



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione e caratterizzazione di pannelli sandwich contenenti Materiale a Cambiamento di Fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere per il trasporto ferroviario

L. Quercia, G. De Canio, M. Mongelli, I. Roselli,
A. Colucci, F. Di Biagio, A. Tati

OTTIMIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI PANNELLI SANDWICH CONTENENTI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) PER LA REALIZZAZIONE DI CELLE FRIGORIFERE PER IL TRASPORTO FERROVIARIO

L. Quercia, G. De Canio, M. Mongelli, I. Roselli, A. Colucci, F. Di Biagio, A. Tatì (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

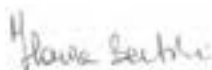
Piano Annuale di Realizzazione 2013

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

Progetto: C1 "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi"

Obiettivo: D "Tecnologie per l'industria del freddo"

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	8
2.1 REALIZZAZIONE STRUTTURE DI CONTENIMENTO DEL PCM	8
2.2 REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI DEI PANNELLI MULTISTRATO.....	12
2.3 PROVE DINAMICHE SU TAVOLA VIBRANTE	20
2.4 SISTEMA DI CONTROLLO.....	21
2.5 SISTEMA DI ACQUISIZIONE 3DVISION	22
2.5.1 Accuratezza del sistema 3DVISION	23
2.5.2 Tecniche di filtraggio	24
2.6 PROVE ULTRASONORE	27
2.6.1 Descrizione hardware e software	28
2.7 SET UP DI PROVA E RISULTATI SPERIMENTALI	30
2.7.1 Risultati sperimentali in termini di spostamento misurati mediante il sistema 3DVISION	30
2.7.2 Misure soniche esame su pannello UPM con scanner motorizzato.....	37
2.7.3 Esame su pannelli prima e dopo le prove dinamiche su 20 punti	43
3 CONCLUSIONI.....	52
4 BIBLIOGRAFIA.....	53
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	54

Sommario

L'attività sperimentale ENEA è stata finalizzata alla caratterizzazione su tavola vibrante e ultrasonora di prototipi di pannelli a sandwich contenenti Materiali a Cambiamento di fase (PCM), opportunamente contenuto, per la realizzazione di celle frigorifere specificatamente concepite per il trasporto ferroviario.

Il primo passo è stato la progettazione e messa a punto, insieme ad UNIPM, del sistema di packaging necessario al contenimento del PCM e di implementazione dei PCM con gli strati isolanti dei pannelli. E' stato studiato un sistema di impacchettamento del PCM la cui tecnologia è derivata dal packaging dei prodotti alimentari. Il primo prototipo prodotto è stato realizzato in polietilene stampato con la tecnica del vuoto in aspirazione: a partire da un foglio di polimero riscaldato, sotto l'azione di forze di richiamo per depressione, si genera un pannello con un reticolo a maglia quadrata di 256 tasche aventi dimensioni 3 cm x 3 cm x 1,5 cm. Tale pannello dopo il riempimento delle tasche con il PCM deve essere sigillato con un foglio di PVC saldato a pressione e ad una certa temperatura compatibile con i materiali.

La prima sperimentazione su questo prototipo ha evidenziato difetti costruttivi sia di tipo dimensionale che di tenuta e quindi si è passati alla evoluzione che ha portato al successivo prototipo caratterizzato da un reticolo a maglia quadrata di 81 tasche aventi dimensioni 5 cm x 5 cm x 3 cm di profondità. Considerando le esigenze sperimentali, sono stati prodotti alcuni contenitori aventi dimensioni 51 cm x 51 cm. Per il riempimento di tutti i contenitori è stata utilizzato come PCM il Rubitherm RT 35, seguendo le indicazioni di UNIPM. La paraffina, portata totalmente a fusione con un forno elettrico, è stata utilizzata per il riempimento delle tasche di ciascun contenitore, solidificandosi poi lentamente termalizzando a temperatura ambiente. I contenitori sono poi stati sigillati termicamente a pressione applicando una pellicola di alluminio alla pressione di 3bar ed una temperatura di 170°C.

A questo punto si è proceduto alla realizzazione dei prototipi di parete delle celle frigorifero usati successivamente sia per le prove dinamiche e di caratterizzazione ultrasonora in ENEA che per le prove indoor di comportamento termico presso UNIPM. I prototipi del pannello ingegnerizzato sono stati realizzati utilizzando un lamierino di acciaio plastificato dello spessore di 8/10 mm, schiuma poliuretanica, le strutture di contenimento del PCM realizzate ed infine un telaio laterale in tavola di legno. Le schiuma poliuretanica è stata scelta in base alle caratteristiche di espansione successive alla operazione di iniezione nell'intercapedine formatasi tra lo strato di PCM ed il lamierino di chiusura interno. Utilizzando la stessa procedura, ma tralasciando lo strato di PCM, è stato realizzato il pannello di riferimento per effettuare i dovuti confronti nelle prove dinamiche e di caratterizzazione ultrasonora.

I prototipi dei due pannelli multistrato, con e senza PCM sono stati quindi verificati sperimentalmente su tavola vibrante per una prima verifica delle caratteristiche meccaniche che valutasse l'influenza della presenza del PCM opportunamente contenuto nel packaging realizzato.

I test dinamici sono stati eseguiti sulla tavola vibrante di dimensioni 2x2 [m]. Le prove dinamiche su entrambi i pannelli sono state precedute e seguite da controlli non distruttivi di tipo ultrasonico volti ad evidenziare le eventuali disomogeneità nei pannelli stessi dovuti all'esposizione a vibrazioni per un trasporto su strada equivalente a 1000 miglia.

I dati sperimentali sono stati acquisiti mediante accelerometri tradizionali triassiali e tramite il sistema denominato 3DVision installato in laboratorio. E' un sistema opto-elettronico in grado di registrare il moto di marcatori in uno spazio tridimensionale tramite la triangolazione dei dati acquisiti da una "costellazione" di telecamere. L'utilizzo di questo sistema, consentendo l'acquisizione diretta delle traiettorie dei marcatori posti sui pannelli durante le prove dinamiche, ha lo scopo di evidenziare mediante la misura degli spostamenti tra i marcatori stessi, rilevati ad esempio lungo lo spessore del pannello, eventuali criticità dovute a scollamenti e/o rigonfiamenti causate da possibili disomogeneità strutturali provocate dal processo di invecchiamento simulato.

Entrambi i pannelli sono stati sottoposti a prove ultrasoniche prima e dopo i test vibrazionali volte ad evidenziare eventuali disomogeneità dovute alle prove su tavola. Le prove eseguite sul pannello con il PCM

hanno mostrato una discreta omogeneità. Le prove ultrasoniche eseguite prima e dopo i test su tavola vibrante hanno evidenziato che, laddove il riempimento è omogeneamente distribuito all'interno della struttura a sandwich, non si sono verificate sostanziali attenuazioni nella trasmissione dei segnali imputabili a presenza di vuoti rilevabili da possibili scollamenti/delaminazioni/cambiamenti di fase.

I risultati di test eseguiti sono da ritenersi propedeutici alla verifica dell'effetto delle vibrazioni sul comportamento di altri materiali a cambiamento di fase di varia composizione (es. sali idrati).

E' da studiare il comportamento di questi materiali nella configurazione di posizionamento verticale/orizzontale relativa al tetto ed alle pareti laterali della cella frigorifera; a tal fine sono da individuare eventuali 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

1 Introduzione

Il processo di refrigerazione è responsabile dell'8% del consumo energetico totale in tutto il mondo e incide per un 2,5% sulle emissioni dei gas serra pertanto, anche una minima riduzione di tali percentuali rappresenterebbe un traguardo importante. Una ottimizzazione della catena del freddo per i prodotti freschi, dalla produzione al consumo, può portare sia a notevoli miglioramenti della qualità del prodotto al consumatore, che a un significativo risparmio energetico: questo risparmio si può ottenere con diversi approcci, cercando di ottimizzare le tecnologie di produzione e conservazione del freddo nei diversi anelli della complessa catena (vedi Figura 1.1).

I punti più critici della catena dal punto di vista dell'obiettivo finale della catena del freddo, che mira a conservare la qualità dei prodotti, sono certamente legati al trasporto, ed in particolare alle interfacce tra le varie zone e/o le diverse tipologie di trasporto.

Lo sviluppo continuo della logistica consente ormai una quasi completa intermodularità anche dei trasporti refrigerati. Alla base del trasporto intermodale c'è la possibilità di trasferire la merce da un tipo di vettore ad un altro senza dover rompere il carico, quindi spostando l'intero contenitore da nave, a treno, a camion: l'unità di carico.

L'unità di carico più utilizzata che interessa l'intermodale ferroviario è il container. A partire dal 1966, al fine di uniformare i tipi di unità di carico in modo da garantirne la compatibilità su tutti i mezzi di trasporto e nei traffici internazionali soprattutto, ed all'origine marittimi, sono state stabilite delle norme obbligatorie sotto l'egida dell'ISO americana, per la regolamentazione delle misure, pesi, definizioni e marcatura dei containers: i contenitori, appunto, del carico che da allora sono diventati in assoluto lo standard del trasporto mondiale sulla lunga distanza, soprattutto quando sono interessate tratte oceaniche. L'elemento portante del container è un telaio in acciaio, costituito da montanti d'angolo e da travi longitudinali e trasversali, sia inferiori che superiori (pavimento e copertura). Questa struttura è da sola sufficiente a garantire la stabilità e la capacità portante del container. Il pavimento, le pareti e la copertura hanno solo funzione di trasferire il peso del carico sulla struttura portante e di protezione verso l'esterno. Perciò pareti e copertura sono le parti meno resistenti di un container. Mentre il pavimento è composto di solito da travi in acciaio con un soprastante piano in tavole di legno, le pareti e la copertura sono di lamiera grecata di acciaio o di alluminio, o in legno protetto da materiale plastico o foglio di alluminio. Containers isolati o refrigerati sono composti da adatti materiali isolanti per pavimento, pareti e copertura. Un obiettivo molto interessante per l'ottimizzazione ed il risparmio energetico nella catena del freddo è stato individuato quindi nell'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase per migliorare le prestazioni energetiche dei containers refrigerati.

L'utilizzo del trasporto ferroviario si sta sempre più espandendo anche ai prodotti refrigerati/congelati mediante l'utilizzo di speciali container frigoriferi appositamente attrezzati. Tra le strategie attive impiegabili per il miglioramento delle caratteristiche di isolamento termico e degli spessori isolanti delle pareti delle celle frigorifere riscuote un crescente interesse l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase. Tali materiali termoregolanti rappresentano una soluzione tecnologica innovativa nella progettazione degli

spessori isolanti delle pareti delle celle frigorifere perché sono un promettente sistema per smussare le fluttuazioni giornaliere della temperatura ambiente attraverso la riduzione dei picchi di temperatura interna; essi pertanto, risultano in grado di contribuire al contenimento dei consumi energetici necessari alla climatizzazione degli ambienti.

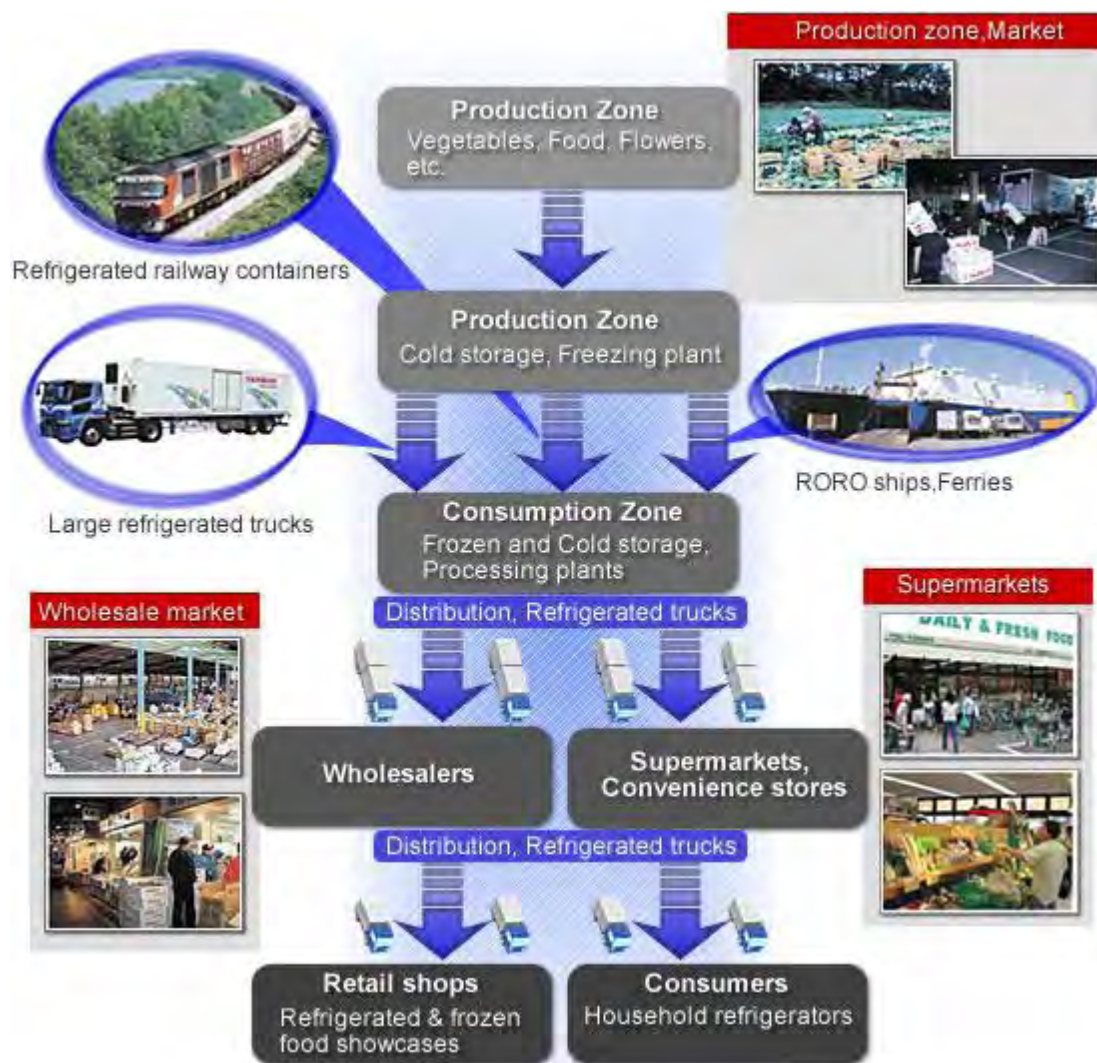


Figura 1.1: Schema generale della catena del freddo.

L'attività di ricerca si propone l'applicazione dei materiali a cambiamento di fase sulle superfici esterne delle celle frigorifere con l'intento di ridurre i carichi termici entranti nella cella refrigerata derivanti dall'assorbimento della radiazione solare e dalla differenza di temperatura tra l'aria esterna del periodo estivo e quella interna alla cella. Poiché il mantenimento delle condizioni di temperatura ottimale all'interno della cella frigorifera è dovuto al funzionamento di una macchina frigorifera elettrica a compressione funzionante secondo il ciclo inverso di Carnot, ne consegue che l'aumento dei carichi termici entranti nel vano refrigerato fa aumentare il periodo di funzionamento della macchina frigo, fa aumentare la potenza impegnata di compressione e quindi produce l'aumento del consumo di energia elettrica. La presenza del materiale in passaggio di fase ha inoltre lo scopo di garantire una più lungo periodo di mantenimento delle caratteristiche fisiche dei materiali refrigerati, contenuti all'interno della cella, anche in fase di black-out elettrico in quanto l'inerzia termica introdotta nell'involucro della cella dal PCM, diminuendo i carichi entranti, determina il mantenimento della temperatura ottimale interna per un periodo la cui lunghezza è legata al tipo di materiale a cambiamento di fase utilizzato, al suo spessore, alla composizione della stratificazione del pannello di tamponamento e infine alle caratteristiche di velocità di

avanzamento della cella ed ambientali del luogo di stazionamento o passaggio. Le proprietà termiche della cella vanno poi progettate e realizzate in sintonia con le proprietà meccaniche che ne determineranno il funzionamento effettivo in condizioni reali di esercizio.

La ricerca, basata su un'articolazione triennale, è giunta al termine del secondo anno di un programma generale che prevedeva un primo anno di valutazioni preliminari, un secondo anno di ingegnerizzazione del sistema e un possibile terzo anno per la sperimentazione, attraverso monitoraggio, su veicolo viaggiante in condizioni reali, previa realizzazione di container refrigerato da azienda specializzata del settore.

