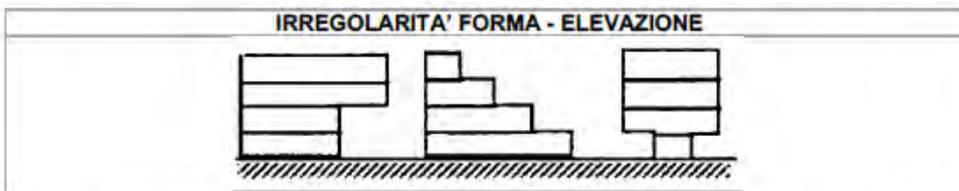
- *Telai non simmetrici o mal distribuiti*: quando la disposizione in pianta dei telai nelle due direzioni principali è tale da non garantirne la simmetria o regolarità nella distribuzione;
- *Presenza di angoli rientrati*: quando la pianta dell'edificio presenta angoli rientranti con proiezione superiore al 20% della dimensione planimetrica della struttura in quella direzione;
- *Pilastrini di dimensioni molto diverse*: quando le dimensioni geometriche dei pilastrini a livello di piano presentano elevate variazioni;
- *Distanza tra gli elementi resistenti al carico laterale*: nel caso di edifici con pianta lunga e stretta, è richiesto un giudizio sulla criticità legata a tale aspetto (bassa, media, alta) in base alla distanza tra gli elementi che resistono ad azioni laterali (se  $\leq 2$ ,  $> 2$ , o  $> 4$  volte la larghezza in pianta dell'edificio);
- *Distribuzione disuniforme ed eccentrica dei pesi*: quando la distribuzione dei pesi, quali pesi propri, sovraccarichi, etc., non è uniforme in pianta;
- *Disposizione eccentrica rispetto agli assi di simmetria della pianta di nucleo scala e/o blocco ascensore*: quando il nucleo scala e/o blocco ascensore ha una posizione eccentrica in pianta rispetto agli assi di simmetria (dissimmetria tra baricentro delle masse e delle rigidità);
- *Effetti torcenti, nel caso di edifici ad angolo*: nel caso di edifici ad angolo (e.g. pianta ad L), è richiesto un giudizio sulla criticità legata a tale aspetto (bassa, media, alta) in base alla distanza tra centro di massa e centro di rigidità (se  $\leq 0.3$ ,  $> 0.3$ , o  $> 0.5$  della larghezza dell'edificio);

Figura 93. Manuale di compilazione scheda: parte 3

- **Influenza legata alla presenza di scale, rampe, muri, partizioni rigide:** è richiesto un giudizio sulla criticità legata alla presenza di tali elementi (bassa, media, alta) tenendo conto della loro configurazione in pianta e quindi del loro possibile contributo alla risposta dell'edificio.



**Criticità di Geometria (CG) - Irregolarità di forma in elevazione:** Indica la presenza di macroscopiche variazioni di superficie ( $\pm 30\%$ ) con l'altezza, che creano evidenti sporgenze o rientranze.



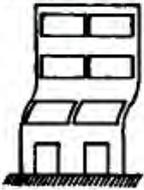
**Criticità di Geometria (CG) - Irregolarità strutturali in elevazione:** Indica la presenza di irregolarità in elevazione legate al sistema strutturale in calcestruzzo armato:

- **Presenza di travi forti/solette pesanti a fronte di pilastri esili:** quando il sistema strutturale è caratterizzato dalla presenza di travi di altezza elevata rispetto ai pilastri di esili dimensioni;
- **Pilastri che non proseguono per tutta l'altezza della struttura:** quando sono presenti dei pilastri che non proseguono per tutta l'altezza dell'edificio, ma si arrestano ad un certo livello;
- **Pilastri in falso:** quando sono presenti travi e solette su cui poggiano elementi in falso (pilastri o pareti), ossia elementi che non continuano al livello inferiore;
- **Variazioni di rigidezza:** è richiesto un giudizio sulla criticità legata a tale aspetto (bassa, media, alta) in base alla rigidezza laterale di ogni piano, se  $\geq 0.9$ ,  $< 0.9$ ,  $< 0.7$  della rigidezza laterale del piano sovrastante/sottostante;
- **Variazioni di massa:** è richiesto un giudizio sulla criticità legata a tale aspetto (bassa, media, alta) in base alla massa di ogni piano, se  $\geq 0.9$ ,  $< 0.9$ ,  $< 0.7$  della massa del piano sovrastante/sottostante;
- **Discontinuità degli elementi resistenti ad azioni laterali:** è richiesto un giudizio sulla criticità (bassa, media, alta) legata alla discontinuità degli elementi strutturali che contribuiscono alla risposta ( $\leq 10\%$ ,  $> 10\%$ ,  $> 30\%$ ) del sistema resistente ad azioni laterali.
- **Presenza di maccanismi di pilastro corto:** quando sono presenti pilastri tozzi, a causa di conformazioni strutturali. E' richiesto un giudizio sulla criticità legata a tale aspetto (bassa, media, alta) in base a quanti pilastri corti sono individuati nella struttura (nessuno o isolato,  $> 60\%$ , o  $> 80\%$  su un lato oppure piano dell'edificio).

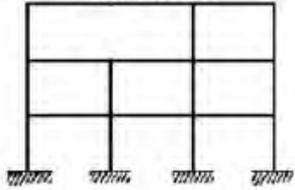
Figura 94. Manuale di compilazione scheda: parte 4

**IRREGOLARITA' STRUTTURALE - ELEVAZIONE**

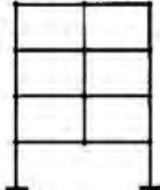
Travi forti/pilastrini esili



Pilastrini discontinui



Pilastrini in falso

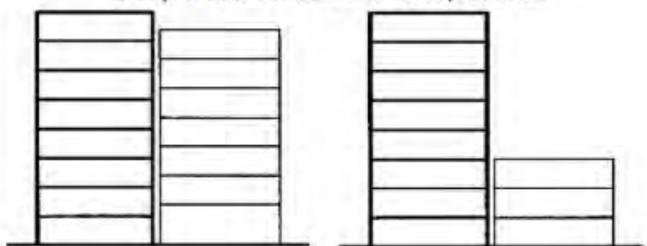


**Criticità di Geometria (CG) - Giunti strutturali:**  
**Presenza di giunti strutturali:** indica la presenza o meno di giunti strutturali tra corpi adiacenti;  
**Dimensione dei giunti strutturali:** quando sono presenti dei giunti strutturali, indicare le dimensioni (in mm) del giunto. Nel caso di giunti di dimensione diversa, indicare il più piccolo.

**Criticità di Geometria (CG) - Martellamento:** quando la differenza in altezza tra corpi adiacenti è maggiore del 20% dell'altezza di interpiano del corpo preso in esame, è richiesto un giudizio sulla criticità legata all'effetto martellamento (bassa, media, alta). Questo giudizio viene espresso in base al confronto tra la distanza tra edifici adiacenti e l'altezza del livello preso in considerazione.

