



Ricerca di Sistema elettrico

## Caratterizzazione di strutture multistrato tramite prove non distruttive (PND) e sollecitazione dinamica

*A. Giocoli, M. Mongelli, I. Roselli, M. Schwarz, A. Tati*

RdS/2013/102

CARATTERIZZAZIONE DI STRUTTURE MULTISTRATO TRAMITE PROVE NON DISTRUTTIVE (CND) E  
SOLLECITAZIONE DINAMICA

A. Giocoli, M. Mongelli, I. Roselli , M. Schwarz, A. Tati (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

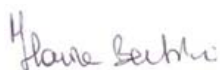
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: Tecnologie per l'industria del freddo

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



## Indice

PREMESSA.....	4
1. Phase Change Materials.....	5
1.1 PCM organici.....	5
1.2 PCM inorganici.....	6
1.3 Applicazione dei PCM.....	8
1.4 Contenimento dei PCM.....	12
2. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ.....	14
3. PROVE SPERIMENTALI .....	14
3.1 PROVE SU TAVOLA VIBRANTE STRUMENTAZIONE E SET-UP DI PROVA.....	15
3.2 SISTEMA DI CONTROLLO, ACQUISIZIONE ED ANALISI DEI DATI .....	17
3.3 SISTEMA DI ACQUISIZIONE E DI ANALISI DEI DATI .....	17
3.4 GRAFICI DEI RISULTATI SPERIMENTALI .....	18
4. PROVE ULTRASONORE .....	19
4.1 DESCRIZIONE HARDWARE E SOFTWARE .....	23
4.2 ESAME SU PANNELLO MISA CON SCANNER MOTORIZZATO .....	26
4.3 ESAME SU PANNELLI PRIMA E DOPO LE PROVE DINAMICHE SU 6 PUNTI .....	30
5. CONCLUSIONI.....	35

## Premessa

Nell'ambito dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (Area "Razionalizzazione e Risparmio nell'Uso dell'Energia Elettrica", Tema di ricerca "Risparmio di Energia Elettrica nei Settori: Civile, Industria e Servizi"), allo scopo di rafforzare le potenzialità di crescita delle imprese alimentari a livello nazionale ed internazionale, si è ritenuto necessario promuovere una politica di efficienza e di ottimizzazione dei consumi energetici dell'intera filiera agroalimentare (dall'agricoltura, ai trasporti, alla distribuzione tradizionale e moderna). Per quanto concerne il Piano Annuale 2012, l'attenzione è stata rivolta allo sviluppo di nuove tecnologie per la cosiddetta "industria del freddo" poichè gli attuali stili di vita determinano la continua crescita del settore dei surgelati o dei piatti pronti che devono essere conservati a temperatura controllata.

L'appropriata e costante temperatura delle derrate alimentari dalla fase di produzione a quella di consumo è uno degli elementi più importanti per la conservazione del prodotto e per la conseguente riduzione dei consumi energetici. Tra le tecniche di conservazione degli alimenti la refrigerazione è quella di maggiore interesse dal punto di vista della efficienza energetica a causa della necessità di tenere sotto stretto controllo l'umidità.

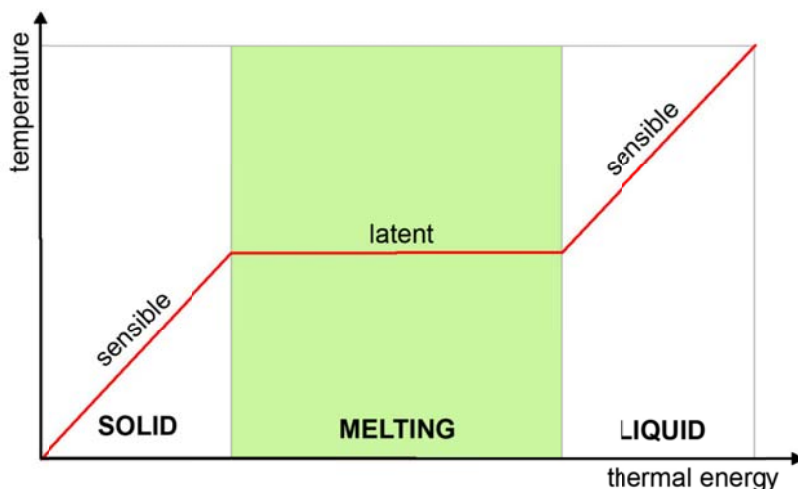
Pertanto, l'evoluzione tecnologica di questi ultimi anni ha portato alla realizzazione di celle frigorifero sempre più evolute che cercano di ottenere un controllo sulla temperatura estremamente accurato, anche in condizioni critiche di esercizio, migliorando l'omogeneità della temperatura all'interno della cella, fattore critico per proteggere il carico, mediante opportuni ventilatori e prese d'aria.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati, fino a qualche decennio fa, i soffitti e le pareti erano costituiti da pannelli a sandwich, prefabbricati, consistenti in due cortecce in lamiera zincata e verniciata fra le quali veniva espanso il materiale isolante, in genere poliuretano. Attualmente in modo sempre più marcato, specie in condizioni di esercizio critiche, questi materiali sono stati sostituiti da pannelli sandwich in resina poliestere caricata con fibre di vetro fra le quali viene espanso il materiale isolante, in genere poliuretano.

Al fine di migliorare l'isolamento termico delle suddette strutture a sandwich si è pensato di valutare l'impiego dei materiali a cambiamento di fase (Phase Change Material, PCM) da affiancare e/o sostituire allo strato espanso di poliuretano.

## 1. Phase Change Materials (PCM)

I **PCM** sono materiali (sali o paraffine) termoregolanti in grado di accumulare o rilasciare una grande quantità di calore a una temperatura costante, che è la temperatura del loro cambiamento di fase fisica (da solida a liquida). Grazie a tale caratteristica consentono di ottimizzare le fluttuazioni giornaliere della temperatura consentendo un **risparmio energetico** e di **climatizzazione** dell'ambiente.



Per questo motivo il loro utilizzo nell'ambito dell'edilizia è destinato a crescere sempre di più. Secondo una recente relazione pubblicata dalla società Lux Research, infatti, **l'uso PCM nel reparto costruzioni crescerà dalla quota zero di oggi a 130 milioni di dollari di fatturato annuo entro il 2020**

Tralasciando al momento categoria dei PCM eutettici, I PCM si dividono in due grosse categorie:

- PCM ORGANICI
- PCM INORGANICI

### 1.1 PCM ORGANICI

I PCM organici hanno come caratteristiche idonee ai loro molteplici utilizzi una alta stabilità chimica rispetto alle sostanze di natura inorganica, fondono omogeneamente e il sottoraffreddamento non presenta un problema significativo. Hanno un'alta affinità con vari materiali con i quali vengono a contatto, ad esempio l'impregnazione di materiali da costruzione nel campo edile.

D'altro canto sono materiali molto costosi e il loro costo d'utilizzo non è spesso competitivo rispetto ai materiali inorganici.

Ma quest'ultima è solo una delle poche, caratteristiche che limitano il loro utilizzo. Sono infiammabili e nel caso di una combustione generano fumi nocivi. Altri problemi, presenti in pochi

casi, sono una reazione con i prodotti di idratazione nel cemento, invecchiamento termico ossidativo, sensibili variazioni di odore e di volume.

Con una appropriata selezione e opportune modifiche, ad oggi, sono state eliminate buona parte di queste caratteristiche negative. Ad esempio è stato scoperto che l'invecchiamento termico ossidativo può essere eliminato utilizzando un appropriato antiossidante. La ricerca è ancora in corso per valutare l'inflammabilità e la generazione di fumo tra i più promettenti PCM.

Tra i materiali organici, c'è una classe chiamata MCPAN (materiali a cambiamento di fase prodotti con leghe molecolari) formati da leghe basate su alcani, i quali hanno il vantaggio di essere termoregolanti, cioè permettono di cambiare la temperatura del cambiamento di fase, in funzione della loro composizione.

Quando si tratta di accumulo di temperatura o di cambiamento di fase, il calore trasferito negli accumulatori può essere migliorato, scegliendo i PCM in modo tale che la temperatura in corrispondenza della quale avviene il cambiamento di fase ottimizzi il gradiente termico rispetto alla sostanza con la quale il calore viene scambiato. Ad esempio con paraffine e alcani è possibile variare il numero di atomi di carbonio o le varie forme di leghe molecolari in modo da concedere una continua variazione della temperatura di cambiamento di fase all'interno di certi intervalli

## 1.2 PCM INORGANICI

Gli sforzi iniziali nello sviluppo di materiali che accumulassero calore latente furono concentrati sull'utilizzo di PCM inorganici.

Buona parte dei materiali inorganici sono Sali idrati, includendo anche il sale di Glauber (sodio solfato decaidrato,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) utilizzato in molte ricerche scientifiche, i quali sono stati ampiamente studiati nelle fasi iniziali della ricerca dei PCM. Questi materiali hanno interessanti proprietà che includono alti valori di calore latente, non infiammabilità ed un alto contenuto di acqua che li rende poco costosi e realmente utilizzabili. Tuttavia, hanno anche delle caratteristiche che li rendono inadatti e che hanno fatto estendere la ricerca anche ai materiali di natura organica. Tra le caratteristiche che li rendono inadatti spicca la corrosività, l'instabilità, una ri-solidificazione complessa e la tendenza al sottoraffreddamento. Inoltre se il loro utilizzo è nell'ambito edile, la loro difficile applicabilità risiede anche nella necessità di utilizzare un contenitore e quindi risulta impossibile impregnare il materiale da costruzione.

Tra le proprietà termiche spicca l'adattabilità della temperatura alla quale avviene la transizione di fase, un'ampia variazione di entalpia in prossimità della temperatura di utilizzo, un'alta conduttività termica. Quest'ultima deve essere presente all'interno della fase solida e liquida, anche se non sempre è disponibile. Delle tipologie di materiali in precedenza elencati, alcuni di questi sono normalmente commercializzati: esistono diverse aziende che producono materiali a cambiamento di fase, sia in forma sfusa, che incapsulata o comprensiva di packaging.