Alla luce di quanto emerso dai lavori del primo anno, nel secondo anno, si è proceduto alla progettazione termica e meccanica dei pannelli contenenti il materiale a cambiamento di fase e al successivo utilizzo dei prototipi prodotti per effettuare le dovute sperimentazioni che ne caratterizzino il comportamento termico e meccanico.

Le fasi in cui si sono svolte le varie attività hanno avuto nel loro complesso l'obiettivo di confermare la bontà del progetto tecnologico e quindi, attraverso la validazione sperimentale dei risultati teorici, giungere alla completa ingegnerizzazione dell'involucro delle celle frigorifere.

Più in dettaglio i lavori del secondo anno di attività hanno avuto la seguente articolazione:

- progettazione del sistema contenimento dei PCM per l'inserimento all'interno della stratificazione. Il risultato ottenuto deriva dalla sintesi della scelta dei materiali da costruzione, delle geometrie di contenimento più appropriate per resistere alle sollecitazioni termiche e meccaniche ed infine della tecnica di riempimento e sigillatura del sistema di packaging. Il risultato finale è stato raggiunto dopo la sperimentazione di alcuni differenti prototipi;
- progettazione di il prototipo di pannello per cella frigorifero che, sulla base delle analisi teoriche sui vari modelli funzionali, prevede la posizione del sistema di contenimento del materiale a cambiamento di fase all'interno della parete tradizionale all'interfaccia tra il lamierino di protezione esterna e lo strato di schiuma poliuretanica. Attaccando il foglio di sigillatura del contenitore del PCM alla superficie interna del lamierino di protezione esterna del pannello, si otterrà una continuità per il flusso termico conduttivo proveniente dalla superficie esterna del foglio metallico assicurando così la funzione di scudo termico da parte del materiale che fonde;
- sono stati quindi realizzati prototipi sia del pannello contenente PCM che di quello tradizionale per sottoporli ai vari verifiche sperimentali necessari a valutarne le caratteristiche termiche e meccaniche. I prototipi dei pannelli con e senza PCM sono stati caratterizzati mediante test di qualificazione funzionale, mediante l'utilizzo di tecniche non distruttive di tipo ultrasonico, per verificarne la idoneità strutturale alle condizioni di esercizio. I test sono stati effettuati prima e dopo averli sottoposti a opportune prove di sollecitazione vibrazionale e dinamiche tipiche dei trasporti ferroviari per verificare che l'inserimento del sistema di contenimento del PCM nei pannelli prototipo non influenzasse l'eventuale degrado delle sue proprietà termiche e meccaniche.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Nell'ambito del piano annuale previsto per il periodo ottobre 2013-settembre 2014, sulla base dei risultati sperimentali precedentemente ottenuti, l'attività sperimentale ENEA è stata finalizzata alla caratterizzazione su tavola vibrante e ultrasonora di prototipi di pannelli a sandwich contenenti Materiali a Cambiamento di Fase (PCM), opportunamente contenuti, per la realizzazione di celle frigorifere specificatamente concepite per il trasporto ferroviario.

Le attività di ricerca condotte nel primo anno hanno permesso di verificare che l'applicazione di un materiale PCM di tipo paraffinico nella struttura sandwich delle celle frigorifere può comportare una reale diminuzione dei consumi energetici e, nel contempo, che le tecnologie di inserimento dei PCM all'interno delle strutture sandwich, rappresentano un elemento critico specie in condizioni particolari di esercizio quali ad esempio quelle dovute alle dinamiche vibrazionali tipiche dei trasporti ferroviari.

L'attività del secondo anno quindi, sulla scorta delle indicazioni ricevute dalle attività precedenti, ha puntato alla ottimizzazione della struttura sandwich contenenti PCM, di celle frigorifere specificatamente concepite per il trasporto ferroviario.

A tal fine sono state progettate e realizzate alcune strutture specifiche di contenimento in materiale polimerico del PCM individuato, successivamente inserite mediante idonee tecniche di giunzione a strutture sandwich di tipo commerciale, le quali dopo essere state sottoposte a prove di sollecitazione vibrazionale e dinamiche tipiche dei trasporti ferroviari, sono state caratterizzate mediante test di qualificazione funzionale, mediante l'utilizzo di tecniche NDT di tipo ultrasonico, per verificarne la idoneità strutturale alle condizioni di esercizio. E' immaginabile infatti che sollecitazioni particolarmente intense che possono portare alla deformazione/scollamento delle pareti isolanti, possono produrre una drastica riduzione della efficienza di immagazzinamento della energia radiante.

Dalle attività sperimentali prima descritte è stato quindi possibile da un lato evidenziare il sistema di contenimento ottimale del materiale PCM e, cosa ancora più importante, il sistema di giunzione ottimale per l'applicazione prevista e dall'altro di verificare, mediante una attività sperimentale prolungata in condizioni controllate, il reale contributo al risparmio energetico.

La collaborazione esterna prevista inizialmente per sviluppare l'ingegnerizzazione delle strutture di contenimento del PCM e successivamente l'ingegnerizzazione di pannelli multistrato contenenti PCM adatti alla realizzazione di celle frigorifere complete, è stata avviata con la ditta SA.ME che, per suoi motivi amministrativi, non ha potuto portare avanti la collaborazione e si è limitata a collaborare solo nella realizzazione delle strutture di contenimento del PCM. ENEA ed UNIPM si sono quindi impegnate a realizzare dei prototipi di pannelli multistrato per effettuare le prove dinamiche, le caratterizzazioni ultrasonore e quelle termiche che consentissero di valutare complessivamente le potenzialità dal punto di vista del risparmio energetico di una cella frigorifero completamente realizzata con tali pannelli opportunamente ingegnerizzati.

I prototipi dei due pannelli multistrato, con e senza PCM sono stati quindi verificati sperimentalmente su tavola vibrante per una prima verifica delle caratteristiche meccaniche che valutasse l'influenza della presenza del PCM opportunamente contenuto nel packaging realizzato.

2.1 Realizzazione delle strutture di contenimento del PCM

La metodologia prescelta per realizzare un sistema di impacchettamento del PCM è stata derivata dal packaging dei prodotti alimentari, risultando molto simile a quella normalmente utilizzata per il confezionamento dello yogurt. Questa soluzione prevede la realizzazione di pannelli di adeguate dimensioni, costituiti da una molteplicità di vaschette affiancate, di forma quadrata o rettangolare, aventi profondità uguale allo spessore che dovrà avere lo strato funzionale di PCM. Le vaschette, aperte nella parte superiore permettono il riempimento dall'alto, per caduta della paraffina in fase liquida ed infine possono essere sigillate per termosaldatura in pressione con un foglio di materiale composito. La forma

delle vaschette e la loro composizione nel pannello creano tra una vaschetta e l'altra dei vani profondi che hanno anche la funzione, successivamente alla fase di schiumatura del poliuretano, di creare una connessione tra i due strati che possa anche resistere a notevoli sollecitazioni meccaniche. L'altro lato della struttura di contenimento che viene usato per la sigillatura aderisce poi al foglio di lamierino di acciaio esterno in modo da permettere la corretta trasmissione, lato ambiente esterno, del calore prodotto sulla superficie del lamierino per assorbimento della radiazione solare. Per la costruzione del sistema di packaging sono state utilizzate tecniche industriali che hanno portato alla realizzazione di un primo prototipo (Figura 2.1.1.). Quest'ultimo è stato realizzato in polietilene stampato con la tecnica di aspirazione in depressione di un foglio di polimero riscaldato, genera un pannello con un reticolo a maglia quadrata di 256 tasche parallelepipedo aventi dimensioni 3 cm x 3 cm x 1,5 cm. Tale pannello, dopo il riempimento delle tasche con il PCM deve essere sigillato con un foglio di PVC saldato a pressione a temperatura opportuna.

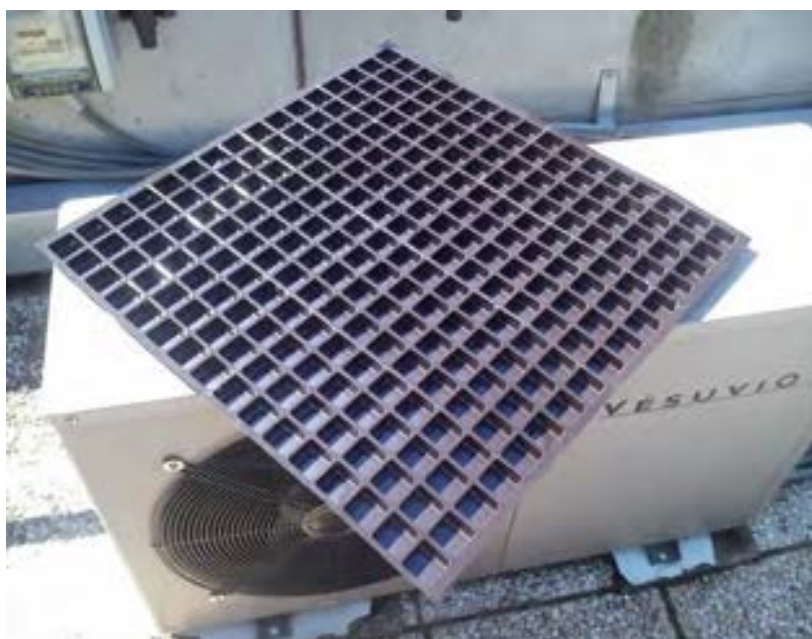


Figura 2.1.1: Primo prototipo di contenitore del PCM.

La prima sperimentazione su questo prototipo ha evidenziato difetti costruttivi sia di tipo dimensionale che di tenuta. Infatti la tecnica di aspirazione in depressione, richiamando il materiale plastico scaldato a deformarsi da piano a tridimensionale, assottiglia negli spigoli lo spessore del materiale, rendendolo debole alle sollecitazioni di variazione di volume del PCM per effetto dei passaggi di fase. Sperimentalmente dopo alcuni cicli di fusione e solidificazione alcune zone delle vaschette hanno ceduto, creando il deflusso del PCM fuso.

Questa esperienza ha suggerito il perfezionamento del disegno e della tecnica costruttiva e così si è passati alla progettazione del secondo prototipo. Quest'ultimo prevede la variazione per pannello del numero di vaschette e la variazione della tecnica costruttiva. Il nuovo pannello di contenimento del PCM è caratterizzato da un reticolo a maglia quadrata di 81 vasche, aventi forma di parallelepipedo e dimensioni 5 cm x 5 cm x 3 cm, ma realizzato con la tecnica industriale dello stampaggio (Figura 2.1.2).



Figura 2.1.2: Prototipi definitivi di contenitore della paraffina

A questo scopo è stato necessario acquisire un adeguato stampo con il quale, utilizzando i macchinari messi a disposizione dalla SA.ME, sono stati prodotti più di 30 contenitori sufficienti in prima battuta per le esigenze delle sperimentazioni, caratterizzazioni meccaniche in ENEA e termiche presso UNIPM. Sono stati quindi prodotti contenitori aventi dimensioni 51 cm x 51 cm, realizzati in PET stampato e sigillati con tecnica analoga a quella utilizzata per i primi prototipi.

UNIVPM si è occupata di acquistare il PCM selezionato in base alle attività portate avanti nel PAR2012, riempire ed infine sigillare le strutture di contenimento. Per il riempimento di tutti i contenitori è stata necessario utilizzare 160 kg di RT35HC, acquistati presso la Rubitherm GmbH di Berlino, Germania. Il PCM spedito dalla fabbrica costruttrice all'interno di un barile metallico è stato inserito all'interno di un forno per fondere il PCM alla temperatura di circa 50 °C senza creare problemi di decomposizione del materiale stesso. La paraffina, dopo essere stata portata totalmente a fusione all'interno di forno elettrico, è stata prelevata dal barile ed utilizzata per il riempimento delle tasche di ciascun contenitore (Figura 2.1.3).



Figura 2.1.3: Struttura di contenimento con PCM ancora in fase liquida.

Il PCM che ha una temperatura di fusione intorno ai 35°C lentamente solidifica cambiando visivamente la trasparenza (Figura 2.1.4).



Figura 2.1.4: Struttura di contenimento con PCM in fase solida.

La fase successiva ha richiesto la sigillatura termica a pressione costante dei contenitori applicando la pellicola sulla superficie alla pressione di 3bar ed una temperatura di 170°C, il prodotto finale è mostrato in Figura 2.1.5.



Figura 2.1.5: Struttura di contenimento del PCM pronta per l'uso.

2.2 Realizzazione dei prototipi di pannelli multistrato

La costruzione dei pannelli prototipi ha tenuto conto anche della progettazione precedentemente effettuata da UNIVPM, a seguito delle analisi numeriche agli elementi finiti di comportamento termico dei modelli funzionali di parete innovativa ipotizzati.

Nella Figura 2.2.1 si riporta il disegno esploso del pannello contenente PCM che prevede, sei componenti e cioè, partendo dall'esterno:

- Lamierino di acciaio preverniciato-spessore 8/10 mm
- Foglio di sigillatura del contenitore del PCM
- contenitore del PCM
- telaio in tavola di legno
- schiuma poliuretanic
- Lamierino di acciaio preverniciato-spessore 8/10 mm

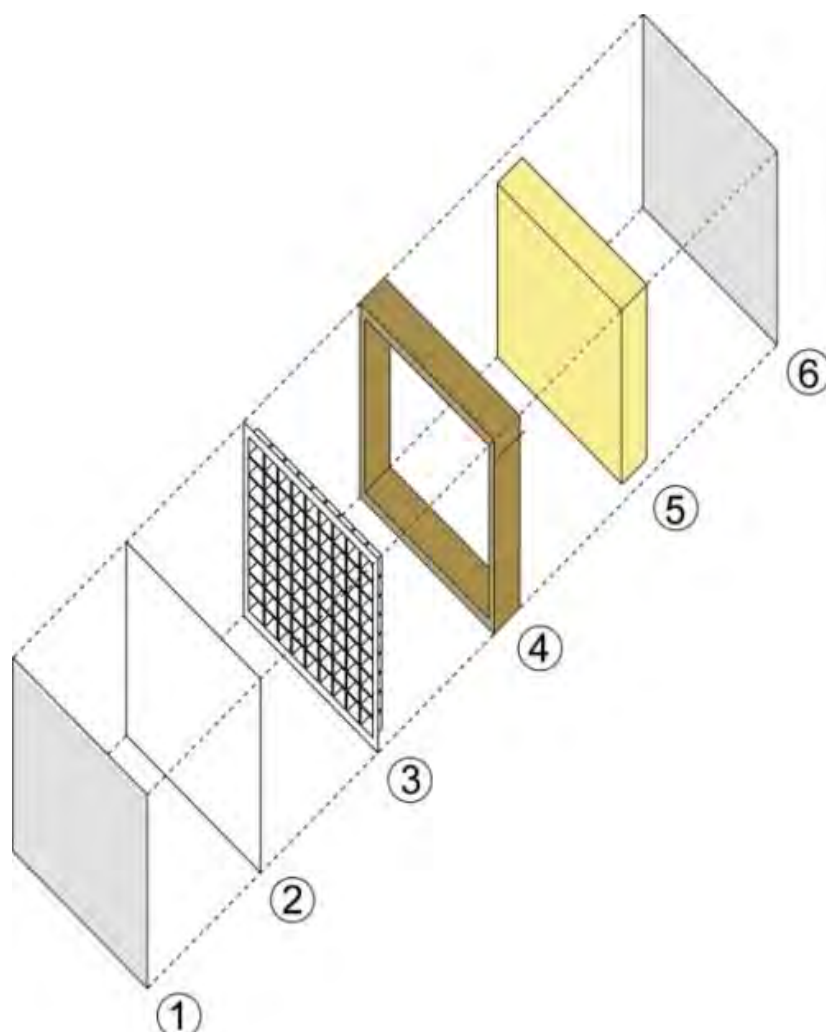


Figura 2.2.1: Struttura pannello ingegnerizzato multistrato.

Lo spessore del pannello prende origine dallo spessore dei pannelli delle celle tradizionali che come si può vedere dalla Figura 2.2.2 vengono prodotti per celle negative a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ complessivamente di 6cm ed 8cm.



Figura 2.2.2: Pannelli tradizionali per celle frigorifero.

Le fasi di realizzazione del prototipo, seguendo le indicazioni di Figura 2.2.1, hanno avuto la sequenza di seguito riportata:

Fase 1: La costruzione ha avuto inizio con la realizzazione del telaio in legno (Figura 2.2.3) che ha assunto le dimensioni interne in pianta da quelle del modulo contenitore del PCM (55cm x 55cm circa).



Figura 2.2.3: Telaio in legno per realizzazione pannello multistrato.