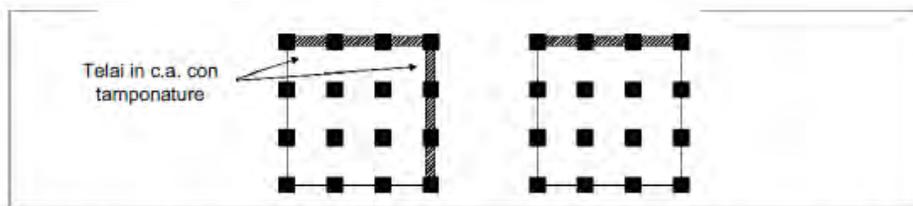
**POSSIBILI EFFETTI DI MARTELLAMENTO**

Esempi di distanza insufficiente tra corpi adiacenti

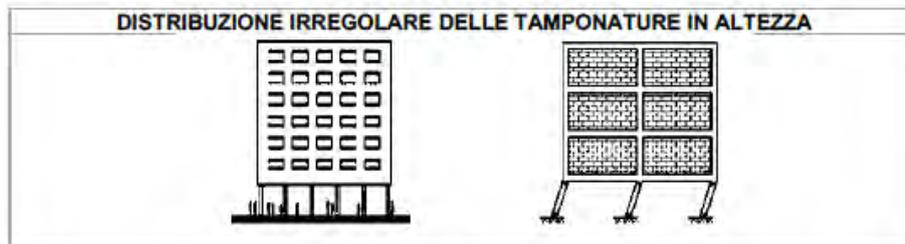


**Criticità Distribuzione Tamponature (CT):**  
**Distribuzione irregolare delle tamponature in pianta:** Indica che le tamponature esterne non sono disposte su tutta la maglia strutturale e/o che la tipologia delle tamponature utilizzate è significativamente differente. Tali dissimmetrie possono aumentare gli effetti di rotazione dei piani favorendo l'incremento delle sollecitazioni e degli spostamenti su pochi elementi strutturali.

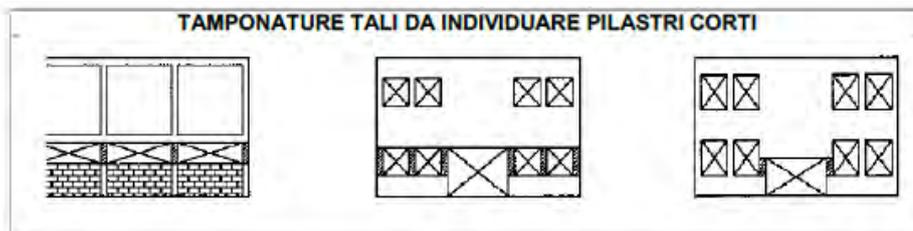
Figura 95. Manuale di compilazione scheda: parte 5



**Distribuzione irregolare delle tamponature sull'altezza dell'edificio:** Indica che la maglia strutturale non è chiusa dalle tamponature su tutti i livelli. Si possono in tal caso determinare concentrazioni di danno ad alcuni piani caratterizzati da una significativa riduzione dei tamponamenti.



**Tamponature tali da individuare pilastri corti:** Indica la presenza di una distribuzione parziale delle tamponature in altezza sul pilastro (pilastri corti), come avviene, ad esempio, nel caso di finestre a nastro. Può determinare un aumento delle forze di taglio su detti pilastri a causa della loro maggiore rigidità, ed una maggiore fragilità degli stessi.



**Tamponature senza misure a contrasto di collassi fragili ed espulsione in direzione perpendicolare al pannello:** Indica la presenza di tamponature senza misure a contrasto di collassi fragili ed espulsione in direzione perpendicolare al pannello; queste costituiscono una particolare sorgente di rischio in caso di sisma perché possono determinare la caduta di masse significative. Ricadono in questa categoria, ad esempio, le tamponature che non sono collegate alla struttura portante o che non hanno sufficiente resistenza fuori dal piano.

**Criticità Materiali (Mat):**

**Scarsa qualità dei materiali:** Indica la presenza di materiali da costruzione con scarse caratteristiche meccaniche se confrontate con quelle dei materiali da nuova progettazione (NTC'18 cap. 7.6.1). In generale le principali caratteristiche meccaniche d'interesse sono:

- la resistenza a compressione del calcestruzzo;
- la resistenza a snervamento dell'acciaio.

Le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio possono essere dedotte da:

- tavole storiche di progetto

Figura 96. Manuale di compilazione scheda: parte 6

- documentazione storica di progetto
- valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca
- osservazione in-situ della qualità dei materiali
- prove in-situ

**Presenza di barre lisce:** Indica la presenza di barre di armatura lisce. In assenza di più specifiche informazioni, è possibile dedurre la presenza o meno di barre di armatura lisce in accordo con la normativa e la pratica costruttiva dell'epoca. Nel caso di barre di armatura liscia potrebbe non essere garantita l'aderenza con il calcestruzzo e potrebbero verificarsi fenomeni di scorrimento delle barre con conseguente riduzione della capacità flessionale degli elementi strutturali.

**Presenza di fenomeni di deterioramento - corrosione delle barre di armatura:** Indica la presenza di fenomeni di deterioramento delle barre di armatura. Nel caso di elementi strutturali in c.a., i fenomeni di corrosione possono presentarsi sotto forma di:

- presenza di fenomeni di percolazione del calcestruzzo;
- inadeguato spessore del copriferro;
- presenza diffusa di fessurazione nel calcestruzzo lungo le direzioni delle armature longitudinali e trasversali;
- evidenti distacchi del copriferro e barre di armatura esposte e visibilmente ossidate.

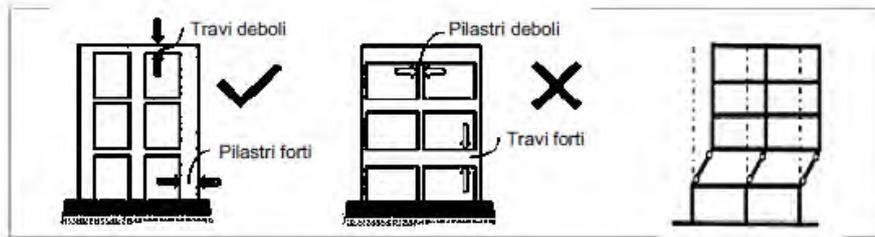
**Presenza di fenomeni di deterioramento - degrado del calcestruzzo:** Indica la presenza di fenomeni di deterioramento degli elementi strutturali dovuti ad un degrado del calcestruzzo.