Nome commerciale	temperatura di fusione [°C}	calore latente di fusione [kJ/kg]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	produttore
TH0	0	334	n.a.	TEAP
A4	4	227	766	EPS Ltd
Witco 85010-1	4	129,6	n.a.	Witco
RT2	6	156	860	Rubitherm

TH7	7	189	n.1.	TEAP
RT5	7	156	860	Rubitherm
E7	7	120	1540	EPS Ltd
C7	7	162	1420	Climator
RT6	8	174	860	Rubitherm
E8	8	140	1470	EPS Ltd
A8	8	220	770	EPS Ltd
E10	10	140	1520	EPS Ltd
E13	13	140	1780	
C15	15	130	n.a.	Climator
E21	21	150	1480	EPS Ltd
RT20	22	172	870	Rubitherm
A22	22	220	770	EPS Ltd
C24	24	216	1480	Climator
RT26	25	131	880	Rubitherm
TH25	25	159	n.a.	TEAP
S27	27	207	1470	Cristopia
STL27	27	213	1090	Mitsubishi
RT27	28	179	870	Rubitherm
GR27	28	72	750	Rubitherm
PX27	28	112	640	Rubitherm
A28	28	245	790	EPS Ltd
TH29	29	188	1540	TEAP
E30	30	201	1300	EPS Ltd
C32	32	302	1450	Climator
E32	32	186	1460	EPS Ltd
RT 35	35	157	880	Rubitherm
RT 42	43	174	880	Rubitherm
GR 41	43	63	750	Rubitherm
FB 41	43	152	880	Rubitherm
RT 41	43	152	880	Rubitherm
STL 47	47	221	1340	Mitsubishi
E48	48	201	1670	EPS Ltd
C48	48	324	1460	Climator
STL 52	52	201	1300	Mitsubishi
PX 52	53	103	640	Rubitherm
STL 55	55	242	1290	Mitsubishi
FB 54	55	135	750	Rubitherm
RT 54	55	179	900	Rubitherm
E 58	58	226	1280	EPS Ltd
C58	58	364	1460	Climator
TH 58	58	226	1290	TEAP
RT 65	64	173	910	Rubitherm
C 70	70	194	1700	Climator

PX 80	77	91	640	Rubitherm
GR 80	79	71	750	Rubitherm
FB 80	79	132	750	Rubitherm
RT 80	79	175	920	Rubitherm
PCM 80	80	231	n.a.	Mitsubishi
PCM 86	86	246	n.a.	Mitsubishi
E89	89	163	n.a.	EPS Ltd
TH 89	89	149	n.a.	TEAP
RT 90	90	194	930	Rubitherm
RT 100	99	168	940	Rubitherm
RT 112	112	213	n.a.	Rubitherm
E 117	117	169	1450	EPS Ltd

**Tabella 1: PCM in commercio**

### 1.3 Applicazione dei PCM

Indipendentemente dalle applicazioni, tutti i PCM devono presentare requisiti termodinamici indispensabili, quali:

- punto di fusione compreso in un particolare intervallo di temperature
- elevato calore latente di fusione per unità di massa
- elevata densità
- elevato calore specifico
- congruenza di fusione
- non sensibile cambiamento di densità nelle diverse fasi e a diversa temperatura

Il primo uso dei materiali a cambiamento di fase è avvenuto a bordo dei treni britannici, all'interno dei quali sono stati introdotti, per impedire ai vagoni di diventare troppo freddi. La prima applicazione dei PCM descritti in letteratura è stato il loro uso per il riscaldamento ed il raffreddamento all'interno delle ostruzioni. Nel 1978 Telkes e collaboratori pubblicarono l'idea di utilizzare i PCM all'interno di un muro (meglio noto come "Trombe wall"). Nel 1980 Bordeau testò un collettore solare passivo che conteneva  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , egli trovò che un muro sottile contenente uno strato di PCM di 8,1 cm mostrava un'accumulazione termica migliore di un classico muro di 40 cm. Un'interessante possibilità in applicazioni edili è l'impregnazione di materiale da costruzione poroso, come ad esempio i pannelli di cartongesso, con PCM in modo tale da incrementare la massa termica.

L'idea di utilizzare i PCM per immagazzinare il freddo è stata scoperta per applicazioni inerenti ai condizionamenti dell'aria, dove il freddo, raccolto e immagazzinato dall'ambiente esterno durante la notte, viene rilasciato nell'ambiente interno durante le ore più calde del giorno. Il concetto è meglio noto con il nome di "free-cool".

Nel campo dell'immagazzinamento dell'energia solare, Cassidy sostiene che i PCM attualmente non offrono un sostanziale risparmio economico per quanto concerne l'accumulo termico, poiché avviene a temperature insufficienti. Inoltre questi sistemi costano circa due volte in più dei sistemi d'acqua calda tradizionali. Egli, tuttavia, precisa i vantaggi connessi con materiali quali le paraffine, come la stabilità chimica e la bassa corrosione del prodotto. In particolare, l'alta densità di



magazzinaggio durante i piccoli mutamenti di temperatura può essere un vantaggio significativo nelle applicazioni solari e nell'utilizzazione di sprechi di calore. Mehling e collaboratori hanno studiato la possibilità di includere un modulo di PCM nella parte superiore di un serbatoio di acqua. I loro risultati hanno rivelato un aumento nella quantità di energia memorizzata e di prestazioni migliori del serbatoio.

### 1.3.1 Applicazione PCM nel campo della sicurezza

Un'altra applicazione, importante quanto quella che vede i PCM all'interno dei materiali da costruzione, è quella del loro utilizzo nel campo della sicurezza.

Vi sono articoli che indicano l'utilizzo dei PCM di natura alogena organica come additivi ritardanti di fiamma che migliorano di molto la risposta dei materiali al fuoco

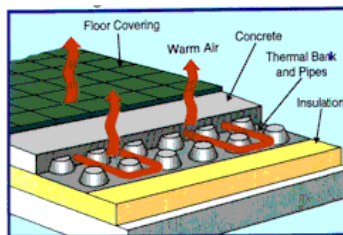


**Figura 1: vestiario per usi speciali**

### 1.3.2 Applicazione PCM in edilizia

Altri usi dei PCM nel campo edile comprendono la refrigerazione termoelettrica. Ad esempio sono stati integrati i PCM all'interno di diodi termici per migliorare lo smorzamento del calore.

Con lo scopo di mantenere l'accumulo solare delle costruzioni, è stata studiata la possibilità di usare una finestra con uno strato di PCM all'interno. Questa finestra è composta da due lastre di vetro con un divario fra le due lastre e un'apertura per l'aria negli angoli; l'intercapedine può essere riempita con i PCM; in questo modo durante i periodi di freddo è possibile prevenire il repentino abbassamento delle temperature interne. Sono stati studiati anche dei nuovi sistemi di PCM inseriti in modo tale da garantire un continuo riscaldamento intorno all'area della finestra



**Figura 2:impieghi in edilizia- sistemi a pavimento**



**Figura 3:impieghi in edilizia- intonaci**

### 1.3.3 Applicazioni PCM: varie

La radiazione solare può influenzare un ambiente con condizionamento dell'aria, aumentando la temperatura, anche se solo momentaneamente, di quest'ultimo. Per qualche accumulatore di calore c'è la necessità che non vi sia interruzione nel raffreddamento o che vi sia un'estensione dell'operazione nel tempo. Per assicurare questa continuità è stato messo a punto un sistema di climatizzazione solare che utilizza il principio dell'assorbimento del sistema ammoniaca/acqua e il calore latente accumulato dalle paraffine. L'unione di questi due fenomeni dà luogo al raffreddamento.

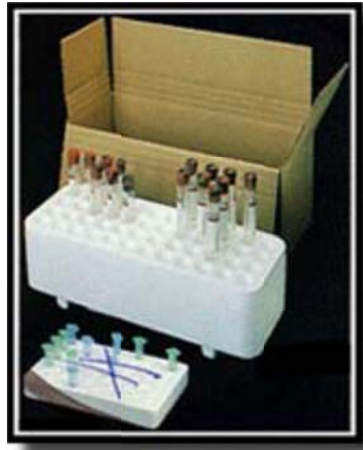
Un concetto simile, ma opposto, è stato utilizzato per produrre calore: un sistema costituito da PCM è collegato ad una pompa di calore e ad un sistema di distribuzione del calore; in questo modo si è constatata una più efficace gestione dei costi annuali che possono essere fatti. L'uso del ghiaccio come accumulatore di freddo è ampiamente utilizzato. Molte compagnie che commerciano in questo campo hanno un'ampia gamma di prodotti che possono accumulare freddo a diverse temperature solo aggiungendo degli additivi all'interno dell'acqua. Inoltre si sta cercando di ottimizzare la costruzione di veri e propri serbatoi che hanno il ruolo di "immagazzinare il freddo" e che successivamente verranno incorporati in sistemi di condizionamento dell'aria in campo edile.

Gli accumulatori di freddo sono stati sviluppati anche in altre applicazioni: nel campo elettrico, per il raffreddamento di verdure, per il preraffreddamento dell'aria in ingresso alle turbine, per controllare la temperatura in ambienti con computer o dispositivi elettrici.

Altre applicazioni che prevedono l'utilizzo di PCM riguardano il loro inserimento per l'ideazione di fornelli da cucina alimentati ad energia solare, il che aumenta la loro capacità di utilizzo.

L'uso di PCM è stato applicato in campo automobilistico per aumentare il comfort termico dei veicoli e per migliorare l'efficienza dei contenitori per medicinali ed alimentari

.



**Figura 4: contenitori per medicinali**



**Figura 5: contenitori per alimenti**

#### 1.4 Contenimento dei PCM

Qui di seguito vengono descritte le compatibilità chimiche di alcuni PCM rispetto ai materiali usati per il loro contenimento.

Phase Change Material	acciaio inossidabile	acciaio dolce	rame	alluminio	leghe di alluminio con Magnesio	Plastiche
acqua	x	x	x	x	x	x
CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O / CaBr <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		x	x			x
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O + additivi	x	x				x
CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		x	x			x
Glicole Polietilene	x	x	x	x	x	x
Paraffine	x	x	x	x	x	x
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 10H <sub>2</sub> O	x	x	x			x
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O	x	x	x		x	x
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 12H <sub>2</sub> O	x	x	x			x
MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O / Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		(rivestito)				x
CH <sub>3</sub> COONa 3H <sub>2</sub> O	x	x	x			x
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	x	(rivestito)				
MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		x				

**Tabella 2** Compatibilità di alcuni PCM con materiali usati per il contenimento



**Figura 6** PCM contenuto in contenitori polimerici



**Figura 7** PCM contenuto in contenitori metallici flessibili



**Figura 8** PCM contenuto in contenitori metallici rigidi

## 2. Descrizione delle attività

Nell'ambito del piano annuale relativo a questa prima fase di ricerca, l'attività sperimentale è eseguita presso il laboratorio di Qualificazione Materiali e Componenti (UTT MAT-QUAL) del Centro Ricerche Casaccia ed è stata rivolta alla caratterizzazione preliminare su tavola vibrante e indagine ultrasonora di due pannelli multistrato delle dimensioni 40x80x6 cm, prodotti dalla società MISA SPA (sita in Pomezia, Roma), commercialmente impiegati per la realizzazione di celle frigorifere industriali utilizzati sia per impieghi statici che mobili (camion e/o vagoni ferroviari).