Fase 2: Sul bordo del telaio è stato passato uno strato di sigillante siliconico (Figura 2.2.4) che ha permesso la chiusura di una delle facce aperte del telaio con il pannello di lamiera di acciaio preverniciata (Figura 2.2.5).



Figura 2.2.4: Applicazione sigillante per la chiusura del pannello.



Figura 2.2.5: Pannello chiuso con lamierini in acciaio preverniciato.

Fase 3: Dopo avere cosparso uno strato di collante siliconico sulla superficie esterna del foglio di chiusura del contenitore del PCM (Figura 2.2.6) , si è posato lo stesso sulla faccia interna del lamierino (Figura 2.2.7) e successivamente si è chiuso il pannello con il secondo lamierino d'acciaio. (Figura 2.2.8).



Figura 2.2.6: Sigillante applicato al sistema di contenimento del PCM.



Figura 2.2.7: Posizionamento struttura di contenimento del PCM all'interno del pannello



Figura 2.2.8: Chiusura del pannello multistrato.

Come si può notare dalla Figura 2.2.7, prima della chiusura del pannello anche nella seconda faccia, la parte posteriore del contenitore del PCM presenta le tasche a forma di parallelepipedo che in una fase

successiva verranno ricoperte fino a raggiungere la superficie interna del secondo lamierino, dalla schiuma poliuretanica che determinerà lo strato isolante di 10 cm di spessore.

Fase 4: Dopo avere praticato una serie di fori passanti (Figura 2.2.9) sui due lati lunghi, opposti del telaio, è stata iniettata schiuma poliuretanica nel vano interno del pannello. La schiuma dopo l'iniezione (Figure 2.2.11, 2.2.12) ha un tempo di espansione e successivo essiccamento che la rende omogeneamente compatta, ad una densità di circa 40 kg/m^3 .



Figura 2.2.9: Realizzazione fori nel telaio.



Figura 2.2.10: Schiuma isolante.

Tabella 1.2.1: Caratteristiche fisiche della schiuma poliuretanica iniettata nel pannello.

Tipo schiuma Foam type	PUR 963	PUR 962 ⁽¹⁾	PUR 961	PUR 960
Colore Colour		giallo yellow		
Classe di infiammabilità Flammability class	DIN 4102 B2	B3		
Rendimento (espansione libera) Volume (free foamed)	~40 L	~40 L (-10°C -25L)	~40 L	~40 L
Densità Density	20÷25 kg/m ³	16÷18 kg/m ³	16÷18 kg/m ³	20÷25 kg/m ³
Allungamento alla rottura Elongation at break	DIN 53455 20÷25%	20÷30%	20÷30%	20÷25%
Conducibilità termica Thermal conductivity	20°C DIN 52612 0,039 W / mK	0,036 W / mK	0,036 W / mK	0,039 W / mK
Tempo di taglio Cutting time	Ø3cm 25÷30' - 18°C - 60% R.H.	20÷25' - 18°C - 60% R.H.	20÷25' - 18°C - 60% R.H.	25÷30' - 18°C - 60% R.H.
Temperatura di posa ⁽¹⁾ Application temperature ⁽¹⁾	5÷20° C (supporto / surface) ⁽¹⁾ +20°C (bombola / can) ⁽¹⁾			
Tempo di reticolazione Tack free time	5÷10' - 18°C - 60% R.H.			
Tempo di indurimento Hardening time (5÷20° C)	1,5 ÷ 5 h	1,5 ÷ 5 h (-10°C -10 h)	1,5 ÷ 5 h	1,5 ÷ 5 h (in funzione a temperatura ed umidità / depending on temperature and humidity)
Temperatura di esercizio Temperature resistance	-40°C + +90°C			
Stabilità dimensionale Dimensional stability	max -1%			
Assorbimento d'acqua Water absorption	DIN 53428	max 1% vol.		
Resistenza compressione Compression strength	DIN 53421	0,04 + 0,05 MPa		
Resistenza Trazione Tensile strength	DIN 53455	0,07 + 0,08 MPa		

⁽¹⁾ Temperatura di posa min. per PUR 962 WINTER è -10°C (supporto/bombola), si consiglia tuttavia una temperatura della bombola 5÷20°C
Min application temperature for PUR 962 WINTER is -10°C (surface / can), however it is recommended to have a can temperature of 5÷20°C.



Figura 2.2.11: Schiumatura in poliuretano.



Figura 2.2.12: Espansione ed essiccazione schiuma poliuretanica.

Lasciato maturare il pannello in ambiente caldo e asciutto per l'espansione del materiale isolante e l'essiccazione dei sigillanti per un periodo congruo, il pannello innovativo è risultato idoneo alla fase sperimentale con i test termici e meccanici. Per verificare in modo diretto se l'inserimento della struttura di contenimento del PCM apporta problematiche aggiuntive durante i test dinamici è stato realizzato anche un pannello con la stessa procedura ma senza strato con PCM. In Figura 2.2.13 vengono mostrati i due pannelli realizzati e dal confronto si può notare il maggiore spessore del pannello innovativo che agli stessi strati di quello base aggiunge lo spessore del contenitore di PCM per avere alla fine la stessa resistenza termica più la caratteristica di elevata inerzia termica.



Figura 2.2.13: Pannelli prototipo con e senza struttura contenimento PCM.

2.3 Prove dinamiche su tavola vibrante

Entrambi i pannelli sono stati verificati sperimentalmente sulla tavola vibrante di dimensione 2x2 [m] (Figura 2.3.1), le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 2.3.1.

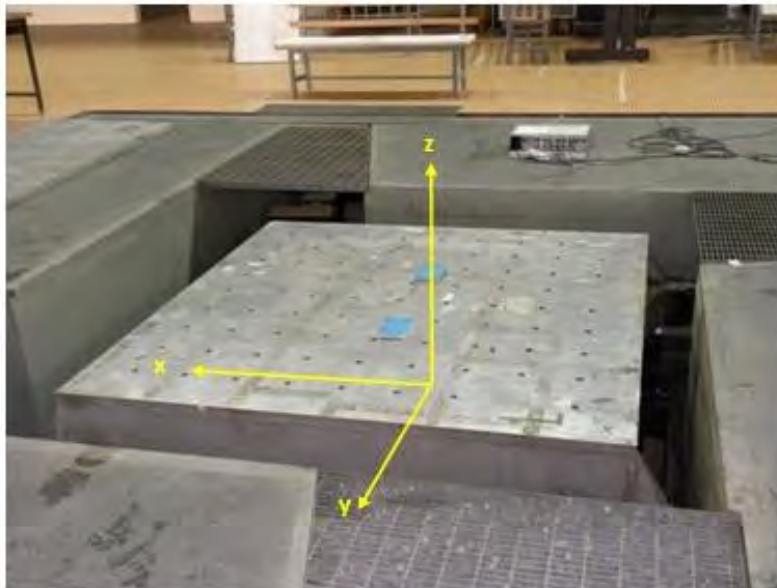


Figura 2.3.1: Tavola vibrante 2x2 [m].

Tabella 2.3.1: 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

Le prove dinamiche su entrambi i pannelli e sono state precedute e seguite 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 condotta sui campioni può considerarsi suddivisa nelle seguenti fasi:

- Prove ultrasoniche preliminari di caratterizzazione
- Test su tavola vibrante
- Prove ultrasoniche successive alle prove dinamiche
- Elaborazione dei dati sperimentali
- Conclusioni

Le prove sono state realizzate mediante il sistema hardware LMS SCADAS III a 16 canali che include un convertitore A/D a 24 bit, controllato dal software LMS Test Lab.

2.4 Sistema di controllo

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 2.4.1). Le loro caratteristiche principali sono riportati nella 2.2.1.



Figura 2.4.1: Vista dell'accelerometro PCB 356A15

Tabella 2.4.1: 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 _{rms}

2.5 Sistema di acquisizione 3DVISION

I dati delle prove dinamiche sono stati acquisiti anche mediante un sistema di tipo Motion Capture 3D denominato 3DVision, installato nel Laboratorio di Qualificazione Materiali e Componenti (Figura3) [1]. E' un sistema opto-elettronico di motion capture 3D, basato su tecnologia VICON MX, in grado di registrare il moto di marcatori (marker) in uno spazio tridimensionale tramite la triangolazione dei dati acquisizioni da una "costellazione" di telecamere [2]. Il funzionamento è assimilabile a un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere MX, una volta fissate alle pareti o montati su appositi tripodi, illuminano il proprio campo di vista per mezzo di una serie di led che emettono con lunghezze d'onda predominanti nel vicino infrarosso (NIR) ed acquisiscono la radiazione retro-riflessa dai marcatori posizionati nei punti di cui si vuole stabilire il moto. Il dato grezzo che fornisce il sistema è costituito dalla traiettoria nello spazio di tali punti in un sistema di riferimento prefissato tramite la procedura di calibrazione del sistema. Il sistema è dotato di 9 telecamere digitali MX nell'infrarosso per le acquisizioni 3D e 4 videocamere DV per i filmati sovrapponibili in sincrono con i marker. La disposizione delle telecamere, come mostrato in Figura 4 è scelta per coprire l'intera area occupata dalle tavole e dalla struttura per permettere la completa ricostruzione tridimensionale del moto. Tali camere montano un sensore CMOS capace di una risoluzione di 4 mega-pixel a 370 fps (frames al secondo di velocità di cattura che corrispondono alla capacità di campionamento del sistema in Hz).

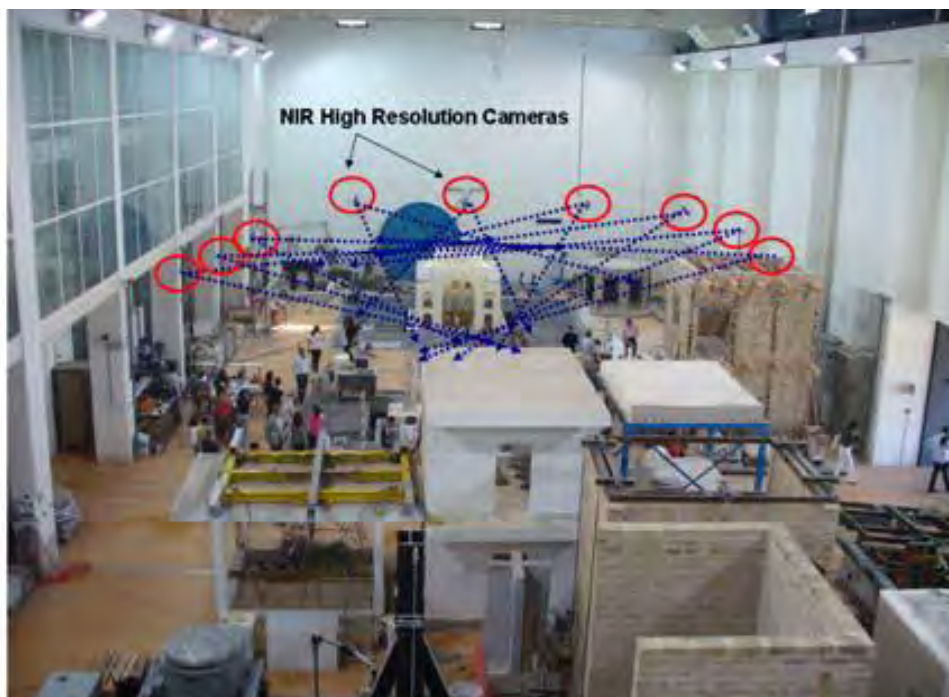


Figura 2.5.1: Vista del laboratorio delle tavole vibranti presso il C.R. ENEA Casaccia. Sono evidenziate le telecamere del sistema 3DVision.

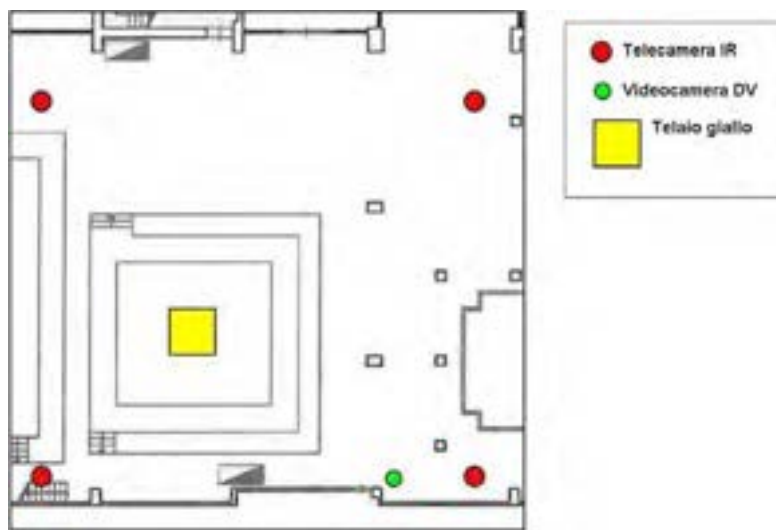


Figura 2.5.2: Configurazione delle telecamere del sistema 3D VISION

L'utilizzo di questo sistema, consentendo l'acquisizione diretta delle traiettorie dei marcatori posti sui pannelli durante le prove dinamiche, ha lo scopo di evidenziare mediante la misura degli spostamenti tra i marcatori stessi, rilevati ad esempio lungo lo spessore del pannello, eventuali criticità dovute a scollamenti e/o rigonfiamenti causate da possibili disomogeneità strutturali provocate dal processo di invecchiamento simulato.

2.5.1 Accuratezza del sistema 3DVISION

L'accuratezza delle misure effettuate con il sistema 3DVision dipende da varie tipologie di errori di misura. Un importante parametro da considerare è la risoluzione delle telecamere MX, le quali sono equipaggiate con un sensore CMOS da 4 Mpixel in grado di acquisire in full-frame fino a 370Hz e fino a 2000 Hz con parzializzazione progressiva del sensore. Inoltre, trattandosi di un sistema di visione 3D, la risoluzione geometrica raggiungibile dipende, come è noto, dalla configurazione spaziale adottata (in particolare, dalla posizione delle telecamere rispetto ai marker) e dalla qualità della calibrazione dinamica, che consiste in una procedura di acquisizione effettuata con uno strumento apposito che viene adeguatamente movimentato all'interno del volume di misura. Altro aspetto da curare è la perfetta stabilità dei supporti e/o dei tripodi delle telecamere: un minimo movimento e/o vibrazione di queste inficerebbe la validità della calibrazione effettuata. Nella specifica applicazione ai test su tavole vibranti, quest'aspetto comporta l'accortezza di posizionare i tripodi al di fuori della massa di contrasto (la quale tende a muoversi in reazione alla spinta degli attuatori oleo-dinamici della tavola) e di mantenere in perfetta efficienza il sistema di isolamento della massa di contrasto per evitare che trasmetta le suddette vibrazioni al pavimento. Dal punto di vista software assume anche notevole rilievo l'efficacia e la stabilità degli algoritmi di triangolazione e di ricostruzione 3D, i quali sono influenzati dalle condizioni di illuminazione del laboratorio, che di conseguenza devono essere il più possibile stabili. Per le usuali configurazioni adottate nel laboratorio del C.R. ENEA Casaccia, si ottengono misure di accuratezza stimabile come ordine di grandezza da ± 0.01 mm a ± 0.1 mm (Figura 5).

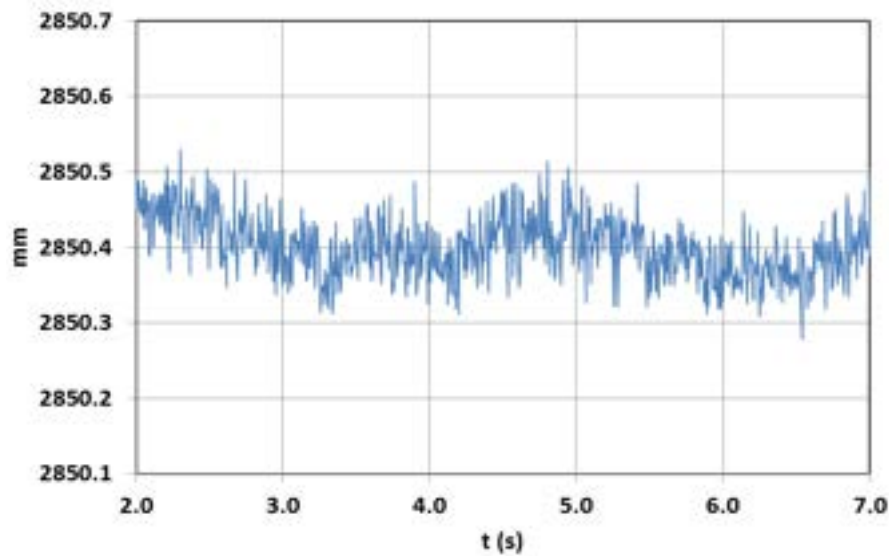


Figura 2.5.3: Errore di misura nella posizione di un marker statico.