**Criticità Dettagli Costruttivi (CDC) - Assenza principi di gerarchia di resistenza:**

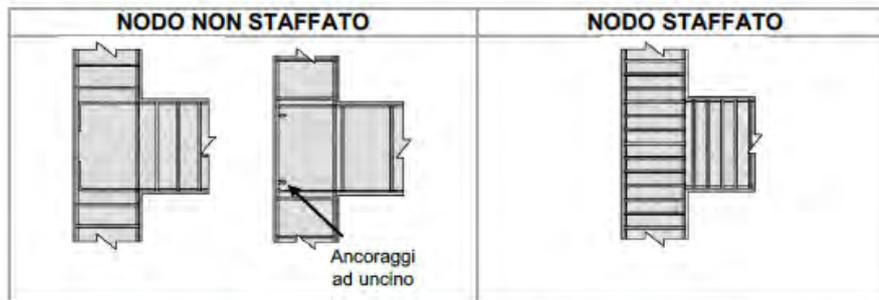
- *Presenza di travi forti e pilastri deboli:* Indica una generale assenza di principi di gerarchia di resistenza, ovvero la presenza di travi forti e pilastri deboli. Tale criticità può essere individuata da considerazione geometriche e di armatura e sulla base di disegni/prospetti, nonché da ispezioni in-situ. Questo comporterebbe il verificarsi della formazione di un meccanismo poco duttile, con conseguente criticità per la struttura;
- *Possibile meccanismo di piano soffice:* Indica la presenza di un piano con rigidezza significativamente inferiore rispetto agli altri piani (vedi anche distribuzione irregolare delle tamponature in altezza). In questo caso potrebbe verificarsi un meccanismo di piano soffice, molto critico per la prestazione sismica della struttura.
- *Assenza di gerarchia negli elementi strutturali:* Indica una possibile rottura a taglio (rottura fragile) degli elementi strutturali dovuta ad una assenza principi di progettazione "in gerarchia". In generale, una rottura a taglio ha maggiore probabilità di verificarsi nel caso di inadeguato quantitativo di armatura trasversale e/o presenza di elementi tozzi (vedi anche "Tamponature tali da individuare pilastri corti"). Per individuare questa criticità è necessario fare riferimento a considerazioni di armatura e geometria, basandosi su disegni/prospetti disponibili.

Figura 97. Manuale di compilazione scheda: parte 7



**Criticità Dettagli Costruttivi (CDC) - Criticità nel pannello nodale:**

- *Assenza di staffe nel nodo:* Indica l'assenza o un quantitativo visibilmente insufficiente di armatura trasversale nel pannello nodale. In questo caso, il pannello nodale risulta un elemento particolarmente vulnerabile in presenza di azione sismica e può compromettere la prestazione sismica della struttura.
- *Presenza di ancoraggi ad uncino:* Indica che le barre longitudinali presentano un ancoraggio "ad uncino" nel pannello nodale. Questa tipologia di ancoraggio è particolarmente critica in presenza di azione sismica e può portare ad una rottura a taglio del pannello unita all'espulsione di un cuneo di calcestruzzo che può compromettere la capacità della struttura nei confronti dei carichi gravitazionali.

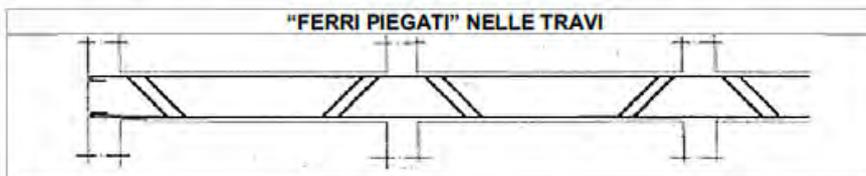


**Criticità Dettagli Costruttivi (CDC) - Inadeguati dettagli di armatura negli elementi strutturali:**

- *Scarso rinforzo a taglio:* Indica uno scarso quantitativo di armatura trasversale negli elementi strutturali se confrontato con i requisiti da nuova progettazione (NTC'18 cap. 7.4.6.2). In questo caso si ha una maggiore probabilità di rotture a taglio (rotture fragili).
- *Calcestruzzo poco confinato:* Indica la presenza di inadeguati dettagli costruttivi che comportano un basso confinamento del calcestruzzo, quindi una scarsa capacità di duttilità degli elementi strutturali. Generalmente si ha un basso confinamento del calcestruzzo nel caso di un inadeguato quantitativo di armatura longitudinale e trasversale.
- *Limitata lunghezza di ancoraggio delle barre:* Indica che la lunghezza di ancoraggio utilizzata è inadeguata se confrontata con i requisiti di nuova progettazione (NTC2018 cap. 7.4.6.2). Questa criticità può comportare fenomeni di scorrimento delle barre di armatura.
- *Inadeguata sovrapposizione delle barre:* Indica che la lunghezza di sovrapposizione utilizzata è inadeguata se confrontata con i requisiti di nuova progettazione (NTC2018 cap. 7.4.6.2). Inoltre, indica la presenza di sovrapposizione delle barre in zone non idonee, come ad esempio in corrispondenza delle zone dissipative. Questa criticità può comportare fenomeni di scorrimento delle barre di armatura.
- *Presenza di ferri piegati nelle travi:* Indica la presenza di barre di armatura longitudinali inclinate nelle travi, usate come rinforzo a taglio in accordo con la pratica costruttiva

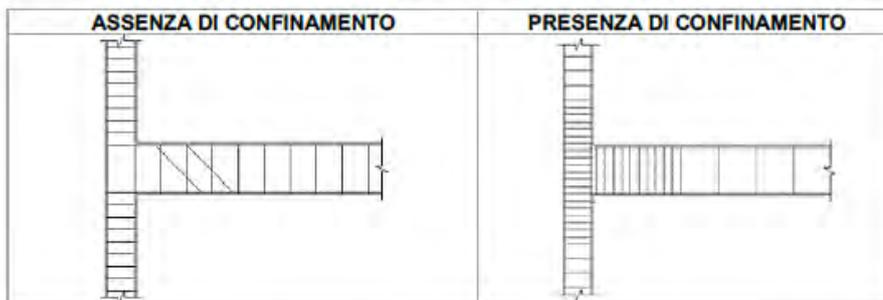
Figura 98. Manuale di compilazione scheda: parte 8

dell'epoca. Questo tipo di rinforzo a taglio risulta inefficace in presenza di azione sismica, causa dell'inversione del diagramma dei momenti.



- **Bassi rapporti geometrici relativi all'armatura longitudinale:** Indica la presenza di un basso quantitativo di armatura longitudinale negli elementi strutturali e/o la presenza di inadeguati dettagli costruttivi se confrontati con i requisiti di nuova progettazione (NTC2018 cap. 7.4.6.2). In questo caso, la capacità flessionale degli elementi strutturali può risultare inadeguata.

**Criticità Dettagli Costruttivi (CDC) - Assenza di confinamento nelle zone critiche degli elementi strutturali:** Indica la presenza di un insufficiente quantitativo di armatura trasversale nelle zone dissipative se confrontato con i requisiti di nuova progettazione (NTC2018 cap. 7.4.6.2). Questa criticità può comportare una riduzione di capacità di duttilità del sistema strutturale.



**Criticità Diaframma orizzontale (SO):**

**Presenza di una soletta di calcestruzzo eventualmente armata:** Indicare se presente o meno in accordo con la tipologia di solaio individuata.

**Presenza di elementi resistente a trazione e compressione (travetti) e di un sistema di elementi controventati, anche solamente reagenti a trazione (barre d'acciaio) oppure una griglia di elementi resistenti a trazione e compressione (travetti nei due sensi) ben connessi tra loro:** Indicare se presente o meno in accordo con la tipologia di solaio individuata.