I pannelli MISA sottoposti a caratterizzazioni sono costituiti da un sandwich di materiale isolante in schiuma Poliuretanicca da 6 cm inserito tra due lamiere di acciaio INOX AISI 304 6/10.

Uno dei due pannelli è stato modificato mediante l'applicazione di uno strato di un PCM di tipo paraffinico dello spessore di 2 cm, denominato "Rubitherm RT 35" (vedi Tabella 3), contenuto all'interno di un involucro di alluminio a tenuta stagna.

**Tabella 3.** Rubitherm RT 35

Intervallo di fusione	29-36 °C
Intervallo di solidificazione	36-31° C
Capacità di accumulo termico	170 /k G

## 3. Prove Sperimentali

Le prove sperimentali sono state eseguite su entrambi i pannelli, "pannello tal quale" e "pannello con PCM". I test su tavola sono stati realizzati sui pannelli posti in posizione verticale e sono stati preceduti e susseguiti da prove non distruttive di tipo ultrasonico volte ad evidenziare le eventuali disomogeneità nei pannelli stessi (compattezza strutturale, delaminazione, presenza di vuoti ed eventuali cambiamenti di fase...) dovuti all'esposizione a vibrazioni per un trasporto su strada equivalente a 1000 miglia.

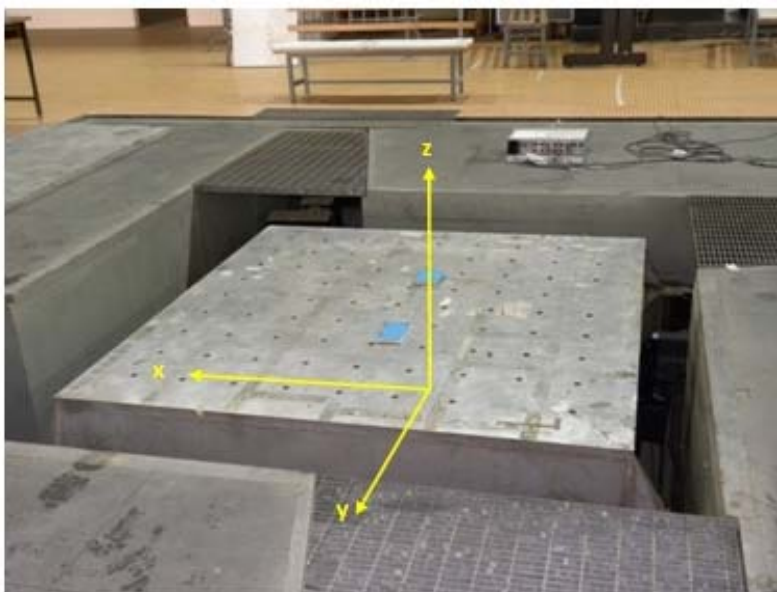
La sperimentazione è stata pertanto suddivisa nelle seguenti fasi:

- ✓ Prove ultrasoniche su entrambi i pannelli
- ✓ Test su tavola vibrante del pannello con PCM in posizione verticale seguito da prove ultrasoniche
- ✓ Test su tavola vibrante del pannello "Tal Quale" in posizione verticale seguito da prove ultrasoniche
- ✓ Elaborazione dei dati sperimentali

- ✓ Confronto dei risultati ottenuti
- ✓ Conclusioni

### 3.1 Prove su tavola vibrante strumentazione e set-up di prova

Entrambi i pannelli sono stati verificati sperimentalmente sulla tavola vibrante di dimensione 2x2 [m] (Figura 9), le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 4.



**Figura 9.** Tavola vibrante 2x2 [m]

**Tabella 4.** Caratteristiche della tavola vibrante

Dimensioni	2m x 2m
Gradi di libertà	6DOF
Range di Frequenza	0-100 Hz
Accelerazione	5g peak
Velocità	1 m/s (0-peak)
Spostamento	0.30 m (0-peak)
Massa ed altezza del baricentro dell'oggetto in prova	1 [t] 1m altezza baricentrica

Nelle Figure 10a-b e 11a-b, si evidenzia l'allestimento della prova su tavola vibrante dei pannelli posti in posizione verticale frontale ed in sezione.





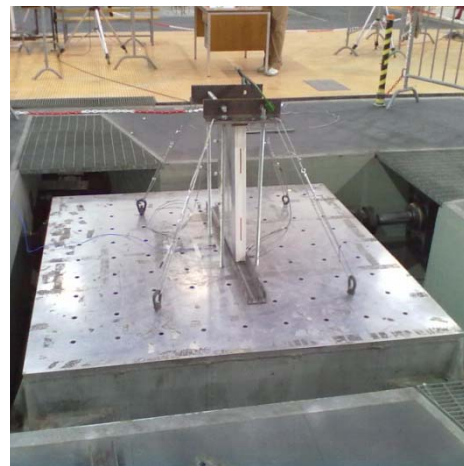
**Figura. 10a** Pannello Tal Quale



**Figura. 10b** Particolare della sezione



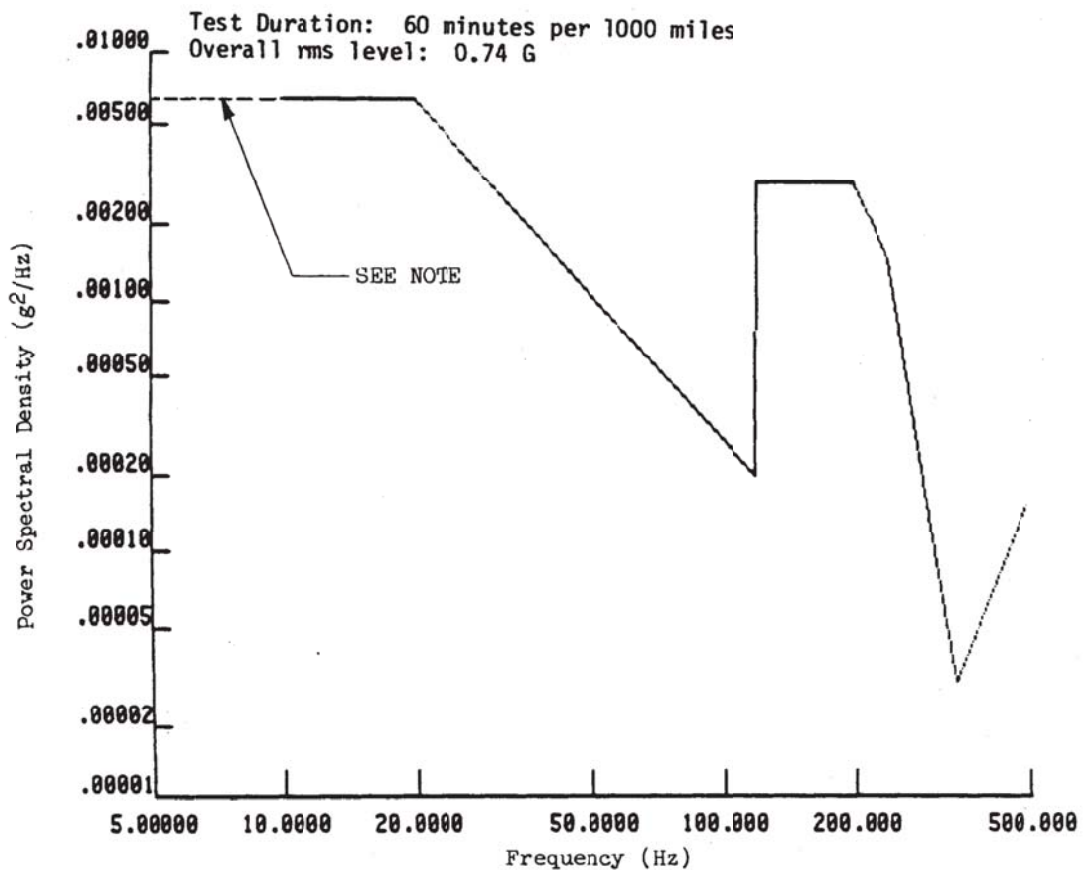
**figura. 11a** Pannello con PCM



**figura. 11b** Particolare della sezione

Per le campagne sperimentali su tavola vibrante è stato individuato come più idoneo il file di input indicato dalla norma MIL-STD-810D per il trasporto delle Military Handbook applicato in direzione longitudinale: il relativo profilo è riportato in Figura 12.





**Figura 12.** Input (Mil-STD-810D)

### 3.2 Sistema di controllo, acquisizione ed analisi dei dati

Il moto della tavola vibrante è stato controllato dal sistema hardware LMS SCADAS III e dal programma LMS Test Lab. I dati relativi al moto della tavola sono stati acquisiti per mezzo di un accelerometro fissato sulla tavola sismica (Figura 10a).

### 3.3 Sistema di acquisizione e di analisi dei dati

I dati sono stati acquisiti ed elaborati a posteriori per mezzo del sistema hardware LMS SCADAS III a 16 canali che include un convertitore A/D a 24 bit, controllato dal software LMS Test Lab. Durante le prove sono stati utilizzati sei accelerometri triassiali PCB (modello 356A15, Figura 13). Le loro caratteristiche principali sono riportati nella Tabella 3



**Figura 13.** Vista dell'accelerometro PCB 356A15

I certificati di calibrazione di tutta la strumentazione utilizzata e degli accelerometri sono validi fino a luglio 2014.