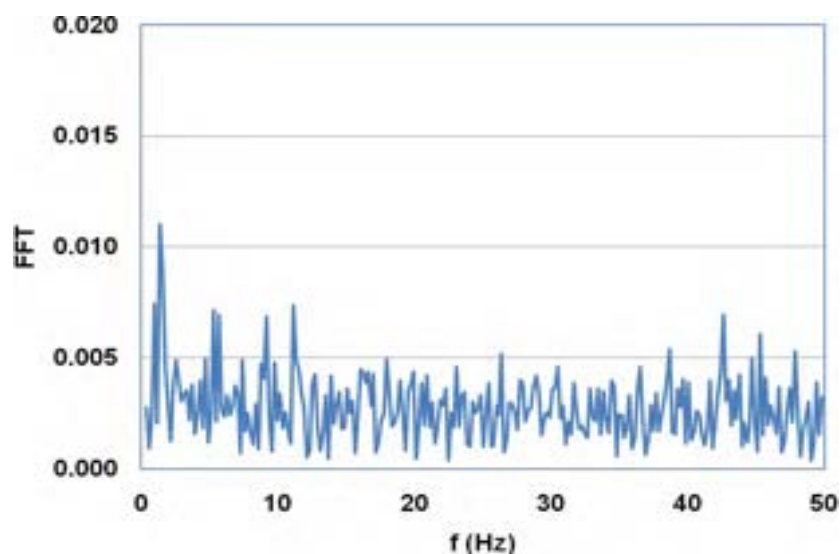


Figura 2.5.4: FFT del rumore del segnale della posizione di un marker statico.

Dall'analisi nel dominio della frequenza tramite la FFT del segnale della posizione di un marker statico, si osserva che si tratta praticamente di un rumore bianco (Figura 6).

2.5.2 Tecniche di filtraggio

L'ampiezza dell'errore in spostamento si propaga in velocità e accelerazione con l'aumentare della frequenza (Figura 7). Questo effetto si riscontra sperimentalmente sull'accelerazione ottenuta dalle misure con il sistema 3DVision (Figura 8) [3].

Inoltre, un'altra causa di rumore è insita nell'operazione stessa di derivazione numerica del segnale acquisito.

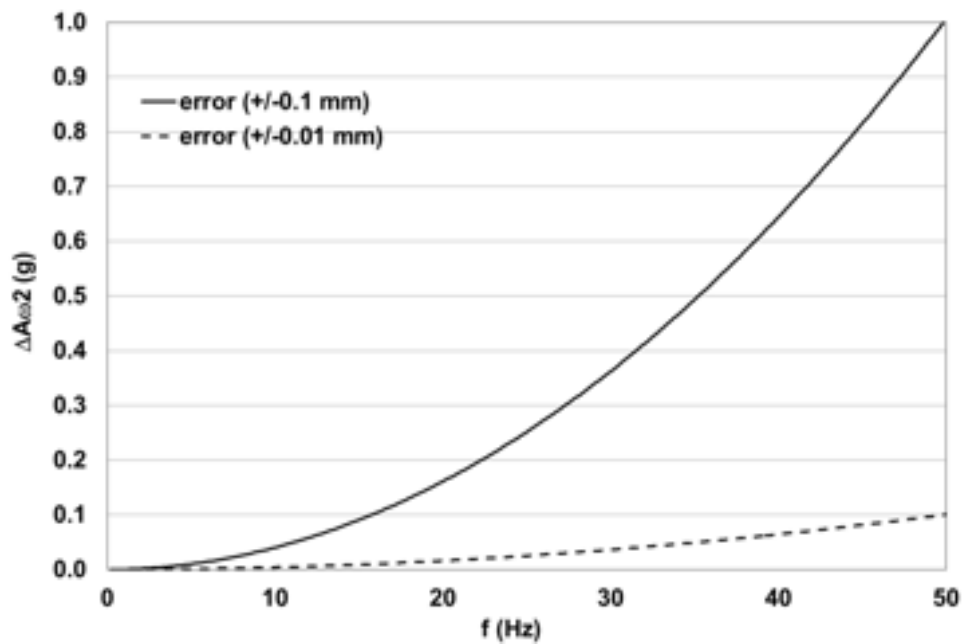


Figura 2.5.5: Ampiezza dell'accelerazione in funzione dell'errore in spostamento.

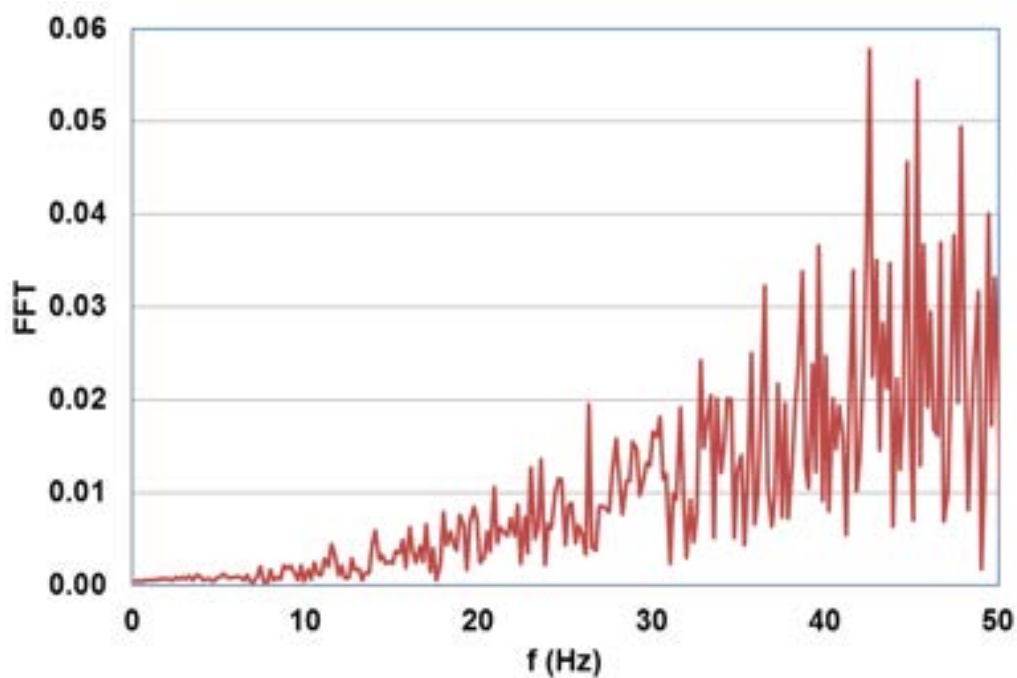


Figura 2.5.6: FFT dell'accelerazione ottenuto dalla doppia derivazione numerica del rumore del segnale di un marker statico.

Al fine di attenuare l'effetto di amplificazione del rumore si possono applicare opportuni algoritmi di filtraggio dei dati e di derivazione numerica. Uno degli approcci più comunemente utilizzato, consiste nell'analizzare le caratteristiche del rumore e del segnale nel dominio della frequenza. Se le bande di frequenza in cui ricadono sono nettamente diverse, si può, generalmente, procedere con successo con un filtro del tipo passa-banda (o le varianti passa-alto, passa-basso, stop-band). Tra i vari algoritmi di tipo passa-banda disponibili nella vasta letteratura, che si distinguono per lo più per la forma delle curve di

taglio (detti fianchi), nell'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti sui pannelli in esame è stato considerato il filtro Savitzky-Golay [4], tra i più utilizzati ed efficaci per l'attenuazione di rumore random da segnali digitali. I parametri che regolano questo filtro sono due: l'ordine del polinomio di fitting ai minimi quadrati e l'ampiezza della finestra. L'ordine assume valori pari. La finestra può essere simmetrica o asimmetrica, a seconda che si prenda un numero di punti differente a sinistra (nl) o a destra (nr) intorno al punto da stimare. L'ampiezza della finestra mobile influisce anche sull'effetto del filtro nel dominio della frequenza determinando ripide depressioni localizzate con periodicità stabilita. Conseguentemente, questo filtro ha un effetto simile a un passa-basso solo fino alla prima depressione, che avviene a frequenza crescente con l'ordine del filtro, ma poi assumere un comportamento selettivo periodico che non annulla del tutto i contributi delle alte frequenze, ma agisce più efficacemente in termini di attenuazione del rumore bianco.

Il filtro Savitzky-Golay, tra l'altro, è intrinsecamente adatto ad essere implementato esplicitamente per la derivazione numerica dei dati, il che lo rende di particolare interesse per la presente applicazione.

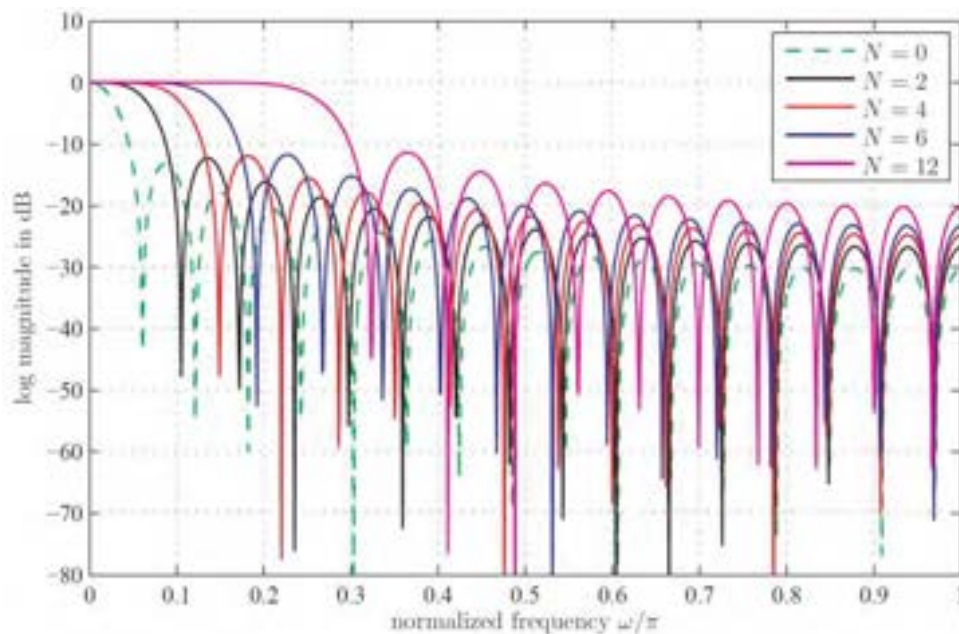


Figura 2.5.7: Effetto nel dominio della frequenza del filtro Savitzky-Golay per diversi valori dell'ordine N con finestra simmetrica di 33 punti [6].

2.6 Prove ultrasonore

Presso il laboratorio di Qualificazione Materiali e Componenti dell'ENEA sono sviluppati dei sistemi automatici d'ispezione per migliorare le attività diagnostiche sui nuovi materiali e componenti impiegati sia nel campo industriale che civile, rappresentano un valido supporto alle attività di controllo non distruttivo, in quanto forniscono una rappresentazione visiva dei risultati ottenuti, sotto forma di una serie di immagini facilmente leggibili e confrontabili con l'oggetto esaminato.

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 2.6.1) ed è sufficiente muovere la sonda lungo 2 assi cartesiani per ottenere la scansione della superficie (XY) .



Schema 2.6.1: Scansione XY

Utilizzando la potenzialità del computer è possibile salvare per ogni punto XY l'intero segnale ultrasonoro. Il segnale digitalizzato 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.

Nella modalità ultrasonora definita trasmissione (True-Trasmissione=TT) 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.

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)

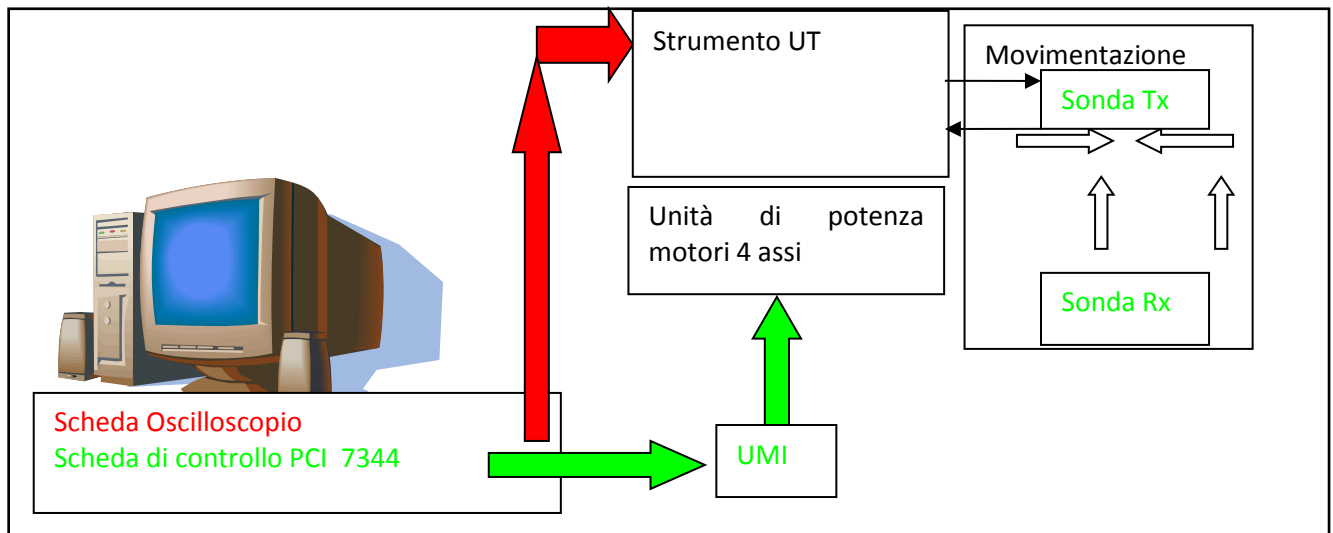
Il programma esegue una scansione sul pezzo in esame ed acquisisce il segnale in Radiofrequenza a circa 100 Megasample al sec. Il segnale opportunamente elaborato all'interno di una finestra temporale (Gate) e soltanto il valore in ampiezza maggiore viene memorizzato. L'insieme dei valori per ogni posizione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

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.

2.6.1 Descrizione hardware e software

Il sistema di controllo basato su sistema operativo Windows XP è stato 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 2 e visibile in Figura 10:

- Scheda controllo assi
- Oscilloscopio collegato tramite ethernet



Schema 2.6.2: Collegamenti del sistema



Figura. 2.6.1: Sistema automatico con sonde non a contatto

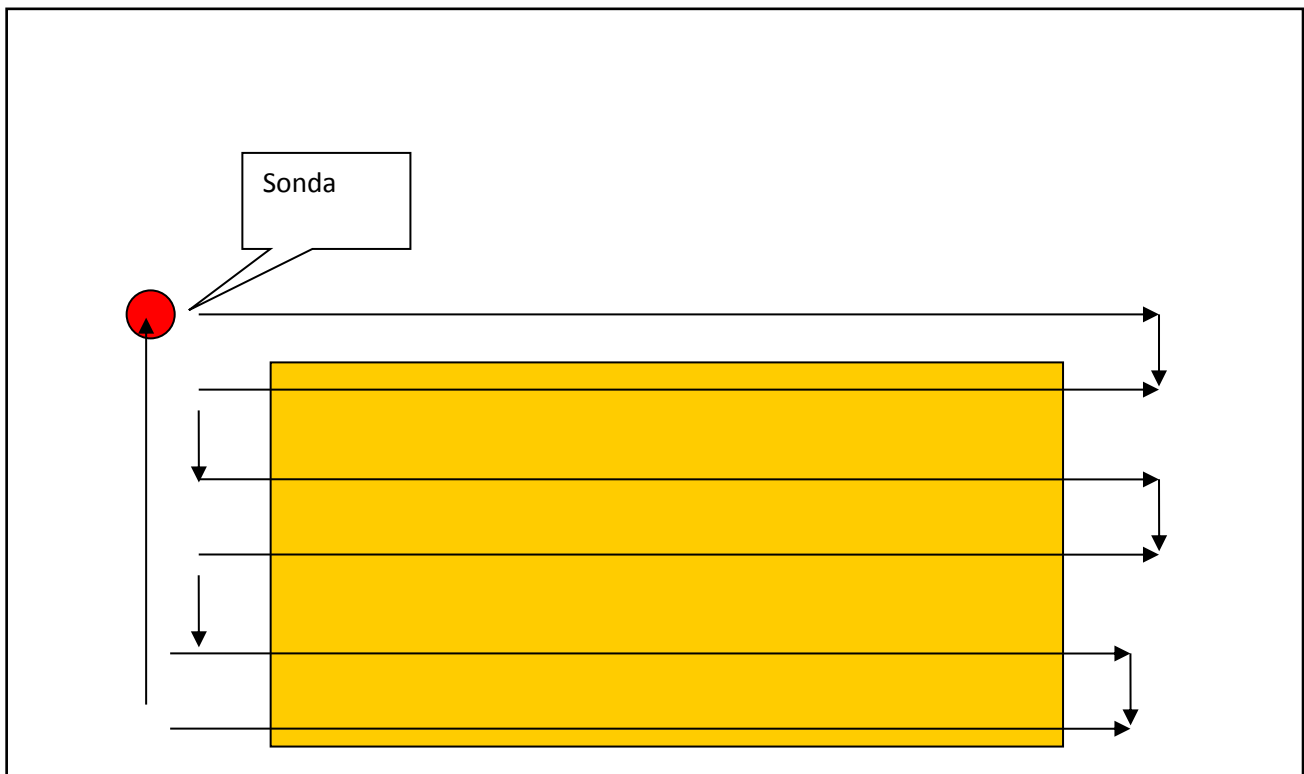
Il software di gestione svolge le attività di acquisizione dei segnali correlandola con la posizione degli assi motorizzati nelle seguenti modalità:

- 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 2.6.3, Figura 2.6.2) :

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 2.6.3: Scansione sul campione



Figura 2.6.2: 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.