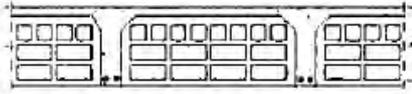
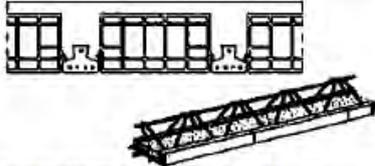
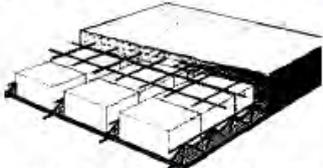
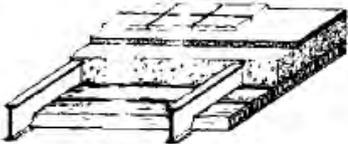
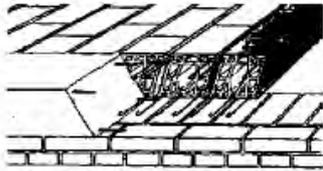
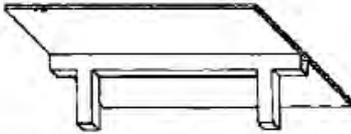
**Presenza di connessioni saldate o incollate o chiodate o costituite da giunti organizzati fra elementi prefabbricati funzionanti singolarmente come lastre (pannelli):** Indicare se presente o meno in accordo con la tipologia di solaio individuata.

**Presenza di getti di cemento armato di collegamento:** Indicare se presente o meno in accordo con la tipologia di solaio individuata.

**Presenza di connessioni chiodate, saldate, incollate e ancorate all'interno o all'esterno degli elementi resistenti:** Indicare se presente o meno in accordo con la tipologia di solaio individuata.

**Tipologia Solai (SO):** Individuare la tipologia di solaio presente nell'unità strutturale tra quelle indicate.

Figura 99. Manuale di compilazione scheda: parte 9

<p><b>SOLAI IN LATERO-CEMENTO GETTATI IN OPERA</b></p> 	<p><b>SOLAI IN LATERO-CEMENTO A TRAVETTI PREFABBRICATI E BLOCCHI IN LATERIZIO INTERPOSTI</b></p> 
<p><b>SOLAI IN LATERO-CEMENTO CON LASTRE IN C.A. E BLOCCHI DI ALLEGGERIMENTO</b></p> 	<p><b>SOLAI IN LATERO-CEMENTO A PANNELLI PREFABBRICATI</b></p> 
<p><b>SOLAI IN LATERO-CEMENTO ALVEOLARI</b></p> 	<p><b>SOLAI IN LATERO -CEMENTO TIPO SAP</b></p> 
<p><b>SOLAI IN CEMENTO ARMATO A SOLETTA PIENA</b></p> 	<p><b>SOLAI IN CEMENTO ARMATO ALVEOLARI</b></p> 

**Orditura (predominante) del solaio (SO):** Indicare l'orditura predominante del solaio.

**Tipologia di copertura (SO):** Individuare la tipologia di copertura tra quelle indicate. Da un punto di vista operativo valgono le seguenti considerazioni:

- Riguardo al peso si intendono generalmente leggere coperture in acciaio o legno (salvo il caso di lastre o tegole pesanti, ad esempio in pietra naturale); coperture pesanti sono invece quelle in cemento armato.
- Riguardo all'effetto spingente si terrà conto dello schema statico della copertura (appoggi su muri di spina, travi rigide di colmo, capriate a spinta eliminata) e della eventuale presenza e/o efficacia di elementi di contrasto o equilibrio delle spinte orizzontali (cordoli, catene).

Per maggiore chiarezza si rimanda al "Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)".

**Dati Dimensionali (Dim):**

**Elementi portanti - strutture orizzontali solai – spessore:** Inserire il valore dello spessore (in mm) dei solai d'interpiano. Per spessore si intende lo spessore totale del solaio.

Figura 100. Manuale di compilazione scheda: parte 10

**Elementi portanti - strutture orizzontali coperture - spessore:** Inserire il valore dello spessore (in mm) del solaio di copertura. Per spessore si intende lo spessore totale del solaio.

**Solaio - armatura - maglia elettrosaldata:** Inserire il quantitativo di armatura (area in mm<sup>2</sup>) utilizzato per la realizzazione della rete elettrosaldata.

**Solaio - armatura - spezzoni d'acciaio:** Inserire il quantitativo di armatura longitudinale (area in mm<sup>2</sup>) presente nel solaio.

**Altezza media d'interpiano:** Indicare l'altezza (in metri) che meglio approssima la media delle altezze di piano presenti.

**Numero piani:** Indicare il numero di piani complessivi dell'edificio dallo spiccato di fondazioni incluso quello di sottotetto solo se praticabile. Computare interrati i piani mediamente interrati per più di metà della loro altezza.

**Superficie media di piano:** Indicare la superficie (in m<sup>2</sup>) che meglio approssima la media delle superfici di tutti i piani.

**Larghezza totale dell'edificio:** Indicare (in metri) la larghezza totale dell'edificio in pianta

**Lunghezza totale dell'edificio:** Indicare (in metri) la lunghezza totale dell'edificio in pianta

**Successivamente alla costruzione, sono stati effettuati interventi di adeguamento:** Indicare se sono stati effettuati interventi di adeguamento sismico alla struttura. Da NTC2018, cap. 8.4: *Interventi di adeguamento: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, conseguendo i livelli di sicurezza fissati al § 8.4.3.*

**Successivamente alla costruzione, sono stati effettuati interventi di miglioramento:** Indicare se sono stati effettuati interventi di miglioramento sismico alla struttura. Da NTC2018, cap. 8.4: *Interventi di miglioramento: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza fissati al § 8.4.3;*