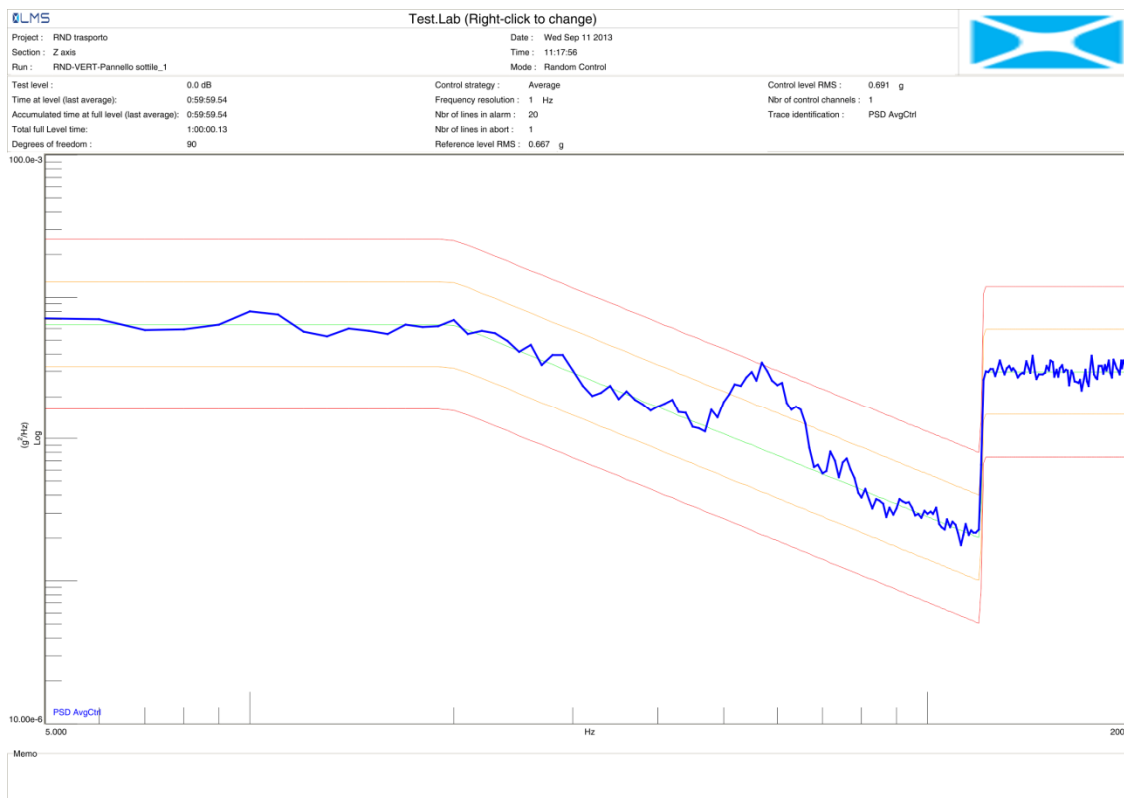
**Tabella 5. Principali caratteristiche tecniche dell' accelerometro PCB 356A15**

Caratteristica <i>Feature</i>	Dati tecnici <i>Technical Data</i>
Sensibilità nominale <i>Nominal sensitivity</i>	100 mV/g
Spettro di frequenze nominale <i>Nominal frequency range</i>	2 Hz ÷ 5 kHz
Accelerazione massima <i>Max. acceleration</i>	± 50 g
Risoluzione sull'intera banda di frequenze <i>Broadband resolution</i>	0.0002 g <sub>rms</sub>

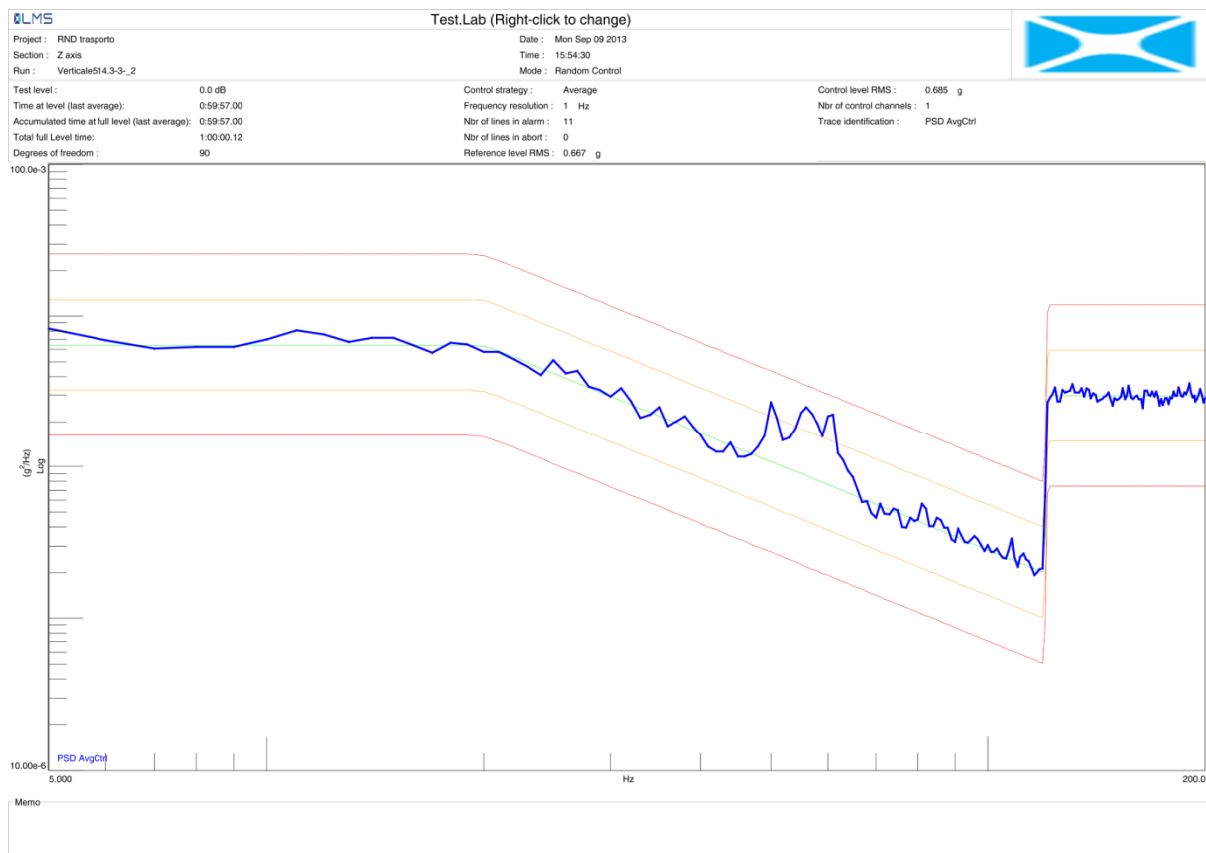
### 3.4 Grafici dei risultati sperimentali

I grafici di seguito riportati rappresentano le acquisizioni dello spettro delle accelerazioni random secondo il profilo della norma MIL-STD-810D applicato mediante il sistema LMS TestLab per la scansione da 5 a 200 Hz.

In particolare vengono fornite nelle Figure 14-15 le immagini relative ai test sul pannello "Tal Quale" e quello rivestito con PCM, graficando la densità spettrale [g<sup>2</sup>/Hz] in funzione delle frequenze [Hz].



**Figura 14. Pannello Tal Quale**



**Figura 15.** Pannello con PCM

## 4 Prove ultrasonore

Presso il laboratorio di Qualificazione Materiali e Componenti dell'ENEA è stato realizzato un nuovo sistema automatico per la mappatura ultrasonora con sonde non a contatto. La tecnologia consiste in un sistema di generatore di impulsi ultrasonoro ad alta energia, di un ricevitore a banda passante e di sonde brevettate in USA che permettono la trasmissione dell'onda ultrasonora nell'aria. La tecnica, nota anche con il nome accoppiamento in aria, non necessita come mezzo di continuità meccanica di alcun altro elemento di trasmissione, quale gel o altri liquidi. Questa tecnica è stata ampiamente sperimentata nel campo industriale per il controllo dell'incollaggio dei componenti sandwich del settore aeronautico e, nel campo civile, per il controllo della qualità del calcestruzzo.

La peculiarità di questo sistema consiste nell'abbinamento tra un sistema puntuale, rappresentato da una sonda ultrasonora e un posizionatore di precisione, mobile su assi cartesiani, costituito da guide lineari che spostano la sonda ultrasonica.

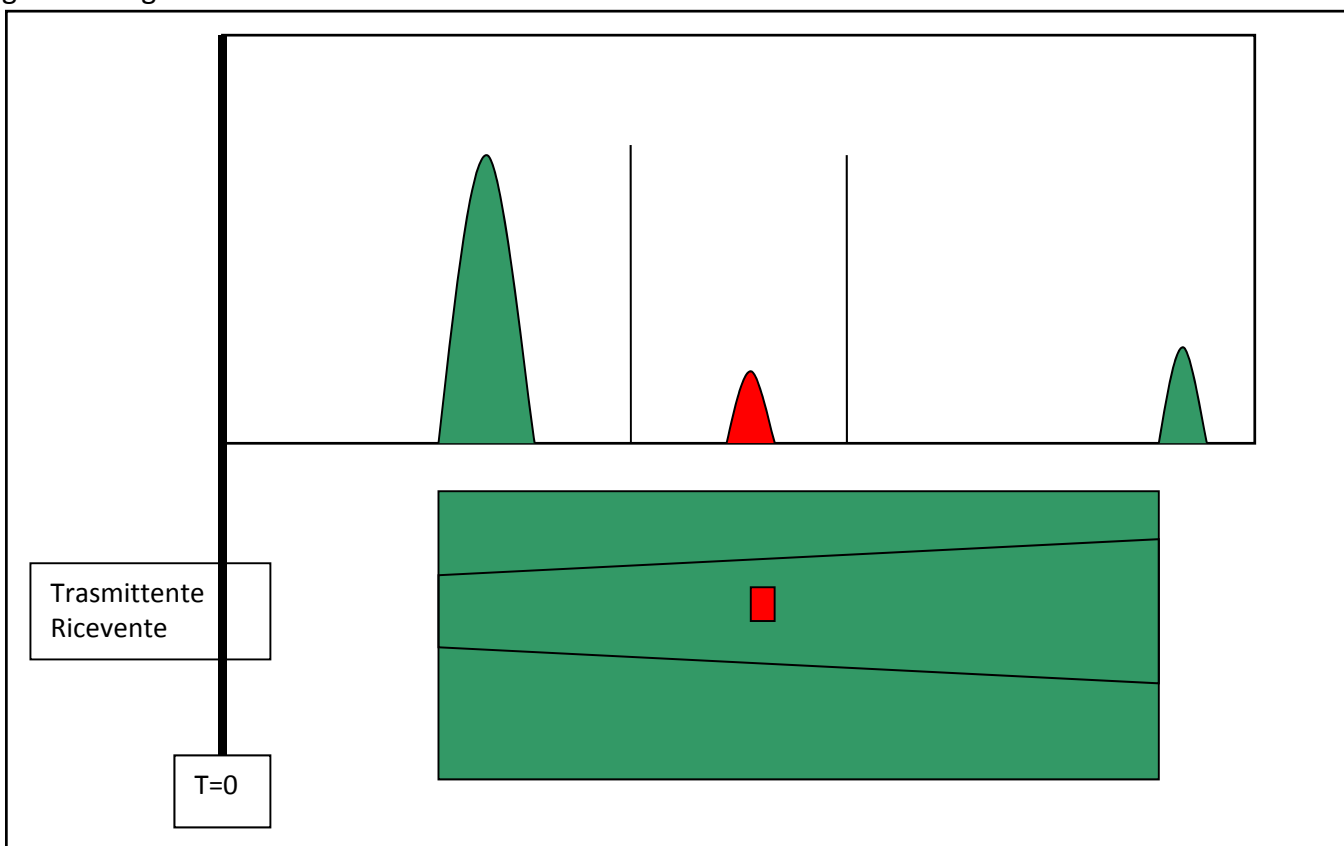
Nonostante le numerose applicazioni finora effettuate, questo sistema di controllo risulta spesso non amichevole per l'utente, in quanto l'interfaccia, come spesso accade per questo tipo di s/w nati per specifiche applicazioni industriali, non è diretta e necessita di una serie di procedure attraverso diverse 'finestre' da richiamare ed impostare. Queste procedure impediscono il facile accesso all'utente che non ha esplicita esperienza al s/w, anche se è pienamente accreditato in materia di qualificazione degli elementi indagati. Ciò significa che il tempo necessario per impostare il s/w diventa rilevante. Altresì rilevante risulta anche il tempo di addestramento alle procedure di acquisizione e alla lettura dei risultati, che spesso è superiore 10 giorni lavorativi.