2.7 Set up di prova e risultati sperimentali

Come evidenziato nel sottoparagrafo 2.1, i test su tavola sono stati eseguiti su entrambi i pannelli 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. I risultati sono propedeutici per la verifica dell'effetto delle vibrazioni sul compattamento di altri materiali a cambiamento di fase di varia composizione (es. Sali fusi) nella configurazione di posizionamento sul tetto e/o sulle pareti laterali della cella frigorifera.

La sperimentazione condotta sui campioni può considerarsi suddivisa nelle seguenti fasi:

- Prove ultrasoniche
- Test su tavola vibrante Prove ultrasoniche
- Elaborazione dei dati sperimentali
- Conclusioni

2.7.1 Risultati sperimentali in termini di spostamento misurati mediante il sistema 3DVISION

Le prove sono state realizzate mediante il sistema hardware LMS SCADAS III a 16 canali che include un convertitore A/D a 24 bit, controllato dal software LMS Test Lab.

I dati sperimentali sono stati acquisiti mediante accelerometri tradizionali triassiali PCB (modello 356A15) e tramite il sistema denominato 3DVision, di tipo Motion Capture 3D, installato in laboratorio. E' un sistema opto-elettronico, basato su tecnologia VICON MX, in grado di registrare il moto di marcatori in uno spazio tridimensionale tramite la triangolazione dei dati acquisizioni da una "costellazione" di telecamere. Il funzionamento è assimilabile a un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere MX, una volta fissate alle pareti o montati su appositi tripodi, illuminano il proprio campo di vista per mezzo di una serie di led che emettono con lunghezze d'onda predominanti nel vicino infrarosso (NIR) ed acquisiscono la radiazione retro-riflessa dai marcatori posizionati nei punti di cui si vuole stabilire il moto. Il dato grezzo che fornisce il sistema è costituito dalla traiettoria nello spazio di tali punti in un sistema di riferimento prefissato tramite la procedura di calibrazione del sistema. Trattandosi di un sistema di visione 3D, la risoluzione geometrica raggiungibile dipende, come è noto, dalla configurazione spaziale adottata (in particolare, dalla posizione delle telecamere rispetto ai marcatori) e dalla qualità della calibrazione dinamica, che consiste in una procedura di acquisizione effettuata con uno strumento apposito che viene adeguatamente movimentato all'interno del volume di misura.

Il sistema è dotato di 9 telecamere digitali MX nell'infrarosso per le acquisizioni 3D e 4 videocamere DV per i filmati sovrapponibili in sincrono con i marker.

L'utilizzo di questo sistema, consentendo l'acquisizione diretta delle traiettorie dei marcatori posti sui pannelli durante le prove dinamiche, ha lo scopo di evidenziare mediante la misura degli spostamenti tra i marcatori stessi, rilevati ad esempio lungo lo spessore del pannello, eventuali criticità dovute a scollamenti e/o rigonfiamenti causate da possibili disomogeneità strutturali provocate dal processo di invecchiamento simulato.

Per le campagne sperimentali su tavola vibrante è stato utilizzato lo stesso file di input applicato nella precedente campagna sperimentale, indicato dalla norma MIL-STD-810D per il trasporto delle Military Handbook applicato in direzione longitudinale (Figura 2.7.1). Nelle Figure 2.7.2 e 2.7.3 è visibile il set-up delle prove dinamiche, allestito fissando il pannello con PCM accanto ad un pannello "tal quale" preso come riferimento. I due pannelli sono disposti in posizione verticale e assicurati alla tavola vibrante in modo che il moto di vibrazione fornito in input alla tavola sia trasmesso in maniera quanto più possibile inalterato ai pannelli.

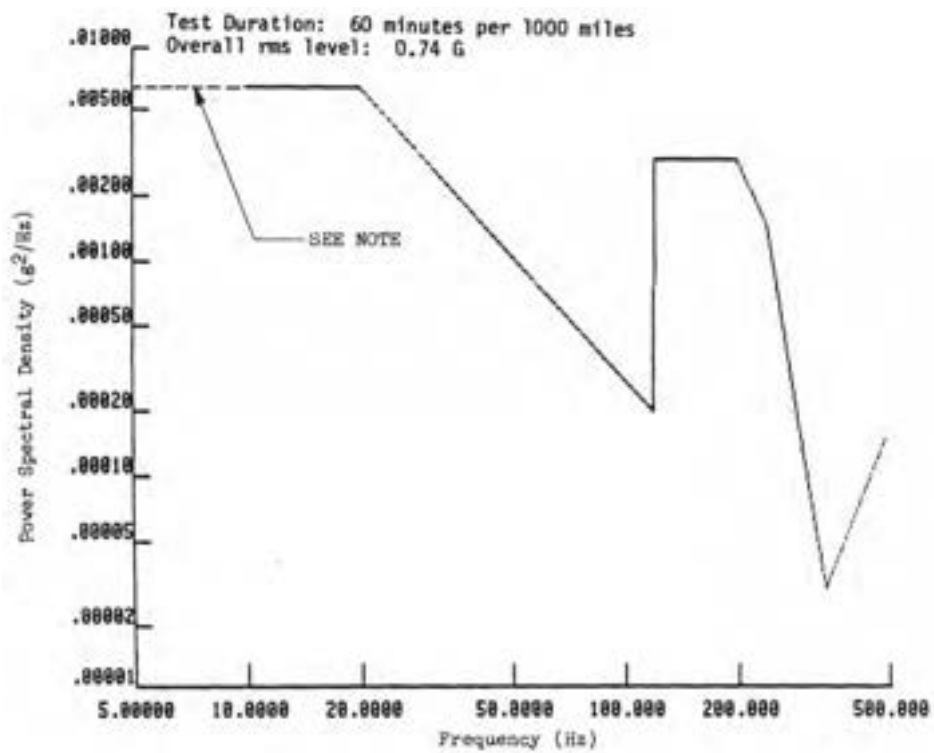


Figura 2.7.1: Input (Mil-STD-810D)

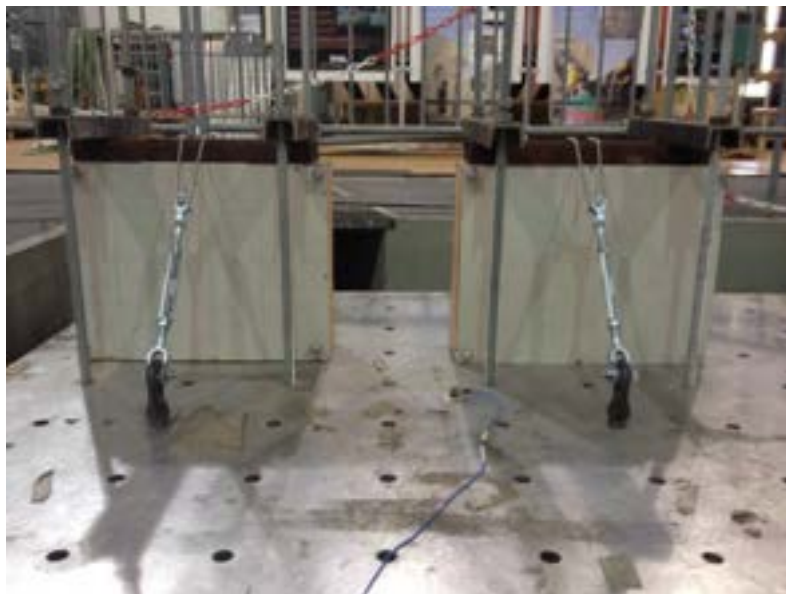


Figura 2.7.2: Set-up delle prove dinamiche. Vista frontale.



Figura 2.7.3: Set-up delle prove dinamiche. Vista laterale.

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 2.7.4, 2.7.5 e 2.7.6 le curve relative ai test suddetti, graficando la densità spettrale [g^2/Hz] in funzione delle frequenze [Hz].

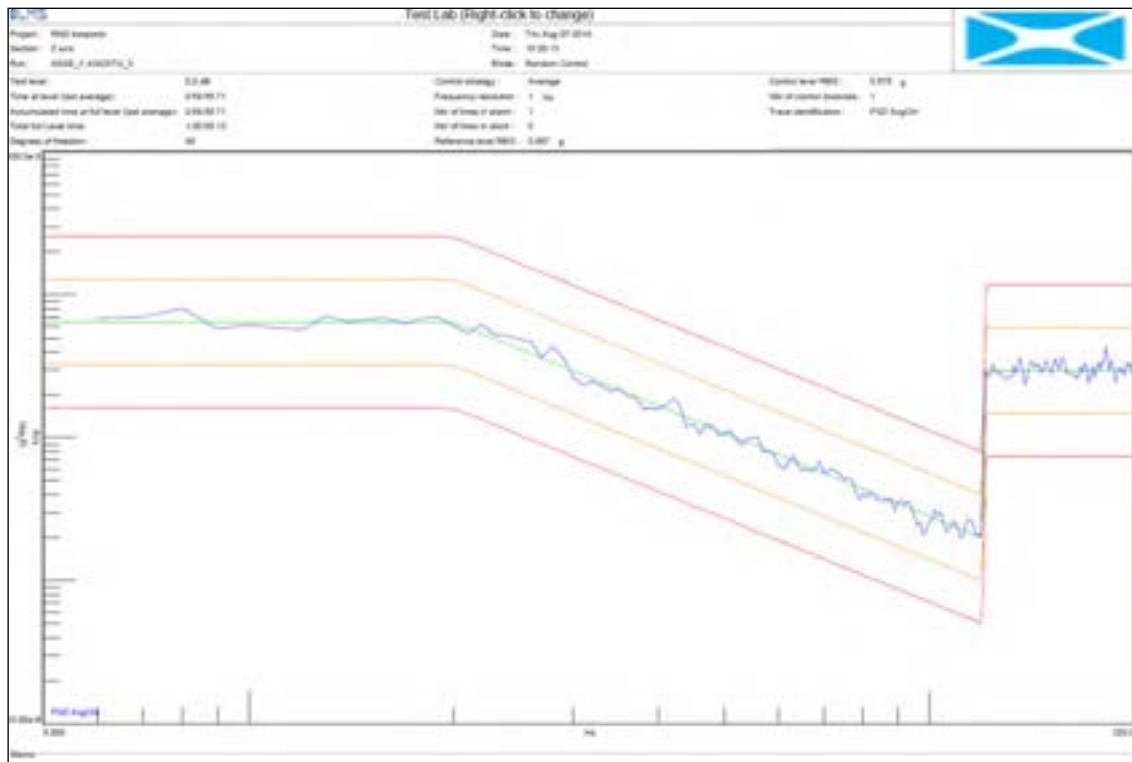


Figura 2.7.4: Componente X

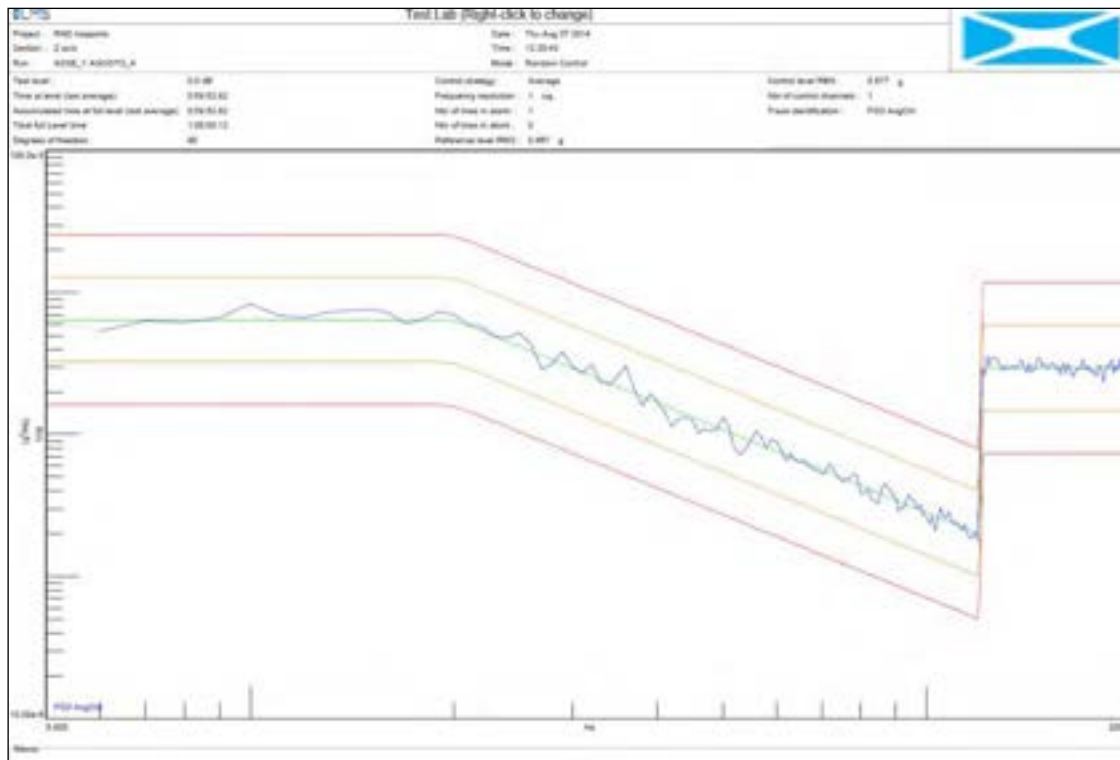


Figura 2.7.5: Componente Y

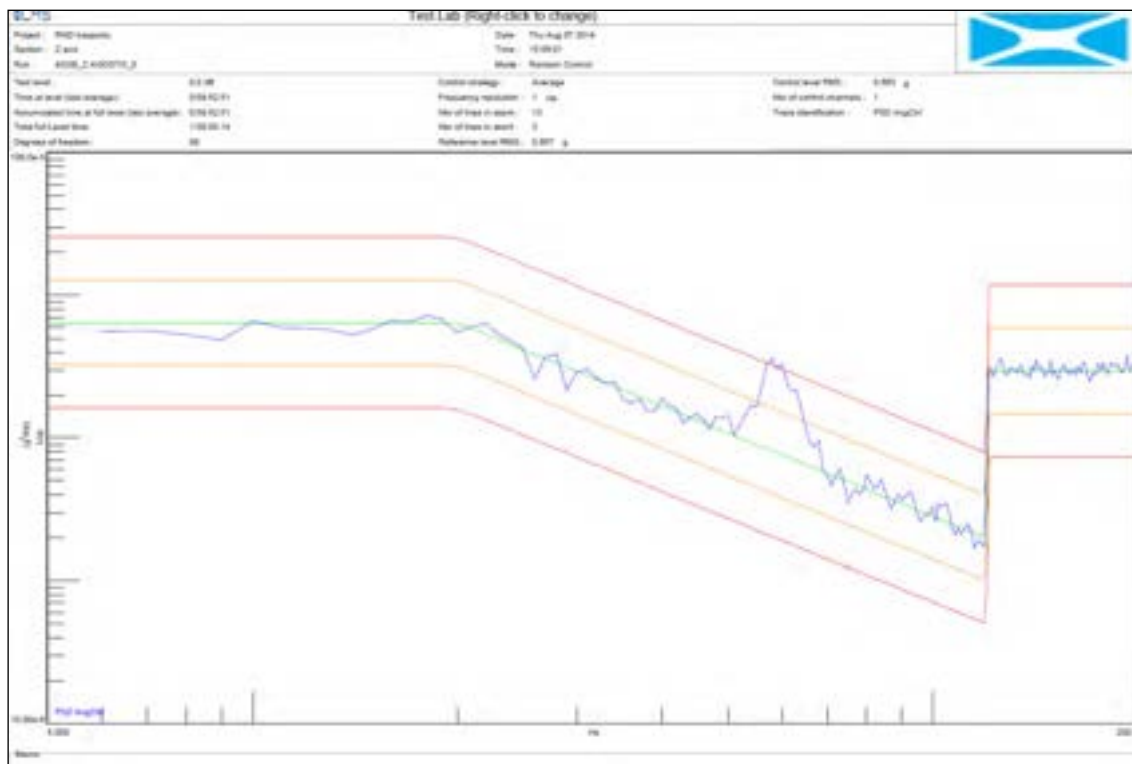


Figura 2.7.6: Componente Z

In Figura 2.7.7 si mostra la nomenclatura utilizzata per i marker. In rosso è riportato il pannello con PCM, mentre in giallo il pannello di riferimento. I marker sono stati collocati su entrambe le facce dei pannelli così da poter monitorare l'eventuale scollamento tra di essi misurando l'andamento della distanza tra le due facce.