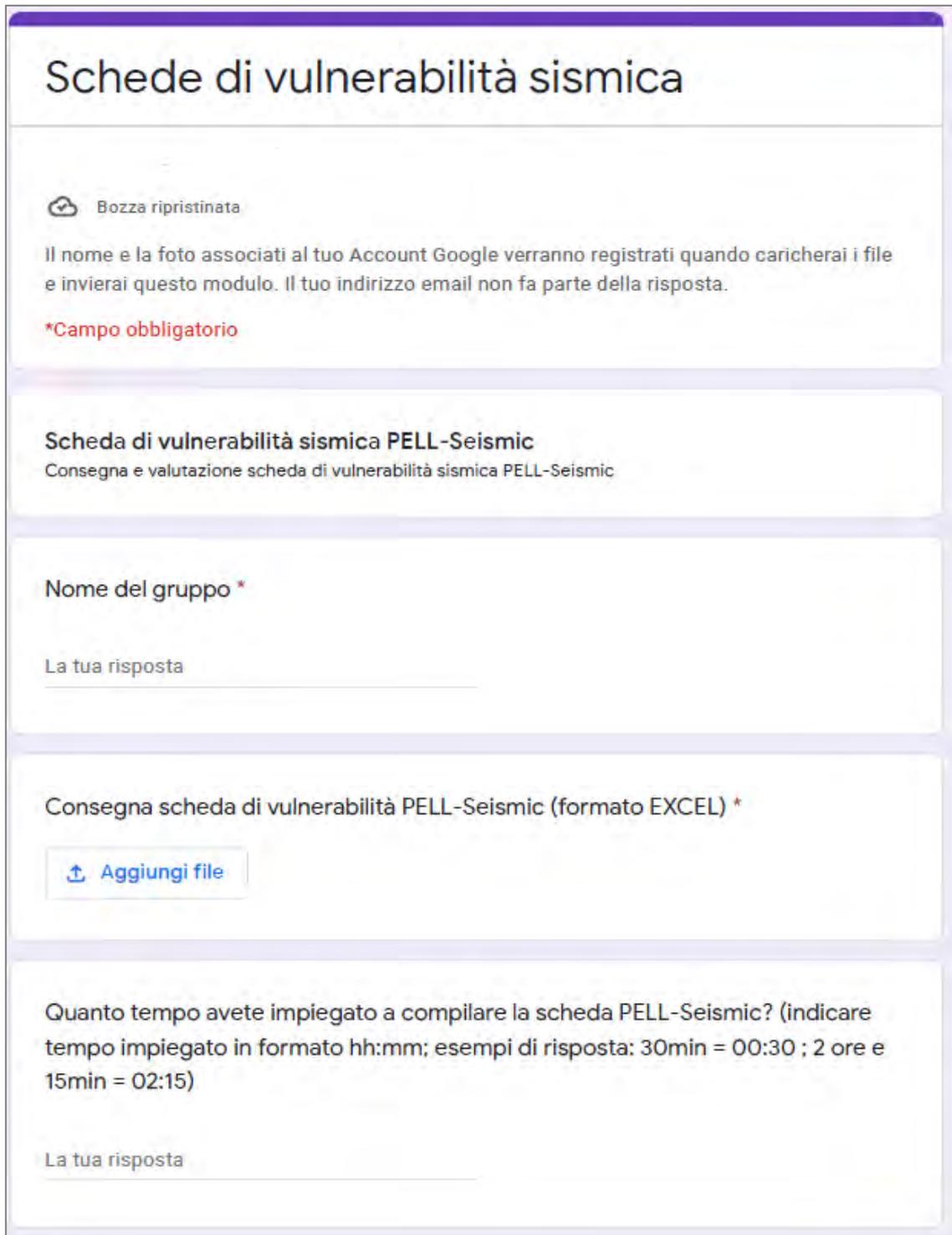
**Dati Interventi - Descrizione dell'intervento di miglioramento/adeguamento:** Nel caso siano stati effettuati interventi di miglioramento o di adeguamento, descrivere in maniera dettagliata la tipologia di intervento effettuato. In particolare, descrivere:

- La tecnica di riabilitazione strutturale utilizzata (FRP, incamiciatura pilastri ecc.);
- Indicare gli elementi strutturali coinvolti nell'intervento di miglioramento/adeguamento;
- Commentare l'efficacia di questi interventi nonché il loro stato di conservazione.

Figura 101. Manuale di compilazione scheda: parte 11

## 8 Appendice B: Modulo Google per raccolta e validazione scheda PELL-School-RS

In questa appendice si riportano in Figura 102-104 le schermate relative al Modulo Google realizzato per la consegna e validazione della scheda PELL-School-RS.



**Schede di vulnerabilità sismica**

Bozza ripristinata

Il nome e la foto associati al tuo Account Google verranno registrati quando caricherai i file e invierai questo modulo. Il tuo indirizzo email non fa parte della risposta.

**\*Campo obbligatorio**

**Scheda di vulnerabilità sismica PELL-Seismic**  
Consegna e valutazione scheda di vulnerabilità sismica PELL-Seismic

Nome del gruppo \*

La tua risposta

Consegna scheda di vulnerabilità PELL-Seismic (formato EXCEL) \*

⬆️ Aggiungi file

Quanto tempo avete impiegato a compilare la scheda PELL-Seismic? (indicare tempo impiegato in formato hh:mm; esempi di risposta: 30min = 00:30 ; 2 ore e 15min = 02:15)

La tua risposta

Figura 102. Modulo Google per consegna e validazione scheda: Parte 1

Avete avuto difficoltà nella compilazione della scheda PELL-Seismic? \*

Sì

No

Altro: \_\_\_\_\_

---

Quanto ritenete che è stato complesso compilare la scheda PELL-Seismic? \*

1      2      3      4      5

Molto facile                                    Molto complesso

---

La scheda PELL-Seismic nasce con l'obbiettivo di implementare la procedura SLaMA per una valutazione di vulnerabilità sismica di 1° livello di edifici scolastici. Ritenete che i dati richiesti siano sufficienti per l'implementazione della procedura SLaMA? (nel caso di risposta negativa, indicare i dati che ritenete mancanti) \*

La tua risposta \_\_\_\_\_

---

Ritenete che il manuale di compilazione scheda sia stato utile? \*

Sì, è stato decisamente necessario per la compilazione della scheda

Sì, è stato di supporto per la compilazione di alcune sezioni specifiche della scheda