Altro argomento significativo riguarda l'onere finanziario che deve essere investito per l'acquisizione del sistema che ammonta complessivamente, anche se approssimativamente in circa 100.000 euro.

Il sistema può funzionare nelle due modalità seguenti:

Nella modalità Pulse-echo (schema 1) in cui la sonda ispeziona solo da un lato l'oggetto da esaminare, l'onda prodotta dalla sonda attraversa il materiale e la presenza di eventuali difetti all'interno genera delle onde di riflessione chiamate echi di difetto. La superficie opposta del pezzo genera un eco chiamato di fondo.

La sonda che ha emesso il primo impulso (eco di superficie) riceve tutti gli echi riflessi dai difetti e dal fondo con tempi in funzione della distanza a cui si trovavano (come l'orecchio riceve gli echi in montagna prima dalle cime vicine e poi da quelle lontane). L'insieme degli echi si chiama segnale ultrasonoro o A-scan e contiene l'informazione dello spessore (Z) attraversato nel punto della superficie esaminato. Inoltre, dall'ampiezza dell'eco del difetto è possibile determinare la sua grandezza geometrica.



**Schema 1.** PE- il segnale rosso indica l'ampiezza e il tempo di volo ( distanza dalla superficie) della discontinuità

Il sistema automatico è in grado di acquisire questa informazione per ogni punto della superficie dell'oggetto. Nella maggior parte dei casi la superficie è piana ( schema 2 ) ed è sufficiente muovere la sonda lungo 2 assi cartesiani per ottenere la scansione della superficie (XY) .



**Schema 2.** Scansione XZ

Utilizzando la potenzialità del computer è possibile salvare per ogni punto XY l'intero segnale ultrasonoro (A-scan). L'A\_Scan contiene le informazioni del materiale attraversato e quindi dello spessore(Z) . L'insieme dei dati acquisiti è una matrice tridimensionale in cui ad ogni terna XYZ è associata l'ampiezza del segnale.

Ampiezza = F(XYZ)

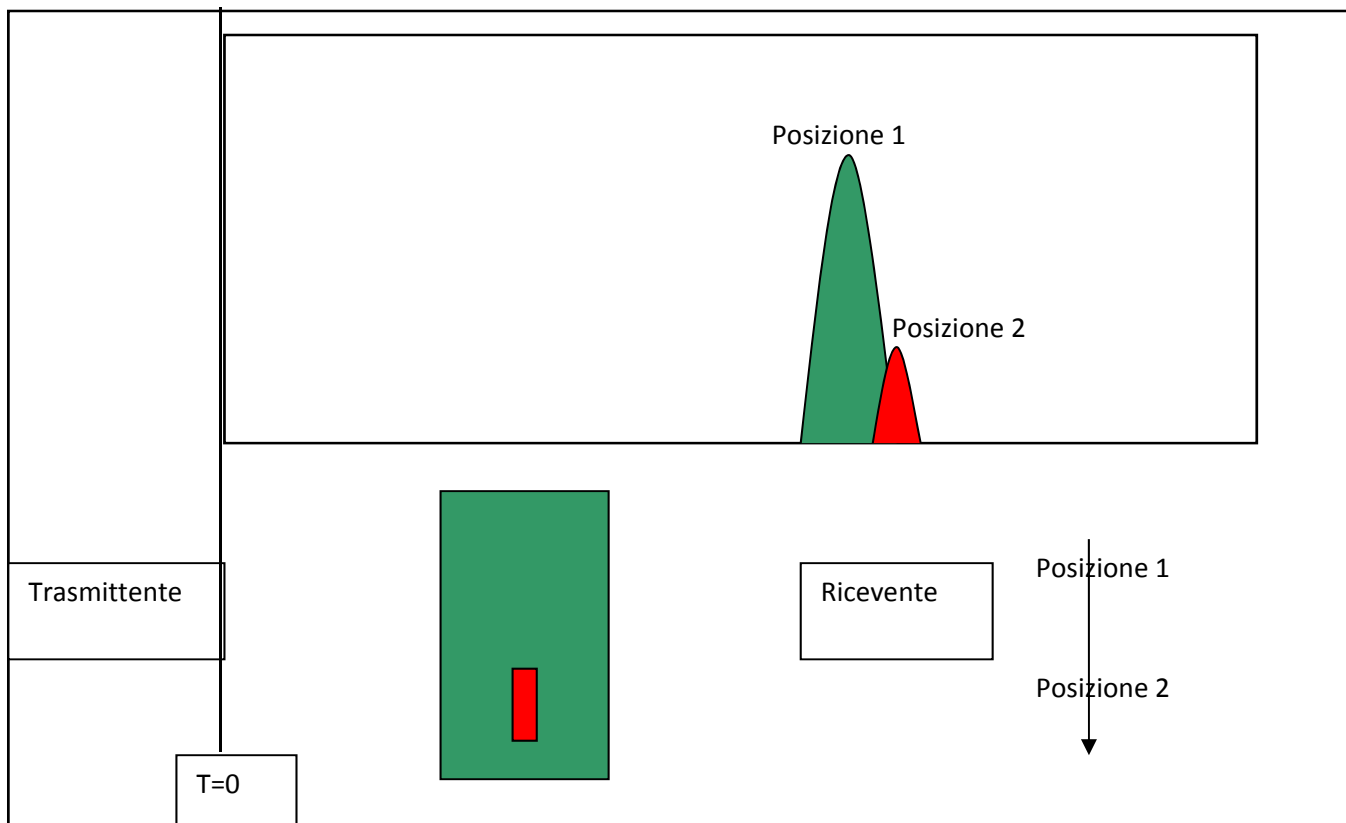
L'ampiezza del segnale viene valutata nella seguente modalità:

Ampiezza bassa nessun difetto

Ampiezza Alta difetto grande ( non accettabile)

Ampiezza media difetto piccolo (accettabile)

Nella modalità ultrasonora definita trasmissione (True-Trasmission=TT) ( schema 3 ) consiste in due sonde una trasmittente ed una ricevente, il componente da controllare è posto tra le due sonde. L'onda ultrasonora, trasmessa dalla prima sonda attraversa il componente ed è ricevuta dalla sonda ricevente, la presenza di una discontinuità è indicata in base al valore di attenuazione del segnale elettrico.

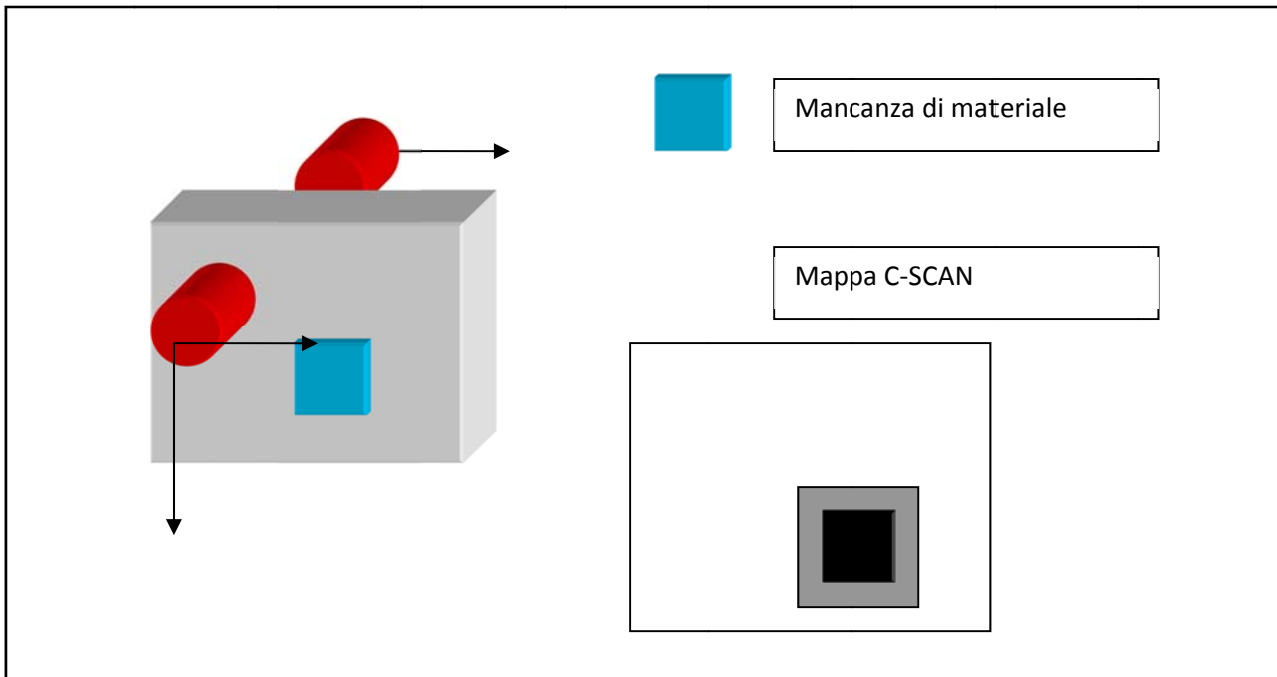


**Schema 3.** TT - Il segnale da indicazione dell'attenuazione della discontinuità

Le sonde utilizzate sono in grado di trasmettere e ricevere il segnale senza necessità di accoppiante. La frequenza utilizzata è 100 KHz. Il sistema controlla la posizione delle due sonde opposte con una coppia di assi sincronizzata in modo tale che le sonde siano sempre collimate tra di loro. E' possibile collimare le sonde in automatico tramite lo spostamento XY e la misura in ampiezza del segnale ultrasonoro.