Nelle Figure 2.7.8, 2.7.9 e 2.7.10. si possono vedere gli input registrati sulla tavola nei test monoassiali nelle direzioni x, y e z rispettivamente. La frequenza di campionamento dei dati è di 200 Hz.

I risultati in termini di spessore dei pannelli misurato all'inizio e alla fine di ogni prova monoassiale secondo ogni asse sono mostrati in tabella 2.7.1. Dalla suddetta tabella si riscontra che la misura dello spessore si muove all'interno del margine di errore della misura stessa (0.1 mm), da cui si evince che le prove eseguite non denotano deformazioni e/o scollamenti tra le facce dei pannelli che siano rilevabili a questi livelli di precisione.

A titolo di esempio si riporta in Figura 2.7.11 l'andamento dello spessore dei pannelli durante il test condotto in direzione y, ovvero in direzione trasversale ortogonalmente alle facce dei pannelli.

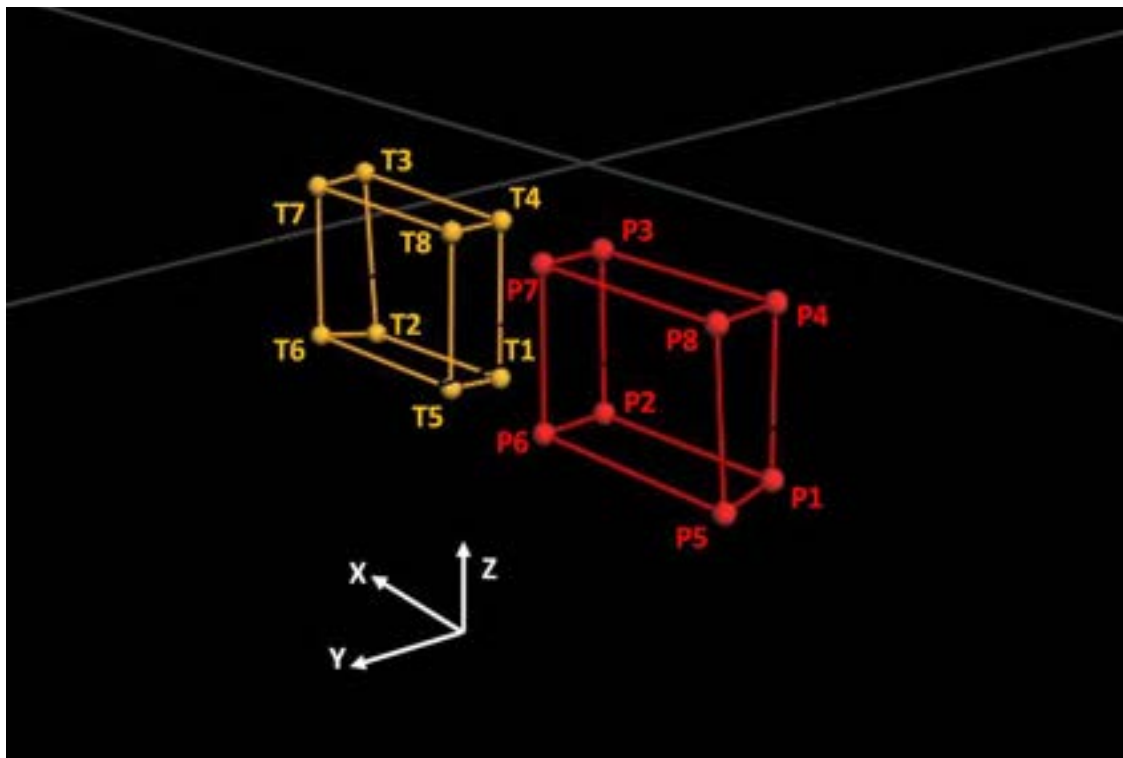


Figura 2.7.7: Nomenclatura dei marker posizionati sui due pannelli con PCM (in rosso) e tal quale (in giallo).

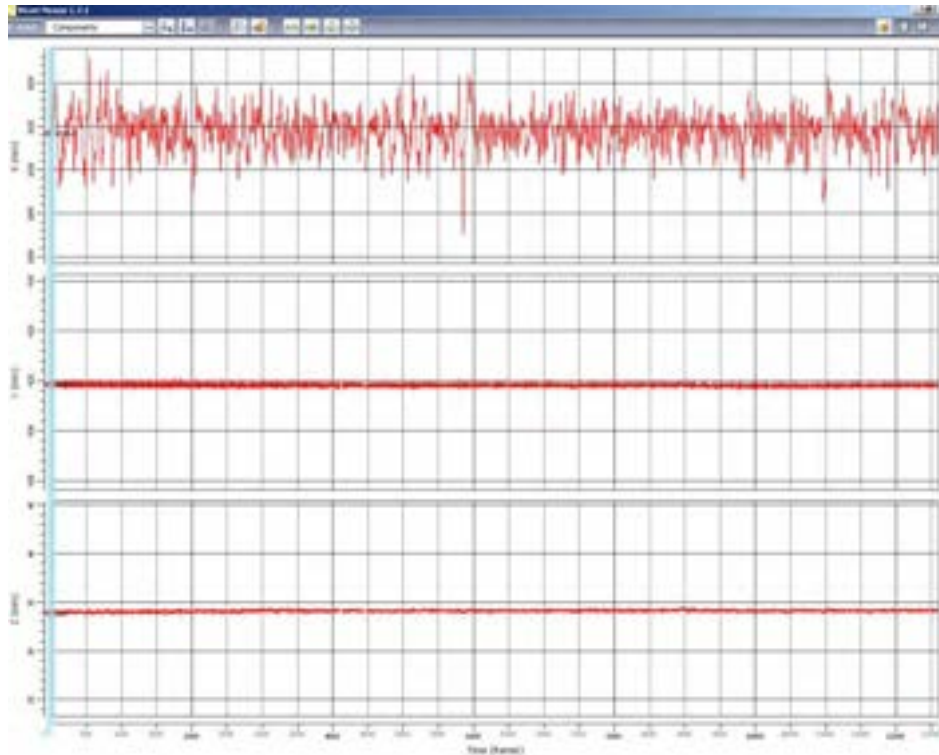


Figura 2.7.8: Input registrato sulla tavola nel test monoassiale in direzione x.

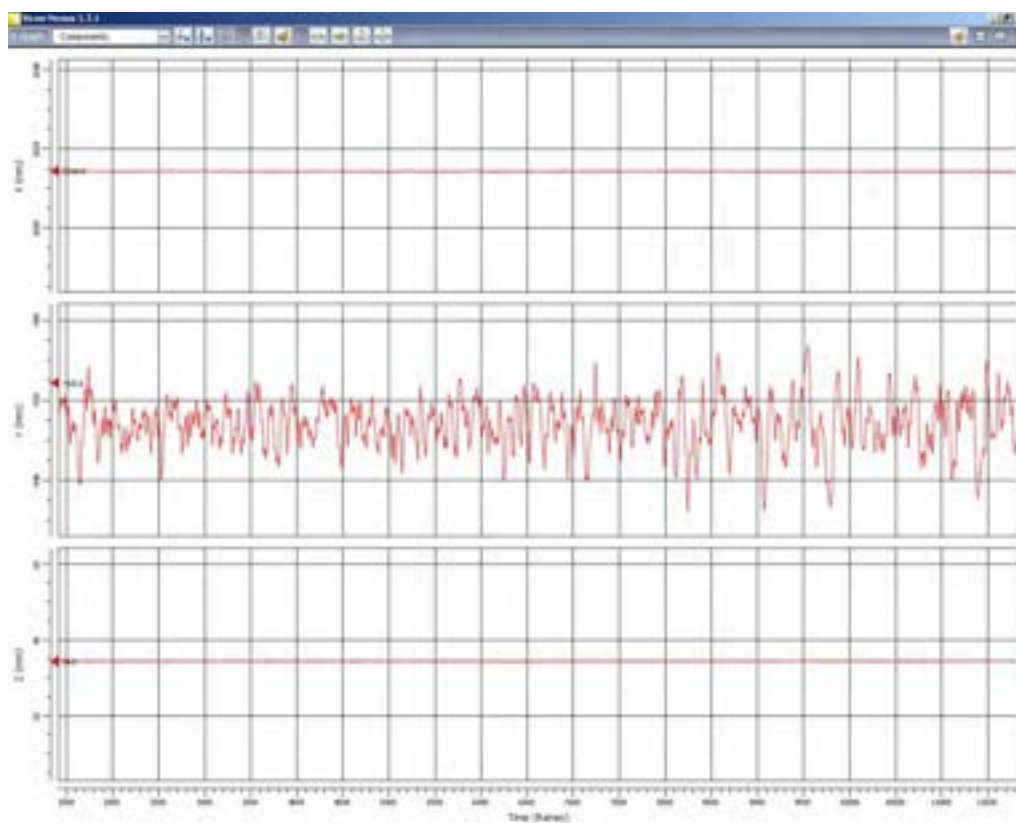


Figura 2.7.9: Input registrato sulla tavola nel test monoassiale in direzione y.

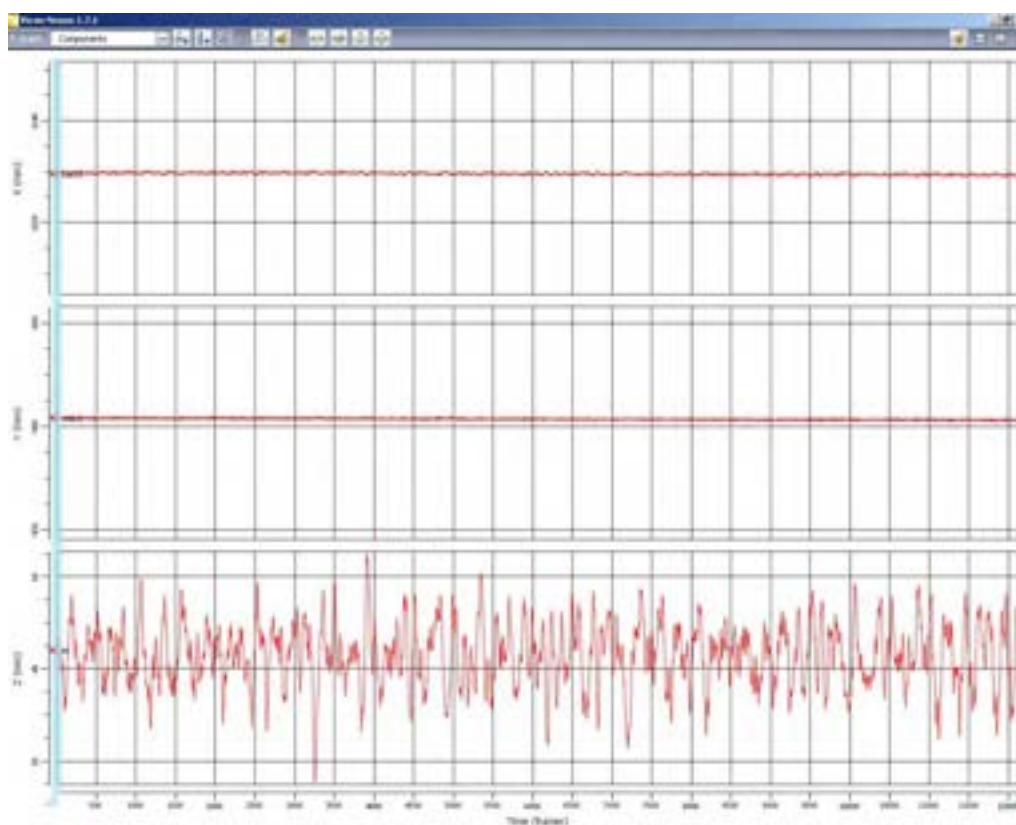


Figura 2.7.10: Input registrato sulla tavola nel test monoassiale in direzione z.

Tabella 2.7.1: Spessore dei pannelli misurato all'inizio e alla fine di ogni prova.

Test	Spessore [mm]	
	Pannello con PCM	Pannello "tal quale"
X (inizio test)	143.2	107.3
X (fine test)	143.3	107.2
Y (inizio test)	143.3	107.3
Y (fine test)	143.3	107.2
Z (inizio test)	143.2	107.2
Z (fine test)	143.3	107.2

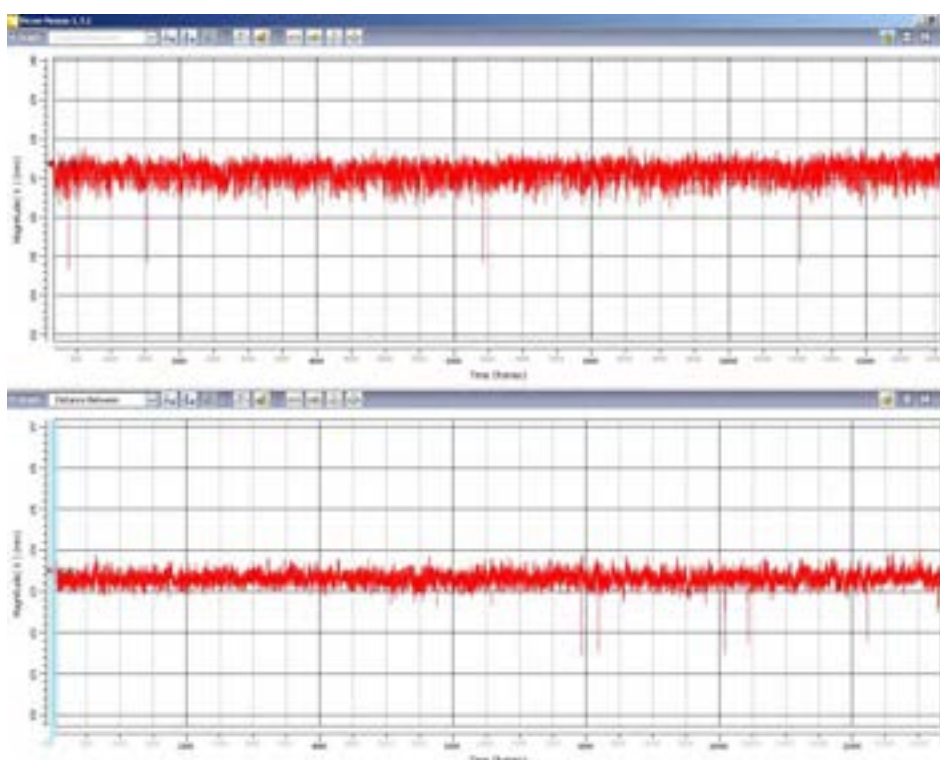


Figura 2.7.11: Distanza tra le due facce del pannello con PCM (in basso) e senza (in alto) nel test monoassiale in direzione y.

2.7.2 Misure soniche esame su pannello UPM con scanner motorizzato

Il pannello è risultato molto attenuante agli ultrasuoni ed ha richiesto una notevole energia di impulso sulla sonda trasmittente. Il pannello tal quale è confrontato con un altro pannello che ingloba capsule sigillate 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 2.7.12 è visibile il pannello PCM 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.