No, saremmo riusciti a compilare la scheda anche senza il supporto del manuale

Non lo abbiamo consultato, la scheda era chiara e di facile compilazione

Figura 103. Modulo Google per consegna e validazione scheda: Parte 2

Giudizio generale della scheda PELL-Seismic \*

1      2      3      4      5

Molto negativo                        Molto positivo

Commento generale sulla scheda PELL-Seismic \*

La tua risposta

Come ritenete possa essere migliorata la scheda PELL-Seismic? \*

La tua risposta

Figura 104. Modulo Google per consegna e validazione scheda: Parte 3

## 9 Riferimenti bibliografici

- [1] [Ministero delle Infrastrutture, “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, NTC, Supplemento ordinario n°8 alle G.U. n° 42 del 20/02/2018, serie generale, 2018.
- [2] S. Pampanin, “Reality-check and renewed challenges in earthquake engineering: Implementing low-damage structural systems—From theory to practice”, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake* 45(4): 137–160, 2012.
- [3] C. Doglioni, S. Pampanin, “La prevenzione sismica è questione di cultura. Ne "vale" la pena”, *HuffPost*, [https://www.huffingtonpost.it/entry/la-prevenzione-sismica-e-questione-di-cultura-ne-vale-la-pena\\_it\\_5d91afc0e4b0019647ab0589](https://www.huffingtonpost.it/entry/la-prevenzione-sismica-e-questione-di-cultura-ne-vale-la-pena_it_5d91afc0e4b0019647ab0589), 2019.
- [4] S. Pampanin, “Valutazione della vulnerabilità, classificazione sismica, strategie di rinforzo e riduzione del rischio sismico di edifici esistenti in calcestruzzo armato. Parte I: Progettazione sismica prestazionale e resilienza”, *Structural*, 210, 2017.
- [5] S. Pampanin, “Valutazione della vulnerabilità, classificazione sismica, strategie di rinforzo e riduzione del rischio sismico di edifici esistenti in calcestruzzo armato. Parte II: Metodologie di valutazione della vulnerabilità e classificazione sismica”, *Structural*, 211, 2017.
- [6] S. Pampanin, “Valutazione della vulnerabilità, classificazione sismica, strategie di rinforzo e riduzione del rischio sismico di edifici esistenti in calcestruzzo armato. Parte III: Strategie e tecniche di rinforzo”, *Structural*, 213, 2017.
- [7] S. Pampanin & M. Russo, “RISE – (Verso un) Piano Nazionale Coordinato di Riqualificazione Integrata Sismico-Energetica del Patrimonio Edilizio e dei Sistemi Territoriali”, *Atti della giornata di lavoro*, <http://www.rede-research.eu/it/rise-2/>, Roma, Italia, 27 ottobre 2020.
- [8] S. Pampanin, “Sicurezza sismica e sostenibilità: strategie e soluzioni per una riqualificazione integrata del patrimonio edilizio”, in *Rapporto Annuale 2019 Efficienza Energetica*, ENEA, Dipartimento Unità per l’Efficienza Energetica (Supervisor Ilaria Bertini, Project Leader Alessandro Federici) Sezione 5.6 (pp. 106-110), 2019.
- [9] New Zealand Society for Earthquake Engineering NZSEE, “The Seismic Assessment of Existing Building – Technical Guidelines for Engineering Assessments”, *Normative neozelandesi*, 2017.
- [10] DM 65, “Sisma Bonus - Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni e i relativi allegati”, *Modifiche all'articolo 3 del DM 58 del 28/02/2017*, *Normative italiane*.
- [11] DPR 89/2009, “Revisione dell'assetto ordinamentale, organizzativo e didattico della scuola dell'infanzia e del primo ciclo di istruzione ai sensi dell'articolo 64, comma 4, del decreto-legge 25 giugno 2008, n. 112, convertito, con modificazioni, dalla legge 6 agosto 2008, n. 133. GU n. 162 del 15-07-2009”, 2009.
- [12] DPR 89/2010, “Regolamento recante revisione dell'assetto ordinamentale, organizzativo e didattico dei licei a norma dell'articolo 64, comma 4, del decreto-legge 25 giugno 2008, n. 112, convertito, con modificazioni, dalla legge 6 agosto 2008, n. 133. GU n. 137 del 15-06-2010”, 2010.
- [13] DPR 275/1999, “Regolamento recante norme in materia di autonomia delle istituzioni scolastiche, ai sensi dell'art. 21 della legge 15 marzo 1997, n. 59. GU n. 186 del 10-08-1999”, 1999.
- [14] M. Sole, “Manuale di Edilizia Scolastica. NIS – La nuova Italia Scientifica”, 1995.
- [15] F.E. Leschiutta, “Linee Evolutive dell'Edilizia Scolastica. Vicende, Norme, Tipi, 1949-1974”, *Bulzoni Editore*, 1975.
- [16] Legge 373/1976, “Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici”, *GU n. 148 del 07-06-1976*, 1976.

- [17] S. Pampanin, A. Vallati, E. Currà, “Analisi sismo-energetiche di edifici pubblici nella provincia di Foggia e strategie di interventi integrati di miglioramento”, Report finale - Progetto UEFA/ELENA, 2020.
- [18] Legambiente, “Ecosistema Scuola - XX Rapporto sulla qualità dell’edilizia scolastica e dei servizi”, 2021.
- [19] Legge 23/1996, “Norme per l’edilizia scolastica. GU n. 15 -Serie generale- del 19/01/1996”, 1996.
- [20] DL n. 162, “Disposizioni urgenti in materia di proroga di termini legislativi, di organizzazione delle pubbliche amministrazioni, nonché di innovazione tecnologica”, 30 dicembre 2019.
- [21] DL n. 8, “Nuovi interventi urgenti in favore delle popolazioni colpite dagli eventi sismici del 2016 e del 2017”, 9 febbraio 2017.
- [22] Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR), “Rapporto Nazionale sullo Stato Dell’Edilizia Scolastica”, 2012.
- [23] Associazione Nazionale Costruttori Edili (ANCE), “Audizione dell’ANCE sulla Situazione dell’Edilizia Scolastica in Italia”, Indagine conoscitiva della Commissione VIIa della Camera dei Deputati, 2013.
- [24] Presidenza del Consiglio dei Ministri, OPCM 3274 “Primi Elementi in Materia di Criteri Generali per la Classificazione Sismica del Territorio Nazionale e di Normative Tecniche per le Costruzioni in Zona Sismica”, 2003.
- [25] Legge 64/1974, “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”. GU n. 76 del 21/03, 1974.
- [26] Ministero delle Infrastrutture, “Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, NTC, DM 14 gennaio 2008, Gazzetta ufficiale n.29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n.30, 2008.
- [27] Presidenza del Consiglio dei Ministri, “Circolare sullo stato delle verifiche sismiche previste dall’OPCM 3274/03 e programmi futuri”, circolare DPC/SISM n. 31471 del 21/4/2010, Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 2010.
- [28] Presidenza del Consiglio dei Ministri, “Archiviazione e trasmissione dei dati delle schede di livello 0, 1 e 2 delle verifiche sismiche di opere strategiche e rilevanti effettuate in conformità alle circolari del Capo Dipartimento della Protezione Civile Nazionale prot. n.DPC/SISM/31471 del 21.4.2010, prot. N. DPC/SISM/75499 del 7/10/2010 e prot. N. DPC/SISM/83283 del 4/11/2010”, DPC circolare /SISM/0092847 del 09/12/2010, Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 2010.
- [29] Presidenza del Consiglio dei Ministri, “Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell’emergenza post-sismica (AeDES)”, Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 2009.
- [30] S. Pampanin, G.M. Calvi, M. Moratti, “Seismic behavior of RC beam-column joints designed for gravity only”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londra, UK, settembre 9-13, 2002
- [31] R. Gentile, C. Galasso, S. Pampanin, “Material Property Uncertainties versus Joint Structural Detailing: Relative Effect on the Seismic Fragility of Reinforced Concrete Frames”, Journal of Structural Engineering 147 (4): 04021007, 2021.
- [32] S. Bianchi, J. Ciurlanti, S. Pampanin, “A SLaMA-Based Analytical Procedure for the Cost/Performance-Based Evaluation of Buildings” In COMPDYN Proceedings, Creta, Grecia, 24-26 giugno 2019.
- [33] C. Del Vecchio, R. Gentile, S. Pampanin, “The Simple Lateral Mechanism Analysis (SLaMA) for the seismic performance assessment of a case study building damaged in the 2011 Christchurch Earthquake”, University of Canterbury, Department of Civil and Natural Resources Engineering, Research Report 2016–02, New Zealand, ISSN 1172–9511, 2017.