Il software sviluppato è in grado ispezionare diversi componenti con superficie piana (2 assi )

Il programma esegue una scansione sul pezzo in esame ed acquisisce il segnale in Radiofrequenza a circa 100 Megasample al sec. Il segnale raddrizzato viene elaborato all'interno di una finestra temporale (Gate) e soltanto il valore in ampiezza maggiore viene memorizzato. L'insieme dei valori per ogni posizione X e Y prende il nome di mappa ultrasonora. Le differenze o anomalie saranno visibili in falsi colori come in schema 4.



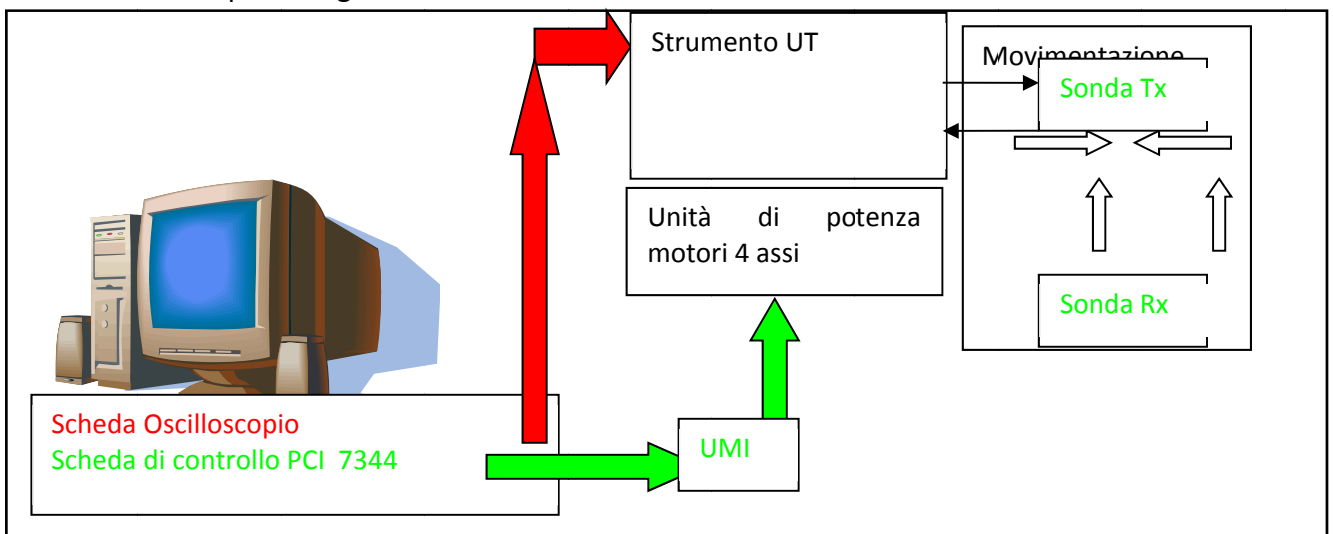
**Schema 4.** Scansione sul campione

L'utilizzo di queste sonde permette l'applicazione in un gran numero di applicazioni ed in particolare nei beni culturali in quanto non è necessario l'utilizzo di liquidi o di gel per garantire la continuità sonda-superficie da controllare. Inoltre è possibile muovere la sonda ad una certa distanza dal pezzo senza scalfire la superficie.

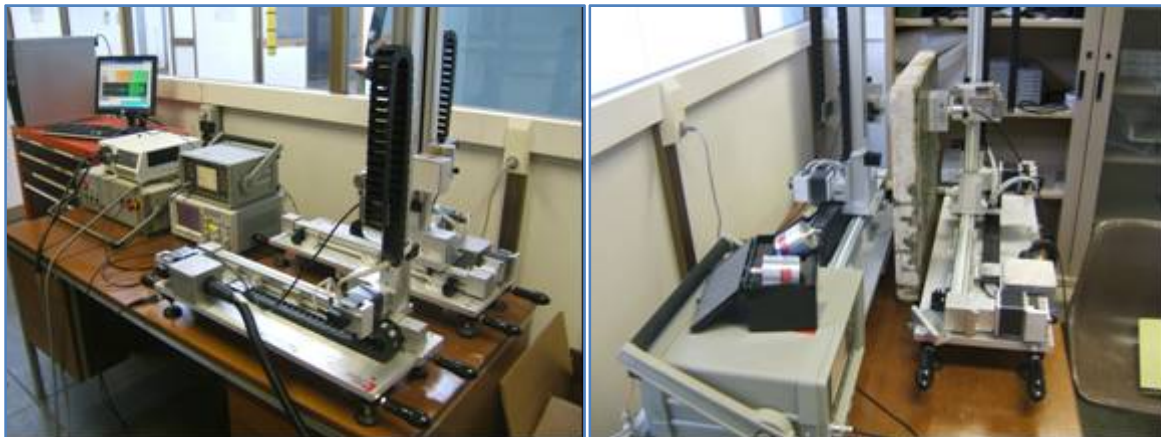
#### 4.1 Descrizione hardware e software

Il sistema di controllo basato su sistema operativo Windows XP e sviluppato in ambiente Labview . Il software gestisce sia il servo azionamento sia la digitalizzazione del segnale UT tramite interfacce su bus PCI rappresentato nello schema 5 e visibile in Figura 16:

1. Scheda controllo assi ( 4 )
2. Oscilloscopio collegato tramite ethernet



**Schema 5** Collegamenti del sistema



**Figura. 16.** Sistema automatico con sonde non a contatto

Il software di gestione svolge le attività di acquisizione dei segnali correlandola con la posizione degli assi motorizzati nelle seguenti modalità:

**radiofrequenza:** il segnale ultrasonoro viene acquisito e memorizzato

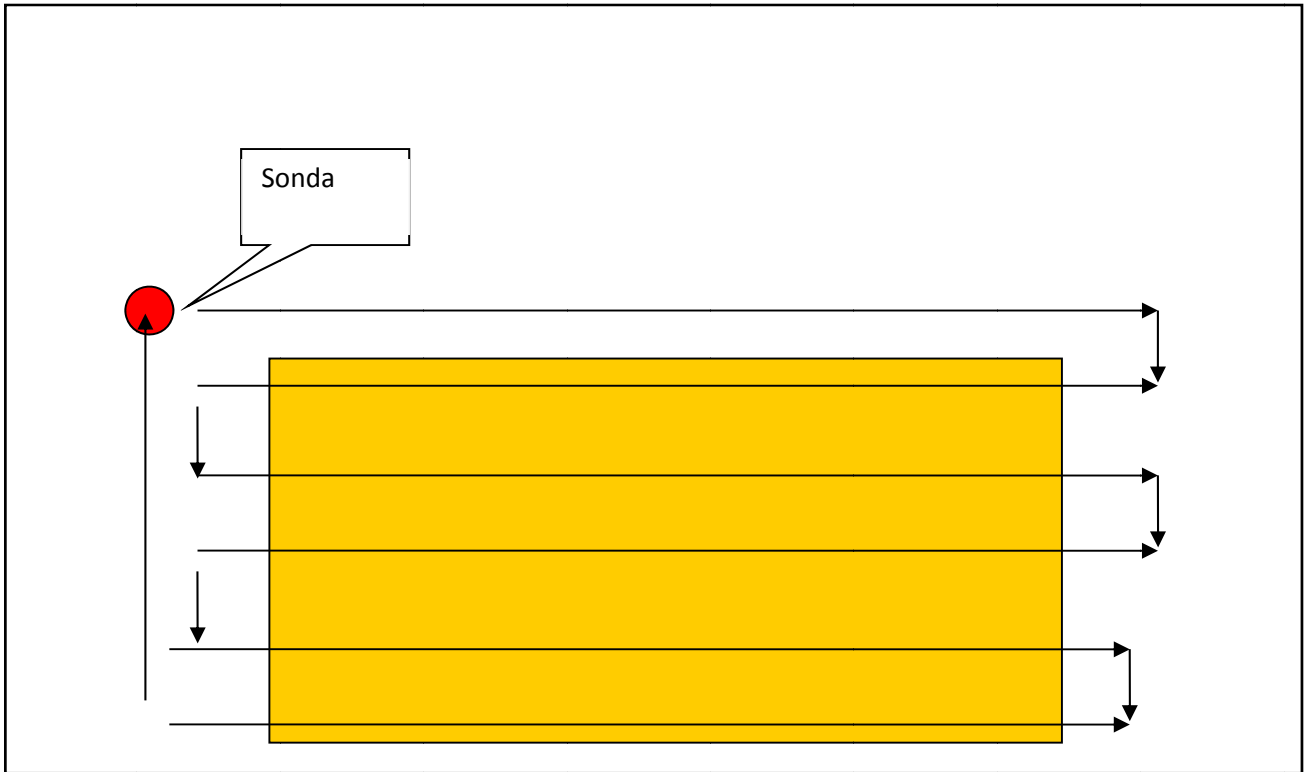
**Ampiezza:** solo il picco massimo del segnale viene memorizzato.

Il software inoltre gestisce l'elaborazione dei segnali UT e la visualizzazione Mappa C-SCAN e A-SCAN in tempo reale.

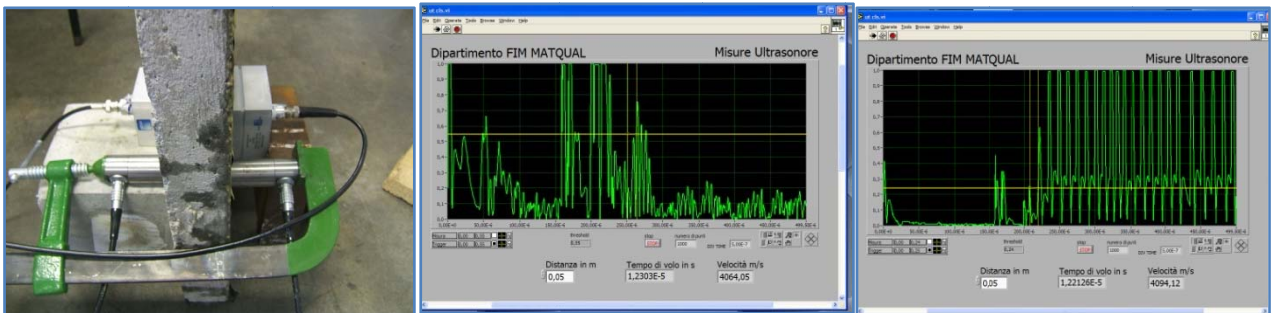
La scansione avviene nel modo seguente (schema 6) :

1. Spostamento asse X con corsa impostata
2. Acquisizione durante la corsa con passo  $n_X$ , in mm, del segnale RF
3. Ricerca massimo e aggiornamento mappa
4. Spostamento asse Y con passo  $n_Y$  in mm
5. Spostamento asse X con corsa impostata direzione opposta
6. Si ripete fino a coprire l'intera superficie del campione da esaminare
7. Ritorna al punto d'inizio in X ed Y





**Schema 6.** Scansione sul campione



**Figura 17.** Confronto tra sonde convenzionali e sonde non a contatto. Presentazione ASCAN: al centro è visualizzato il segnale relativo alle sonde non a contatto; a dx il segnale relativo a sonde convenzionali a contatto.