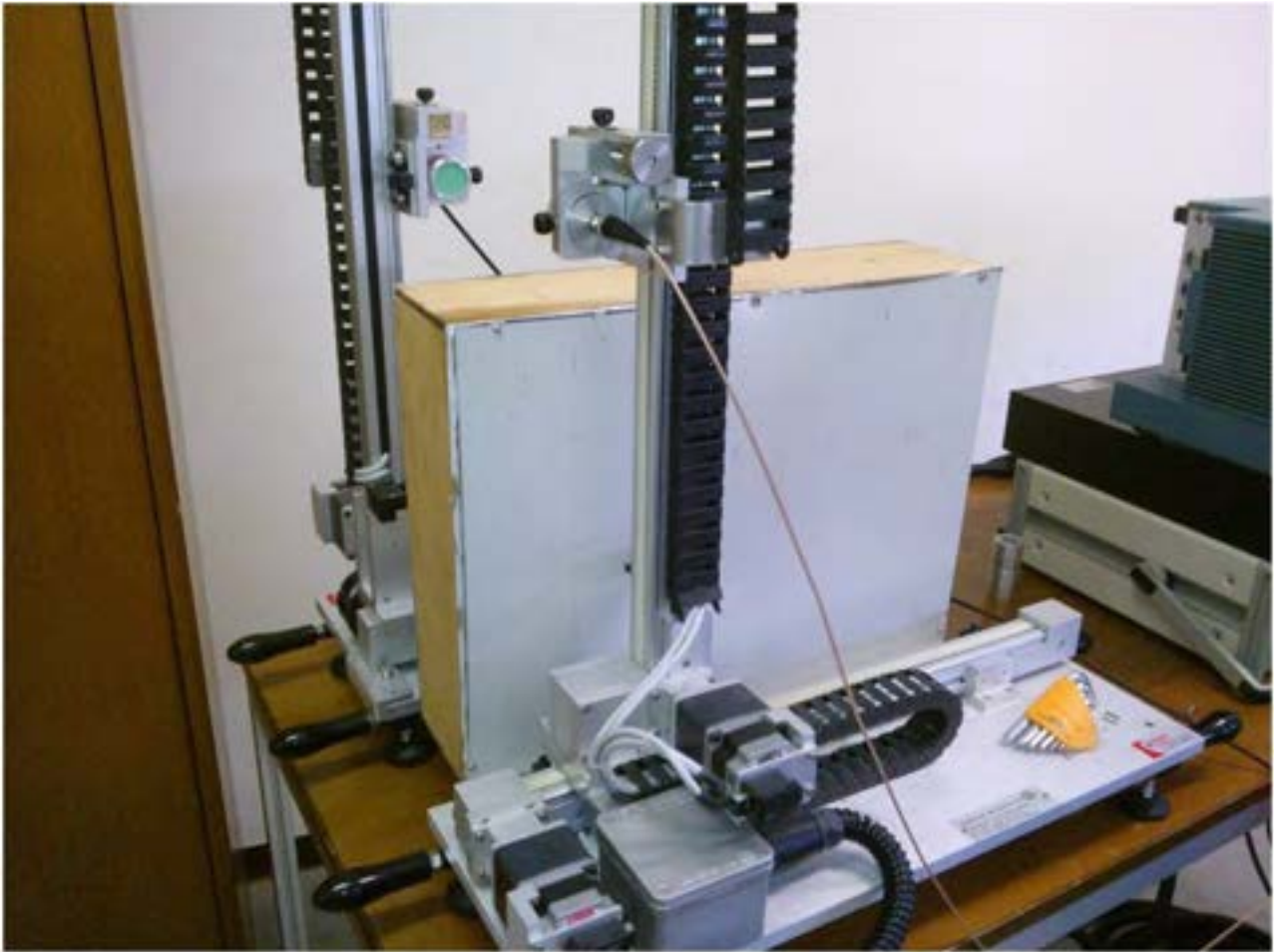


Figura 2.7.12: Pannello PCM durante l'ispezione con sonde non a contatto

Le sonde sono pilotate dallo strumento UT (Figura. 2.7.13) 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.2.7.14).

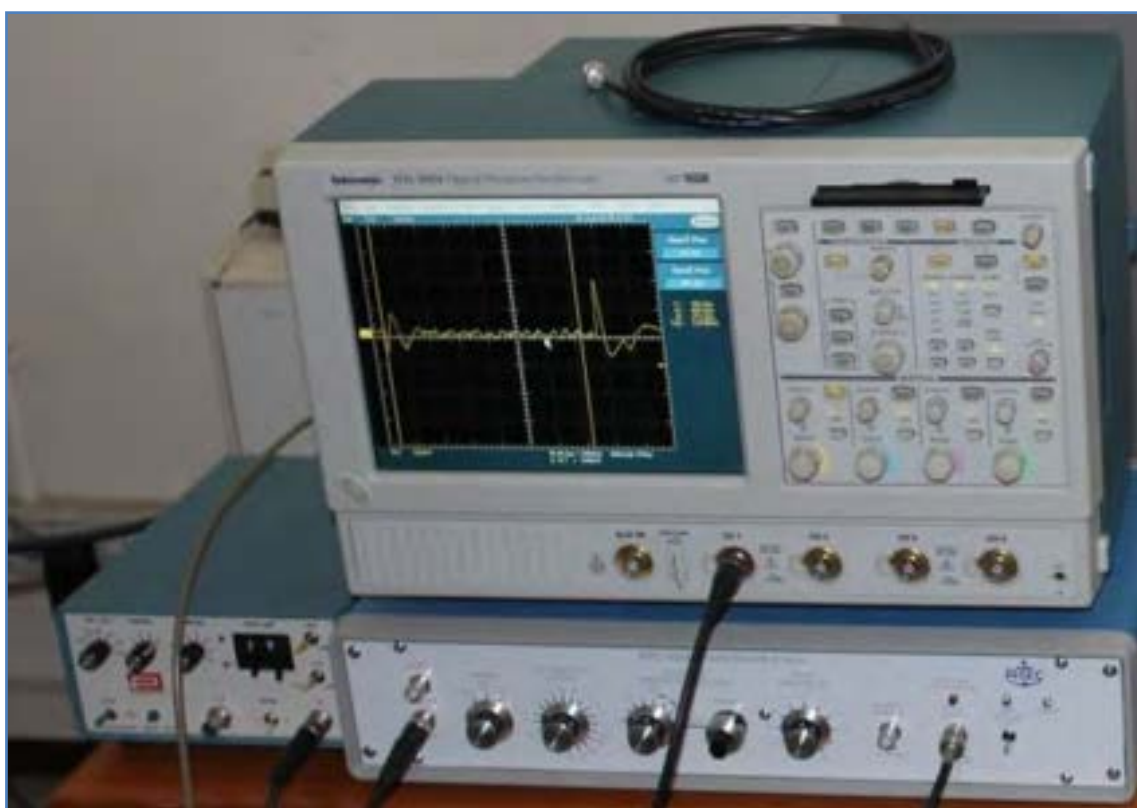


Figura 2.7.13: Sistema di movimentazione e strumento Ultrasonoro

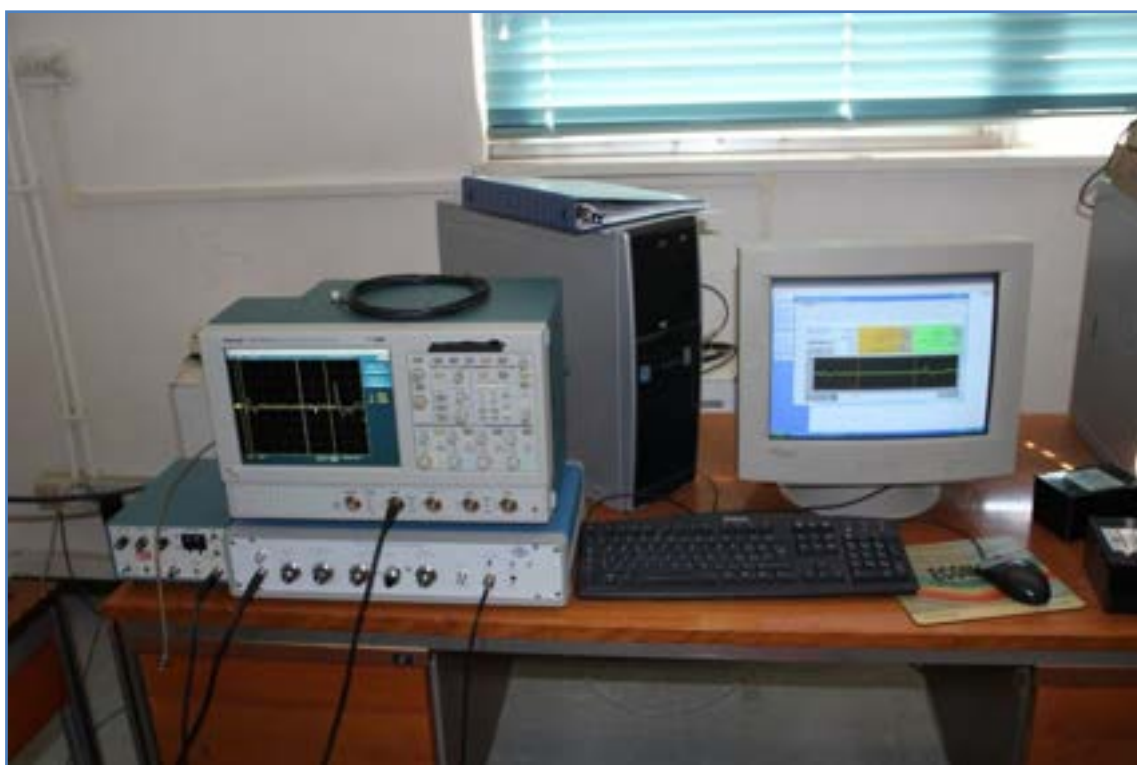


Figura 2.7.14: Sistema di acquisizione dati RF

I parametri di scansione del pannello sono riportati nella tabella 2.7.2

Tabella 2.7.2: Caratteristiche dello Scanner

Scanner	4 assi
Corsa X	400 mm
Index Z	500 mm
Risoluzione	10 mm
Motori	Stepper
Oscilloscopio	Tektronics 5034
Computer	HP 4100

Nelle Figure 2.7.14 è visibile il software ENEA che acquisisce il segnale RF (verde) e visualizza la mappa ultrasonora. Il colore rappresenta l'ampiezza massima del segnale RF all'interno dei cursori gialli verticali. Il colore viola indica forte attenuazione (ampiezza bassa) e il colore rosso 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.

Nelle figure successive (2.7.15, 2.7.16, 2.7.17, 2.7.18) sono riportate le mappe di entrambi i pannelli prima e dopo le prove dinamiche a lato di ogni mappa anche l'istogramma di distribuzione delle velocità divise in 27 classi.