- [34] C. Del Vecchio, R. Gentile, M. Di Ludovico, G. Uva, S. Pampanin, “Implementation and Validation of the Simple Lateral Mechanism Analysis (SLaMA) for the Seismic Performance Assessment of a Damaged Case Study Building”, *Journal of Earthquake Engineering*, 2018.
- [35] R. Gentile, C. Del Vecchio, S. Pampanin, D. Raffaele, G. Uva, “Refinement and Validation of the Simple Lateral Mechanism Analysis (SLaMA) Procedure for RC Frames”, *Journal of Earthquake Engineering*, 2019.
- [36] R. Gentile, S. Pampanin, D. Raffaele, G. Uva, “Non-Linear Analysis of RC Masonry-Infilled Frames Using the SLaMA Method: Part 1—Mechanical Interpretation of the Infill/Frame Interaction and Formulation of the Procedure”, *Bulletin of Earthquake Engineering* 17 (6), 2019.
- [37] R. Gentile, S. Pampanin, D. Raffaele, G. Uva, “Non-Linear Analysis of RC Masonry-Infilled Frames Using the SLaMA Method: Part 2—Parametric Analysis and Validation of the Procedure”, *Bulletin of Earthquake Engineering* 17 (6), 2019.
- [38] C. Sansoni, “Seismic Vulnerability Assessment of Existing URM Structures through a Simplified Analytical Method”, *Tesi di Dottorato*, 2021.
- [39] S. Pampanin, “Simplified Analytical/Mechanical Procedure for Post-Earthquake Safety Evaluation and Loss Assessment of Buildings” *Springer Tracts in Civil Engineering*, 3–25, 2021.
- [40] G. Grunthal, “European Macroseismic Scale”, *European Seismological Commission, Conseil de l’Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Vol. 15, Luxembourg, 1998.
- [41] Computers and Structures Inc. (CSI), “SAP2000 v10 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”, Berkeley, 2004.
- [42] Applied Technology Council (ATC), “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings”, ATC 40, Redwood City, CA, USA, 1996
- [43] Consiglio dei Ministri, “Regio Decreto Legge n. 2229 del 16/11/1939”, *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* n.92, 18/04/1940, 1939.
- [44] S.T.A.DATA, “3MURI – Seismic calculation of masonry structures according to the Italian Ministerial Decree 14/01/2008 New technical codes for constructions”, 2016.
- [45] G.M. Calvi, L. Sousa, C. Ruggeri, “Energy Efficiency and Seismic Resilience: A Common Approach”, *Multi-Hazard Approaches to Civil Infrastructure Engineering*, 2016.
- [46] A. Baird, A. Palermo, S. Pampanin, “Façade damage assessment of multi-storey buildings in the 2011 Christchurch earthquake”, *Bulletin of New Zealand Society of Earthquake Engineering*, 44(4): 368-376, 2011.
- [47] R.P. Dhakal, G.A. MacRae, A. Pourali, G. Paganotti, “Seismic fragility of suspended ceiling systems used in NZ based on component tests”, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 49(1), 2016.
- [48] A. De Sortis, G. Di Pasquale, M. Dolce, S. Gregolo, S. Papa, G.F. Rettore, “Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali arredi e impianti”, *Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Rome, Italy*, 2009.
- [49] D. Di Vece, S. Pampanin, “Combined Retrofit Solutions for Seismic Resilience and Energy Efficiency of Reinforced Concrete Residential Buildings with Infill Walls”, *XVIII Convegno ANIDIS: L’ingegneria sismica in Italia, Ascoli Piceno*, 2019.
- [50] P. Quintana-Gallo, M. Moghaddasi, S. Pampanin, K. Bergmeister, “Shake table tests of post-installed fasteners in concrete with supplemental damping”, *ACI Structural Journal*, 115(3): 595-606, 2018.

- [51] DM 3 marzo 1975, “Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”, Gazzetta Ufficiale n. 93 del 8 aprile 1975, 1975.
- [52] DM 16 giugno 1976, “Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche”, Gazzetta Ufficiale n. 214 del 14 agosto 1976, 1976.
- [53] DM 3 ottobre 1978, “Criteri generali per la verifica della sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi.”, Gazzetta Ufficiale n. 319 del 15 novembre 1978, 1978.
- [54] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”, CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP., Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 35 del 11 febbraio 2019 - Serie generale, 2019
- [55] M. T. Cristofaro, M. De Stefano, R. Pucinotti, M. Tanganelli, “Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in situ”, In Proc., 15° Congresso AIPnD Biennale PnD-MD. Brescia, Italia: Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 2014.
- [56] G. M. Verderame, P. Ricci, M. Esposito, F. C. Sansiviero, “Le caratteristiche meccaniche degli acciai impiegati nelle strutture in c.a. realizzate dal 1950 AL 1980.” In Proc., Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso (AICAP). Rome: Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso, 2011.

## 10 Abbreviazioni ed acronimi

Si riporta di seguito la lista delle abbreviazioni e degli acronimi utilizzati nella relazione, in ordine alfabetico:

- AeDES: Agibilità e Danno nell'Emergenza Sismica*
- AES: Anagrafe dell'Edilizia Scolastica*
- ANCE: Associazione Nazionale Costruttori Edili*
- ARES: Anagrafe Regionale Edilizia Scolastica*
- BCP: Blocchi di Calcestruzzo Prefabbricato*
- BIM: Building Information Modelling*
- CA: Calcestruzzo Armato*
- CLE: Condizione Limite per l'Emergenza*
- CLS: Calcestruzzo*
- CLSPP: Pannelli Prefabbricati in Calcestruzzo*
- CP: Cerniera Plastica*
- CPIA: Centro Provinciale per l'Istruzione degli Adulti*
- CR (o RC): Costo di Ricostruzione (Replacement Cost)*
- CSM: Capacity Spectrum Method*
- DL: Decreto-Legge*
- DM: Decreto Ministeriale*
- DPC: Dipartimento della Protezione Civile*
- EAL: Expected Annual Losses (equivalente della PAM)*
- ES: Edificio Scolastico*
- FEM: Finite Element Method*
- IEP: Initial Evaluation Procedure*
- INGV: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*
- IS-V: Indice di Sicurezza*
- MF: Mattoni Forati*
- MI: Ministero dell'Istruzione*
- MIUR: Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca*
- MP: Mattoni Pieni*
- MUR: Ministero dell'Università e della Ricerca*
- NBS: New Building Standard*
- NTC: Norme Tecniche per le Costruzioni*
- NZSEE: New Zealand Society for Earthquake Engineering*
- OPCM: Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri*
- PAM: Perdita Annua Media*

*PdCM: Presidenza del Consiglio dei Ministri*  
*PELL: Public Energy Living Lab*  
*PES: Punto di Erogazione del Servizio Scolastico*  
*PGA: Peak Ground Acceleration*  
*PSQ: Pietra Squadrata Semplice*  
*RS: Risposta Sismica*  
*SLaMA: Simple Lateral Mechanism Analysis*  
*SLC: Stato Limite di prevenzione del Collasso*  
*SLD: Stato Limite di Danno*  
*SLID: Stato Limite di Inizio Danno*  
*SLO: Stato Limite di Operatività*  
*SLR: Stato Limite di Ricostruzione*  
*SLV: Stato Limite di Salvaguardia della Vita Umana*  
*US: Unità Strutturale*

## 11 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro



**Simona Bianchi**, Dr. Ing., è una ricercatrice “Marie-Curie” presso l’Università Tecnica di Delft in Olanda. Nel 2015 ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Civile all’Università degli Studi di Roma “La Sapienza”. Dopo una fase iniziale di lavoro presso una società ingegneristica, è rientrata nel mondo accademico dapprima come borsista di ricerca, quindi come studentessa di dottorato del XXXII ciclo a.a. 2016/2017 presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell’Università “Sapienza”. Conseguito il titolo di dottore nel 2020, è diventata Assegnista di ricerca (Post-doc) nello stesso dipartimento, dove ha lavorato fino a metà