#### 4.2 Esame su pannello MISA con Scanner Motorizzato

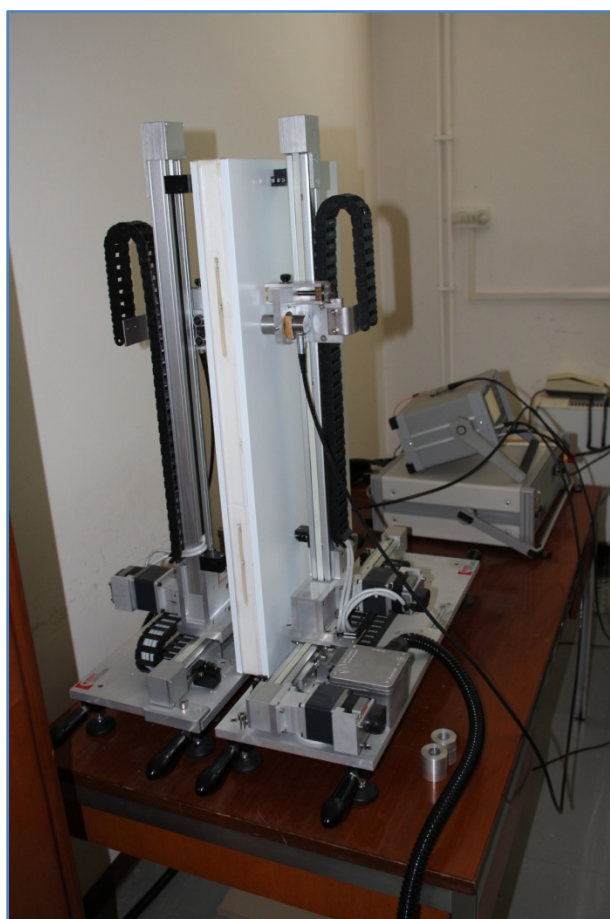
E' stata condotta la prova sul pannello MISA così costituito:

Rivestimento in lamiera di acciaio INOX AISI 304 6/10

Materiale isolante schiuma Poliuretanicca da 6 cm

Il pannello è risultato molto attenuante agli ultrasuoni ed ha richiesto una notevole energia di impulso sulla sonda trasmittente. Il pannello MISA è confrontato con un altro rivestito di materiale con accumulo di calore latente ( tipo Rubitherm RT 35 ). Entrambi i pannelli saranno sottoposti alle prove dinamiche e termiche per confrontare le prestazioni e la durabilità nel tempo.

Nella Figura 18 è visibile il pannello MISA inserito all'interno del movimentatore XZ che permette la traslazione delle sonde sul pannello. Le sonde sono molto ravvicinate in quanto il materiale è molto attenuante.

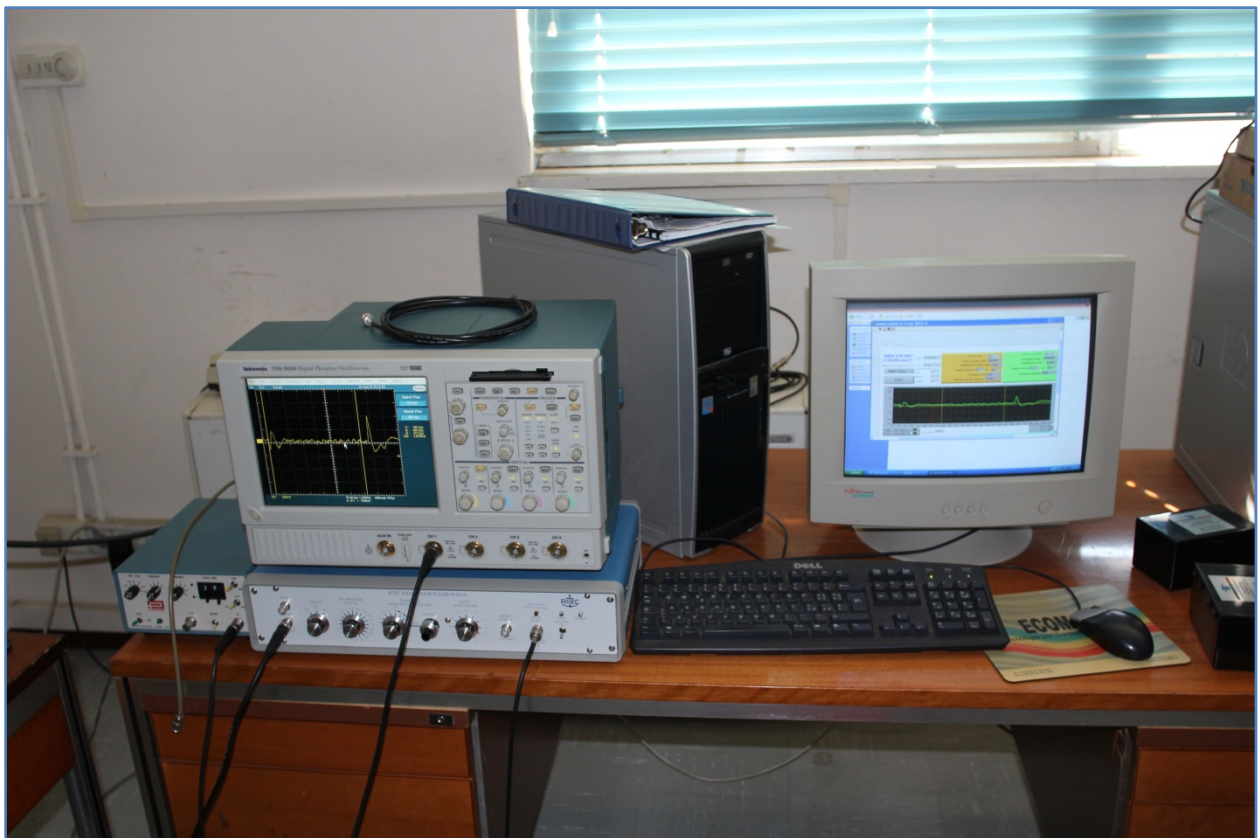


**Figura 18.** Pannello MISA durante l'ispezione con sonde prossime alla superficie

Le sonde sono pilotate dallo strumento UT ( a destra nella Figura. 19) che invia l'impulso che eccita il cristallo piezoelettrico della sonda trasmittente. La sonda ricevente sul lato opposto riceve l'onda che ha attraversato il pannello e la converte nuovamente in un segnale elettrico di alcuni mV che viene amplificato dallo strumento UT. Il segnale amplificato è poi acquisito e digitalizzato dall'oscilloscopio e memorizzato nel computer insieme alle coordinate XZ ( Figura. 20 ).



**Figura 19.** Sistema di movimentazione e strumento Ultrasonoro



**Figura 20.** Sistema di acquisizione dati RF

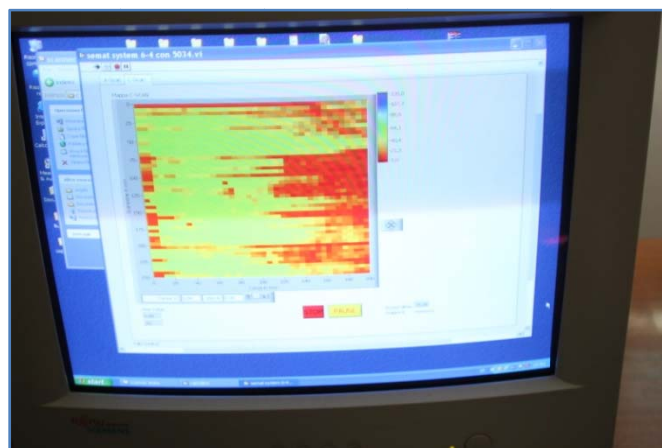
**Tabella 6.** Caratteristiche dello Scanner

Scanner	4 assi
Corsa X	200 mm
Index Z	200 mm
Risoluzione	1 mm
Motori	Stepper
Oscilloscopio	Tektronics 5034
Computer	HP 4100

Nelle Figure 21 e 22 è visibile il software ENEA che acquisisce il segnale RF ( verde ) e visualizza la mappa ultrasonora in una altra schermata. Il colore rappresenta l'ampiezza massima del segnale RF all'interno dei cursori gialli verticali della fig 16. Il colore rosso indica forte attenuazione ( ampiezza bassa ) e il colore verde bassa attenuazione ( ampiezza alta ). Dove la schiuma è più compatta e non sono presenti vuoti l'onda trasmessa è intensa e raggiunge la sonda opposta. Mentre nelle zone vuote e poco compatte l'onda non viene trasmessa e non raggiunge bene la sonda ricevente.



**Figure 21.** Segnale acquisito

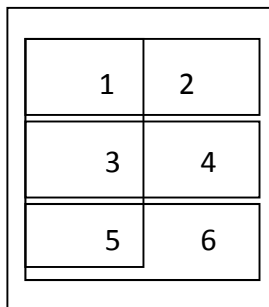


**Figure 22.** Mappa dei risultati ultrasonori



### 4.3 Esame su pannelli prima e dopo le prove Dinamiche su 6 punti

Le mappe del pannello MISA indicano una discreta omogeneità si è quindi deciso di effettuare le misure successive su sei punti così disposti:



Su entrambi i pannelli sono state realizzate prove ultrasonore: in Tabella 7 sono riportate le caratteristiche della relativa strumentazione.

**Tabella 7.** Caratteristiche dello strumentazione Ultrasonora

Strumento UT	GE USM 25 LF
Sonde	Frequenza: 50 KHz Diametro: 1"
Tecnica UT	Trasmissione
Amplificazione	MISA 70 dB MISA + PCM 86 dB PCM 40 dB

Inoltre, per evidenziare gli effetti delle prove dinamiche vibrazionali sulla struttura del pannello modificato, i test su tavola vibrante sono stati preceduti e susseguiti da prove non distruttive di tipo ultrasonoro, volte ad evidenziare le eventuali disomogeneità dei pannelli stessi (compattezza strutturale, delaminazione, presenza di vuoti ed eventuali cambiamenti di fase...) dovuti all'esposizione a vibrazioni per un trasporto su strada equivalente in circa 1000 miglia.

In particolare è stato misurato il tempo di propagazione dell'onda ultrasonora e calcolata la velocità media del suono nel mezzo e la deviazione standard nei 6 punti del pannello con e senza il materiale PCM e prima e dopo le sollecitazioni dinamiche. Le prove ultrasonore sono state effettuate anche solo sul materiale PCM.