2021. Durante questi anni, è risultata vincitrice di 2 premi per meriti accademici, 3 scholarships e 2 fellowships. I suoi principali interessi di ricerca riguardano la progettazione integrata e multi-prestazionale di sistemi edificio, le tecnologie a basso danneggiamento per elementi strutturali e non-strutturali, la valutazione del rischio sismico tramite analisi probabilistiche e stime delle perdite economiche. Inoltre, ha esperienza in laboratorio grazie a progetti di ricerca che hanno interessato prove dinamiche su tavola vibrante. Simona Bianchi ha partecipato a 9 progetti di ricerca, tra cui un progetto europeo H2020-SERA, e 2 progetti in qualità di PI, in particolare il suo attuale progetto H2020 MSCA-IF-2020 finanziato dalla Commissione Europea ed intitolato “Seismic SAFety and Energy efficiency: Integrated technologies and multi-criteria performance based design for building FACadEs” (SAFE-FACE). Simona Bianchi ha trascorso diversi periodi di ricerca all’estero, 5 mesi presso l’Università di Canterbury (NZ) durante il periodo di tesi magistrale, 11 mesi e 5 mesi come tirocinante presso ARUP The Netherlands (NL) e LNEC (PT), rispettivamente, durante gli anni di dottorato. Nel 2021 è stata nominata “Cultore della Materia” in “Advanced structural design - Seismic assessment and retrofit strategies for reinforced concrete buildings” e “Seismic design of (precast) concrete and timber structures” presso “Sapienza” Università di Roma. La sua produzione scientifica consiste di 15 articoli da conferenza e 4 articoli da rivista (di cui 2 “tentatively accepted”), tutti peer-reviewed.



**Livio Pedone**, Ing., è uno studente di dottorato del XXXV ciclo in Ingegneria Strutturale e Geotecnica presso l’Università degli Studi di Roma “La Sapienza”. Nel 2016 ha conseguito la laurea triennale in Ingegneria Civile e nel 2019 la laurea magistrale in Ingegneria Civile con indirizzo di specializzazione in Ingegneria Strutturale. Durante il periodo tesi ha partecipato al Progetto di Ricerca CCIAA di Foggia UEFA Elena “Analisi energetico-sismiche di edifici della Provincia di Foggia e strategie di interventi integrati di miglioramento” e per lo stesso progetto ha vinto una borsa di studio della durata di 3 mesi. Nel 2020 ha conseguito l’abilitazione

all’esercizio della professione da Ingegnere Civile ed Ambientale ed è attualmente iscritto all’Albo dell’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma. Nel 2021 ha effettuato un periodo di ricerca all’estero (visiting researcher) della durata di 6 mesi presso l’istituzione straniera University College London (UCL), Londra (UK), finanziato dal Progetto di Ricerca Congiunto (AENEAS) *AdvancEd kNowlEdge-bAsed procedure for Seismic risk analysis and reduction to enhance community resilience* di cui è proponente. I principali interessi di ricerca di Livio Pedone riguardano la risposta sismica e la riabilitazione strutturale degli edifici esistenti in calcestruzzo armato, nonché la valutazione di sicurezza e delle perdite economiche di edifici in condizioni di post-terremoto. La sua produzione

scientifica consta di 3 articoli da conferenza. Ha inoltre fatto parte di 2 progetti di ricerca in qualità di Principal Investigator (PI) e di 3 progetti di ricerca in qualità di Partecipante (P).



**Stefano Pampanin** è Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" dal 2015. Ha conseguito la Laurea con lode in Ingegneria Civile/Strutturale presso l'Università di Pavia nel 1997, un Master in Ingegneria Strutturale presso l'Università della California a San Diego e un Dottorato di Ricerca in Ingegneria Sismica presso il Politecnico di Milano nel 2000. È stato Fulbright Visiting Scholar presso l'Università della California, San Diego, dal 1998 al 1999. Nel 2002 era stato chiamato come Senior Lecturer (equivalente a Professore Associato) presso la University of Canterbury, Christchurch (NZ) dove ha in seguito conseguito il ruolo di Professor of Structural Design and Earthquake Engineering and Chair of the Structural and Geotechnical Cluster. È stato Presidente della Società Neozelandese di Ingegneria Sismica (2012-2014).

Negli ultimi 25 anni, si è dedicato con significativo impegno alla ricerca e sviluppo, codificazione e attuazione pratica di soluzioni innovative per la progettazione sismica di sistemi strutturali a basso danneggiamento in calcestruzzo e legno, nonché alla valutazione sismica e al rinforzo di strutture in cemento armato esistenti. È autore di oltre 450 pubblicazioni scientifiche peer-reviewed nel campo dell'ingegneria sismica, tra cui oltre 130 articoli su riviste, 17 capitoli di libri, 2 libri pubblicati, 3 brevetti. Il Professor Pampanin ha ricevuto numerosi riconoscimenti per la sua attività scientifica e professionale tra i quali il fib Diploma 2003 per Younger Engineers (sotto i 40 anni), l'inaugurale EQC/NZSEE Ivan Skinner Award "for the advancement of Earthquake Engineering in NZ" nel 2005 e la nomina a Fellow dell'Ordine degli Ingegneri in Nuova Zelanda (IPENZ, Institute of Professional Engineers in NZ) nel 2015 di Fellow della New Zealand Society for Earthquake Engineering nel 2017. È stato attivamente coinvolto nella codifica di una serie di regolamenti nazionali e internazionali, e ha partecipato a comitati tecnici nazionali e internazionali per la preparazione di linee guida e standard di progettazione tra cui: fib, federazione internazionale del calcestruzzo: WG 7.4, WG7.5 (co-chair), WG7.6, WG6.10, WG6.6 (co-chair) ACI440-F, NZS3101: 2006 (appendice B), linee guida del Department of Building and Housing (DBH) "Guidelines for the design, assessment and retrofit of hollowcore floors"; NZS3101 Concrete Standard (Appendix B) and 2016 revision; NZS3603 (timber), NZSEE2016 Linee Guida su "Assessment and Improvement of the Performance of Existing Buildings" (Task Leader);

È stato relatore di Lezioni ad Invito/Keynotes in numerose conferenze, università, istituti di ricerca e gruppi di professionisti (ingegneri, architetti). A seguito della sequenza di eventi sismici che ha colpito la regione di Canterbury in Nuova Zelanda dal 2010-2011, il Prof. Pampanin ha rivestito un ruolo molto attivo nelle attività di supporto ed indagine post-evento, tra le quali:

- Leader del Recovery Project "Seismic Performance of RC Buildings, coordinato dalla Natural Hazard Research Platform;
- Membro dell'Engineering Reference Group – Commissione Tecnico-Scientifica di supporto al Minister of Building Innovation and Employment
- Membro della Expert Panel del Ministero - Department of Building and Housing (DBH) - per l'investigazione sul collasso di edifici critici, rispondendo alla Royal Commission of Enquiry
- Membro della Commissione di stesura delle nuove Linee Guida NZSEE2016 sulla valutazione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti, sotto la coordinazione del MBIE.