I risultati di questi test sono propedeutici per la verifica dell'effetto delle vibrazioni sia sul comportamento di altri materiali a cambiamento di fase di varia composizione (es. sali idratii) nella configurazione di posizionamento sul tetto e/o sulle pareti laterali della cella frigorifera sia per la verifica della criticità relative da una parte, ai sistemi di contenimento dei PCM (rigidi o flessibili) e

dall'altra, alle tecniche di incollaggio/giunzione tra le pareti del pannello sandwich ed il contenitore/i dei PCM.

Il confronto dei risultati (valori medi) ottenuti sul pannello modificato con l'applicazione dei PCM per quanto concerne le prove ultrasonore eseguite prima e dopo i test su tavola vibrante sono riportate in tabella 8.

Per i dettagli dei risultati ottenuti nelle prove ultrasonore pre/post test su tavola vibrante si vedano invece le tabelle 9-14.

**Tabella 8.** Prove ultrasonore pre/post test su tavola vibrante- valori medi

	Pannello MISA prima	dopo	Pannello Misa + PCM prima	Dopo	Involucro con PCM
Velocità sonora media m/s	671	670	228	222	773
Deviazione standard m/s	24	9	203	206	26
Stato nei 6 punti di misura	Omogeneo, uniforme Velocità Bassa	Omogeneo, uniforme Velocità inalterata	Disomogeneo variabile Velocità Molto Bassa	Disomogeneo variabile Velocità inalterata	Omogeneo, uniforme Velocità Bassa

**Tabella 9.** Prove ultrasonore pre test su tavola vibrante- Pannello T.Q.

Pannello TQ MISA prima						
Punto	1	2	3	4	5	6
	522	540	545	520	510	501
	530	550	545	536	506	510
	538	551	550	538	507	502
Media	530	547	547	531	508	504
Velocità impostato sullo strumento mm/s	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06
Tempo di propagazione dell'onda sonora nel punto in sec	8.98E-05	9.27E-05	9.27E-05	9.01E-05	8.60E-05	8.55E-05
Spessore attraversato in mm	60	60	60	60	60	60
Velocità media m/s sul punto ricalcolata	668	647	648	666	697	702

**Tabella 10.** Prove ultrasonore pre test su tavola vibrante- Pannello con PCM.

Pannello MISA + PCM prima						
Punto	1	2	3	4	5	6
	5973	826	5524	3466	1456	2072
	6343	758	6554	4307	1171	2342
	5780	811	7615	3566	1339	2460
Media	6032	798	6564	3780	1322	2291
Velocità impostato sullo strumento mm/s	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06
Tempo di propagazione dell'onda sonora nel punto in sec	1.02E-03	1.35E-04	1.11E-03	6.41E-04	2.24E-04	3.88E-04
Spessore attraversato in mm	80	80	80	80	80	80
Velocità media m/s sul punto ricalcolata	78	591	72	125	357	206

**Tabella 11.** Prove ultrasonore post test su tavola vibrante- Pannello T.Q.

Punto	1	2	3	4	5	6
	532	543	522	516	527	523
	528	544	531	524	523	522
	527	538	532	525	520	528
Media	529	542	528	522	523	524
Velocità impostato sullo strumento mm/s	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06
Tempo di propagazione dell'onda sonora nel punto in sec	8.97E-05	9.18E-05	8.95E-05	8.84E-05	8.87E-05	8.89E-05
Spessore attraversato in mm	60	60	60	60	60	60
Velocità media m/s sul punto ricalcolata	669	654	670	679	676	675



**Tabella 12.** Prove ultrasonore post test su tavola vibrante- Pannello con PCM

Punto	1	2	3	4	5	6
	6320	814	7400	5653	1656	2425
	6399	780	7300	4067	1647	2352
	6900	760	7199	4677	1533	2261
Media	6540	785	7300	4799	1612	2346
Velocità impostato sullo strumento mm/s	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06	5.90E+06
Tempo di propagazione dell'onda sonora nel punto in sec	1.11E-03	1.33E-04	1.24E-03	8.13E-04	2.73E-04	3.98E-04
Spessore attraversato in mm	80	80	80	80	80	80
Velocità media m/s sul punto ricalcolata	72	602	65	98	293	201

**Tabella 13.** disposizione spaziale sul pannello TQ MISA in m/s dei punti di misura

				prima		dopo	
2	1			647	668	654	669
4	3			666	648	679	670
6	5			702	697	675	675
disposizione spaziale sul pannello MISA + PCM in m/s dei punti di misura							
				prima		dopo	
2	1			591	78	602	72
4	3			125	72	98	65
6	5			206	357	201	293

**Tabella 14.** Prove ultrasonore post test su tavola vibrante- PCM ( Solo la stringa distaccata )

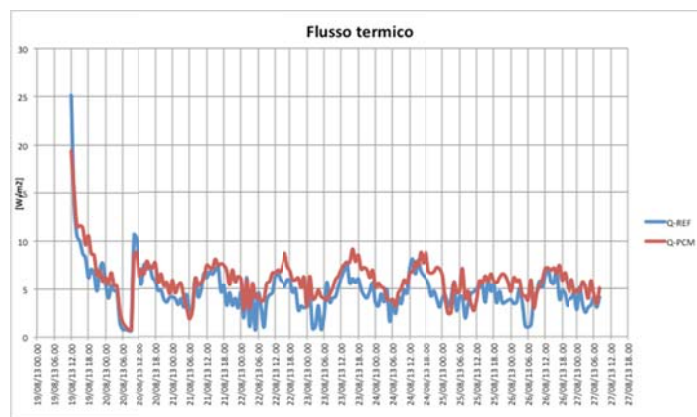
Punto	1	2	3	4	5	6
	152		159		149	
	153		158		147	
	156		155		146	
Media	154		157		147	
Velocità impostato sullo strumento mm/s	5.90E+06		5.90E+06		5.90E+06	
Tempo di propagazione dell'onda sonora nel punto in sec	2.60E-05		2.67E-05		2.50E-05	
Spessore attraversato in mm	20	20	20	20	20	
Velocità media m/s sul punto	768		750		801	

## 5 Conclusioni

Queste prime risultanze sperimentali, collegate con quelle ottenute dalla Università Politecnica delle Marche, con cui si è lavorato in stretto collegamento, hanno evidenziato:

- L'applicazione dei PCM sulla struttura sandwich delle celle frigorifere può comportare, ottimizzando l'ingegnerizzazione del processo, un reale diminuzione dei consumi energetici.

Di seguito si riporta un grafico del flusso entrante nel quale si può evidenziare lo sfasamento operato dal PCM nella cella che lo utilizza (linea rossa) rispetto a quello entrante nella cella di riferimento (linea azzurra). La maggiore altezza dei picchi della linea rossa rispetto a quelli della linea blu è dovuta al sistema di packaging della paraffina (PCM) costituito da un contenitore metallico di alluminio il cui comportamento termico prevale su quello del PCM.



**Figure 23.** Flusso termico cella frigorifera

- Le problematiche relative all'inserimento dei PCM nelle/sulle pannelli frigoriferi appare al momento essere l'elemento più critico:
  - La soluzione ottimale consisterebbe nella inclusione dello strato di PCM all'interno della struttura sandwich;
  - Appare sconsigliabile la dispersione di microgranuli di PCM (Figura 24) all'interno dello strato isolante di poliuretano, in quanto per avere un effetto significativo in termini di sfasamento temporale dei flussi in entrata ed in uscita, si dovrebbe aumentare considerevolmente lo strato di poliuretano in modo che contenga la quantità sufficiente di PCM;



**Figure 24.** Granuli di PCM microincapsulato

- Appare più percorribile l'inserimento di uno strato omogeneo di PCM, opportunamente contenuto all'interno della struttura sandwich;
  - Appare consigliabile l'utilizzo di contenitori polimerici, sia per ragioni di peso che di compatibilità chimica, al posto di quelli metallici anche se costituiti da elementi leggeri e flessibili.
- L'utilizzo in condizioni statiche (Figura 25) minimizza le problematiche derivanti dalle possibili delaminazioni che possono insorgere nella struttura sandwich quando sottoposta a condizioni critiche quali ad esempio quelle per applicazioni nel trasporto stradale o ferroviario;



**Figura 25** Contenitori PCM su cella frigorifera in condizioni statiche

Quanto sopra è ben evidenziato dalle sperimentazioni effettuate, nel Centro ENEA della Casaccia, sia pannelli frigoriferi Tal Quali che su quelli su cui era stato applicato lo strato di PCM:

- Le misure ultrasoniche effettuate sul pannello TAL QUALE non hanno messo in evidenza alcuna variazione strutturale del pannello stesso prima e dopo il test su tavola: le velocità trasmesse nei diversi punti sono risultate omogenee fra loro e confrontabili.
- Al contrario le misure effettuate sui pannello rivestito con PCM sono risultate molto disomogenee fra loro. Ciò si è ritenuto, in prima analisi, imputabile al fatto che il sistema di incollaggio tra le due parti sia risultato poco efficace.
- Mentre, c'è da rilevare, che lo strato di PCM di tipo paraffinico "Rubitherm RT 35" presente all'interno dell' involucro di alluminio, è risultato essere uniformemente distribuito, non presentando fenomeni di accumulo differenziale lungo l'asse longitudinale. E' importante sottolineare che questa situazione potrebbe non ripetersi nel caso di utilizzo, come PCM, di sali idrati.

Inoltre al fine di simulare l'impiego dei pannelli sia sulle pareti laterali che sul tetto delle celle frigorifere erano state previste in prima ipotesi, prove sui pannelli posti sia in posizione verticale che orizzontale.

Purtroppo, come precedentemente rilevato, a causa del cattivo funzionamento del sistema di incollaggio tra pannello e contenitori del PCM, si è verificato che, a conclusione del test a

vibrazione, i contenitori del PCM , risultavano essere distaccati (Figura 26) e non è stato possibile pertanto ripetere le prove sui pannelli posti in posizione orizzontale.

Ne deriva che nel proseguio del Progetto dovrà essere posta una estrema attenzione alle modalità tecnologiche di “accoppiamento” del PCM con il pannello frigorifero.

Questo, come prima descritto, comporterà lo studio sia della tipologia del contenitore, metallico o in materiale plastico, rigido o flessibile, posto all’esterno o all’interno della struttura sandwich.

Inoltre sarebbe opportuno progettare per le future attività sperimentali su tavola vibrante, un mock-up strutturale rappresentativo delle celle frigorifere al fine di riprodurre le effettive condizioni di esercizio dei pannelli mediante un' opportuna interfaccia metallica da ancorare alla tavola.



**Figura 26** Pannello con PCM dopo il test su tavola