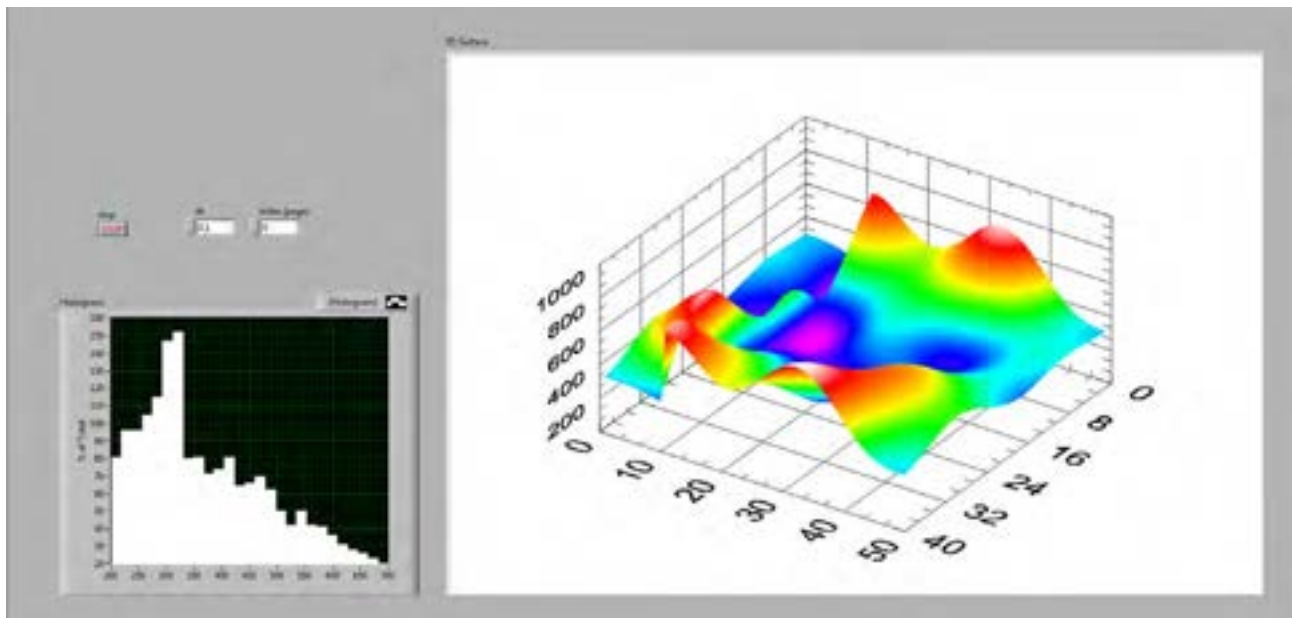


Figura 2.7.15: Mappa ultrasonora pannello UPM prima

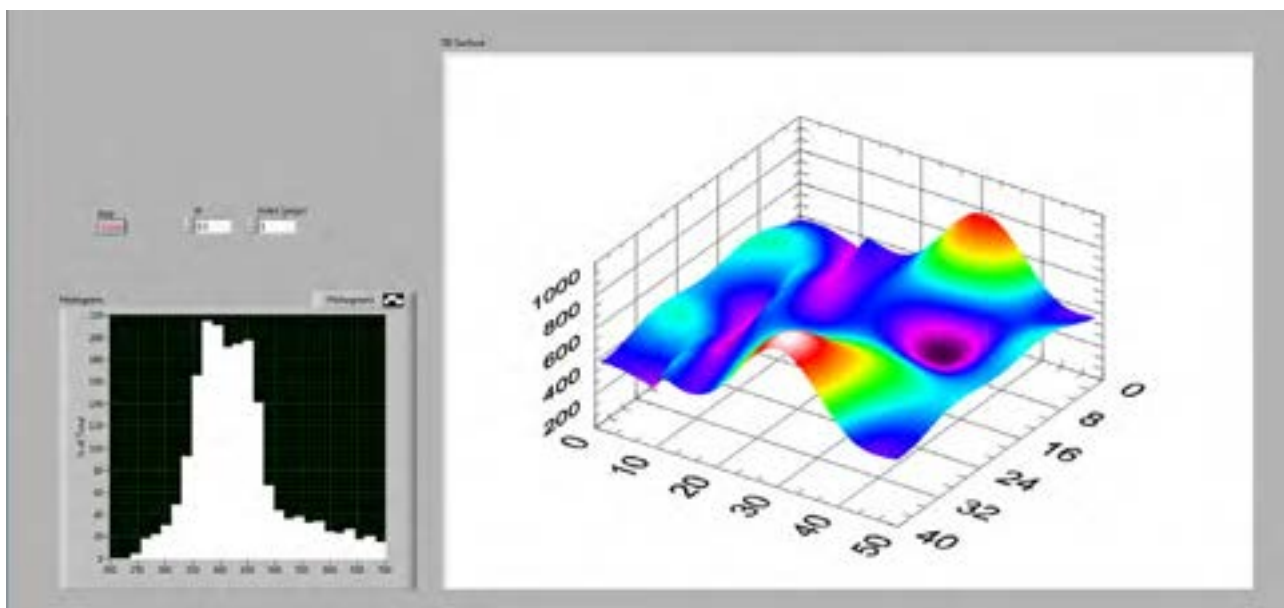


Figura 2.7.16: Mappa ultrasonora pannello UPM con PCM prima

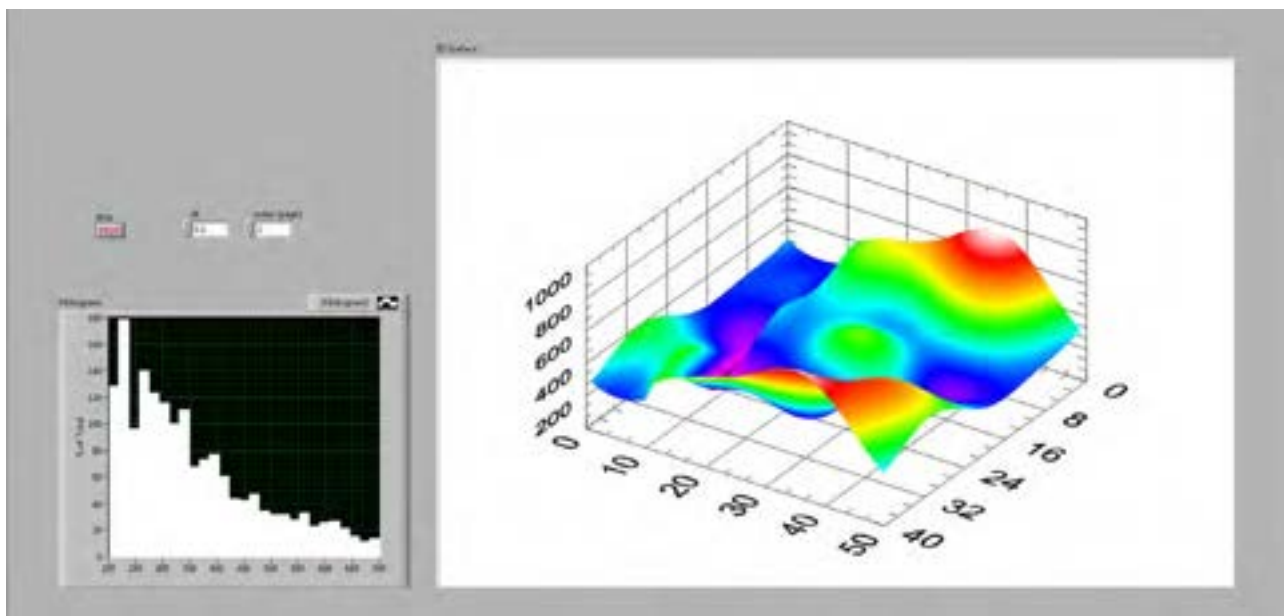


Figura 2.7.17: Mappa ultrasonora pannello UPM dopo

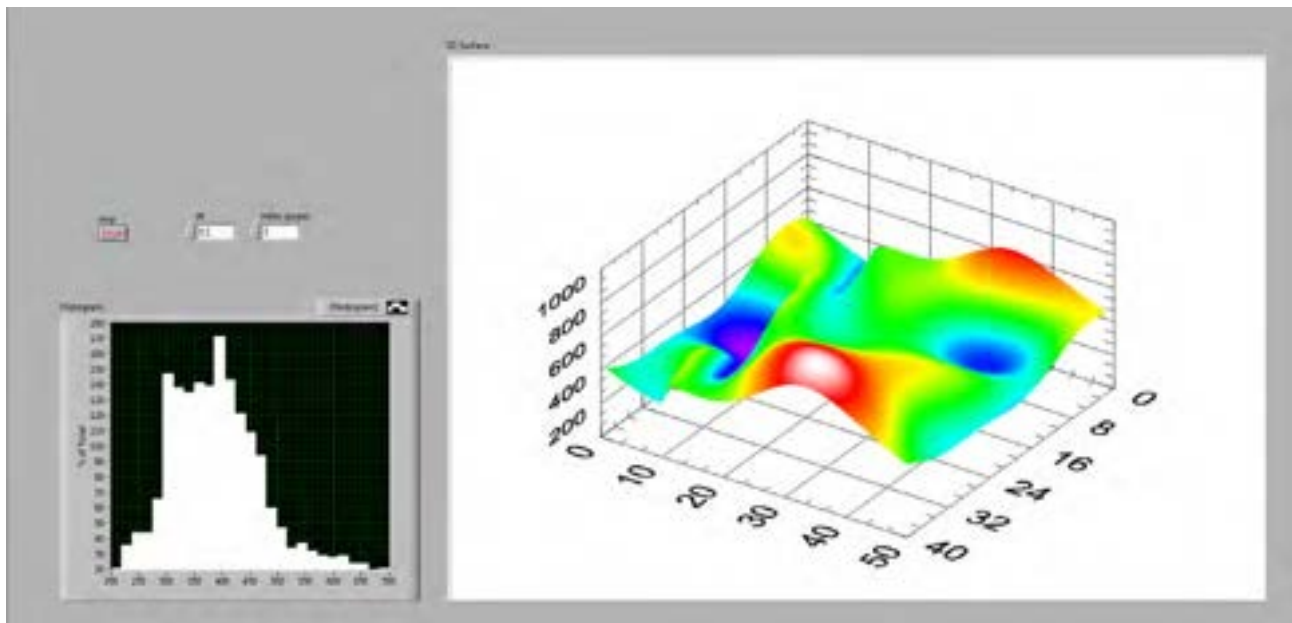


Figura 2.7.18: Mappa ultrasonora pannello UPM con PCM dopo.

2.7.3 Esame su pannelli prima e dopo le prove dinamiche su 20 punti

Le mappe del pannello UPM indicano una discreta omogeneità si è quindi deciso di effettuare le misure successive su 20 punti dividendo il pannello in una griglia di 4 x 5 rettangoli e lato 10 cm come mostrato in fig 2.7.18.



Figura 2.7.18: Punti di Misura.

Su entrambi i pannelli sono state realizzate prove ultrasonore: in Tabella 2.7.3 il setup sperimentale e in Tabella 2.7.4 sono riportate le caratteristiche della relativa strumentazione.

Tabella 2.7.3: Setup Ultrasonoro.

Strumento UT	Sirio 5000
2 Sonde	Frequenza: 50 KHz Diametro: 1"
Tecnica UT	Trasmissione a contatto
Amplificazione	90 dB

Tabella 2.7.4: Caratteristiche dello strumento Ultrasonoro Sirio RP 5000 CSD.



banda passante	bb 20 KHz – 0.5 MHz
amplificazione	100 db a incremento minimo di 0,5 db
tipo di rappresentazione	raddrizzata con visualizzazione della semionda positiva o negativa oppure positiva più negativa oppure rf
integrazione	regolabile continua
soglia	lineare e proporzionale da 0 a 80% dello schermo
finestra monitor	regolabile in posizione e larghezza da 0 a fondo scala massimo
	soglia di intervento monitor fissa
uscite monitor	allarme ottico e acustico
	tempo di transito (μ s)
	energia trasferita (dbv)
trasmettitore	alta energia e bassa impedenza a 2 livelli minimo/massimo
	energia istantanea $\approx$ 2,5 kw su 1000 ohm
ritmo di ripetizione	automatico (20 Hz fissi)
campi di misura	100/200/400/500/1000/2000 μ s fondo scala
tecnica d'esame	riflessione e/o trasparenza
misurazioni	rappresentazione digitale decimale del tempo di transito con precisione

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 20 punti del pannello con e senza il materiale PCM e prima e dopo le sollecitazioni dinamiche. Le mappe in falsi colori rappresentano i 20 punti del pannello e dove i valori di velocità sono indicati come altezza Z della curva e il colore rosso valori massimi di velocità e colore viola/nero valori minimi di velocità. Sono mostrati altresì i segnali ricevuti (Figura 2.7.20 A-scan) dalla sonda e visualizzati sullo strumento sottoforma di un diagramma temporale nella cui ordinata sono riportati valori in tensione ai capi del trasduttore opportunamente digitalizzati. Il segnale mostra una prima zona di valori bassi al di sotto di una soglia impostata. Il segnale ha una serie di picchi corrispondenti all'arrivo dell'onda sulla sonda ricevente. Il primo valore che supera la soglia al tempo T è la misura del tempo di propagazione dell'onda sonora. Questo valore di tempo in sec rapportato allo spessore del pannello in metri dà la velocità del suono nel materiale.

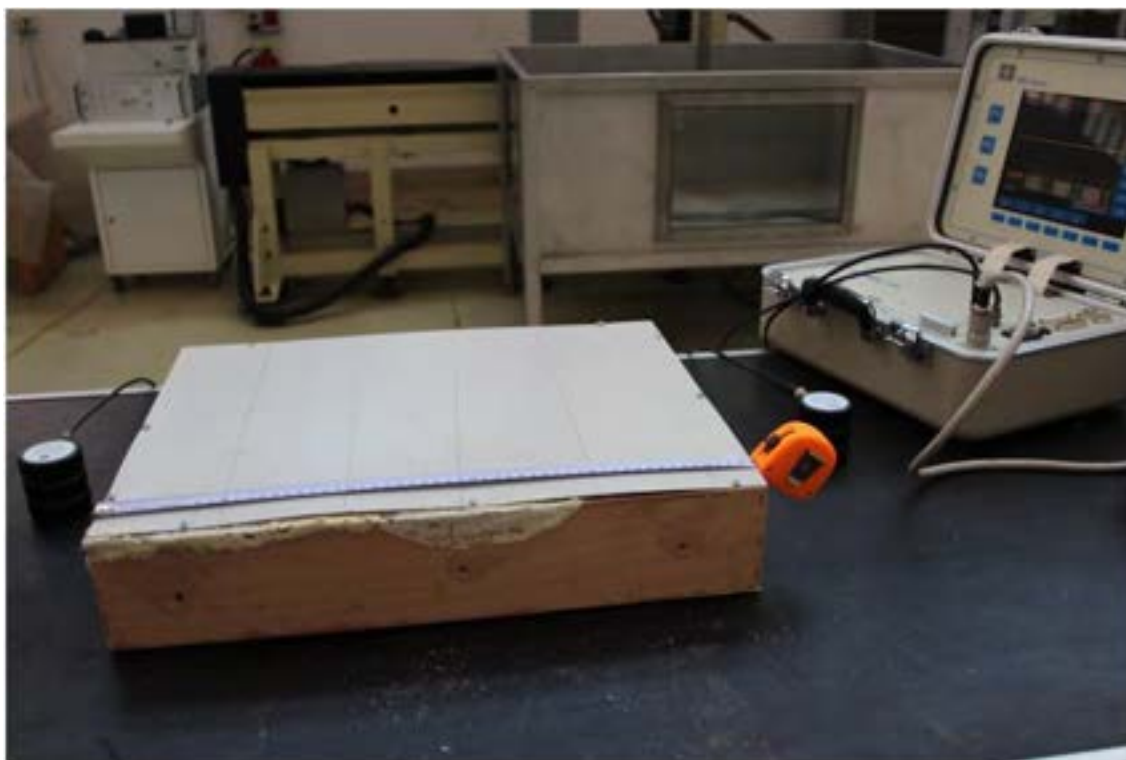


Figura 2.7.19: Pannello senza PCM Dimensioni 54 x 42 x 10 cm



Figura 2.7.20: Segnale A-scan.

Tabella 2.7.5: Tabella valori di velocità di propagazione del suono in m/s pannello senza PCM.

Colonna/Riga	1	2	3	4	5
1	580	424	701	477	711
2	506	301	266	324	329
3	301	306	194	201	276
4	360	269	350	346	322

Media m/s	Dev. Std
377.2	147.2469

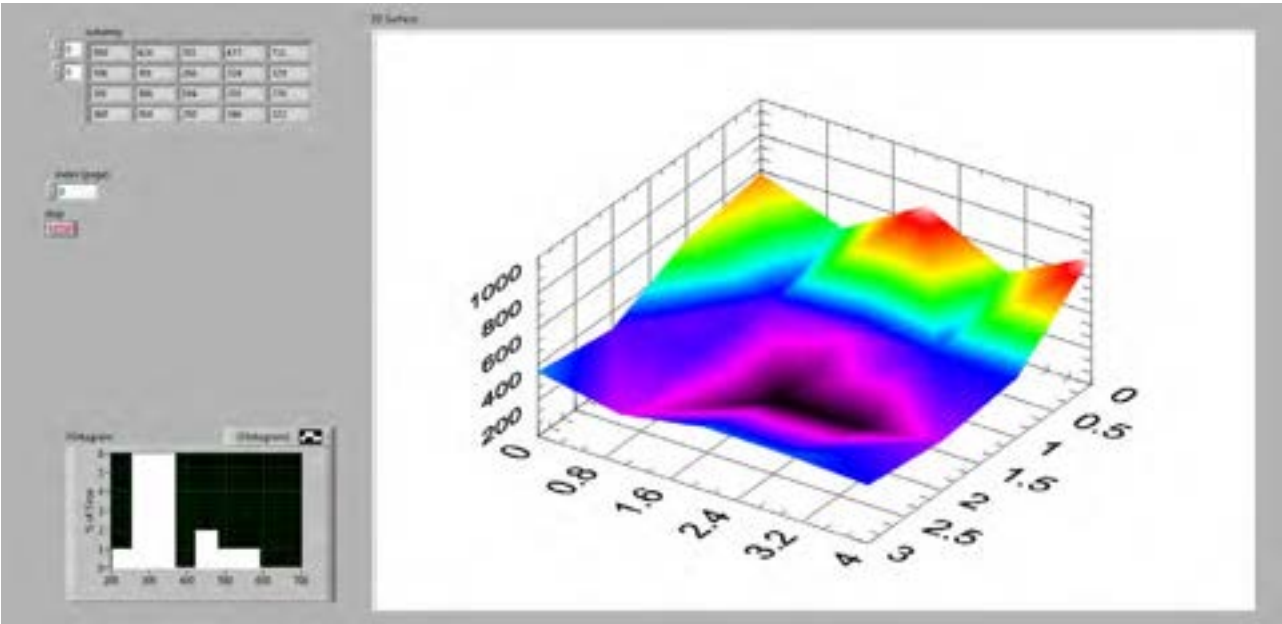


Figure 2.7.21: Mappa ultrasonora del pannello senza PCM prima delle prove

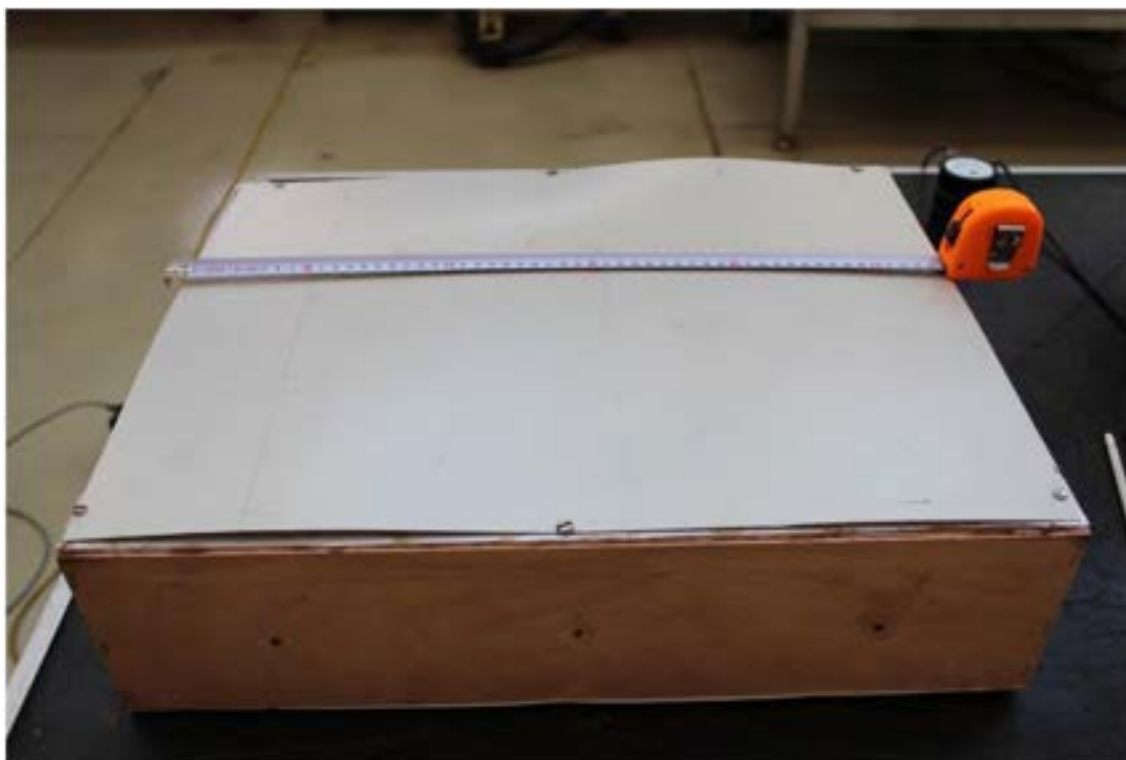


Figure 2.7.22: Pannello con PCM Dimensioni 54 x 42 x 14 cm



Figure 2.7.23: Segnale UT Gain 90

Tabella 26: Tabella valori di velocità di propagazione del suono in m/s pannello con PCM.

Colonna/Riga	1	2	3	4	5
1	544	450	431	433	803
2	473	370	328	392	357
3	369	477	433	391	410
4	354	436	325	508	643

Media	Dev. Std
446.35	113.7783

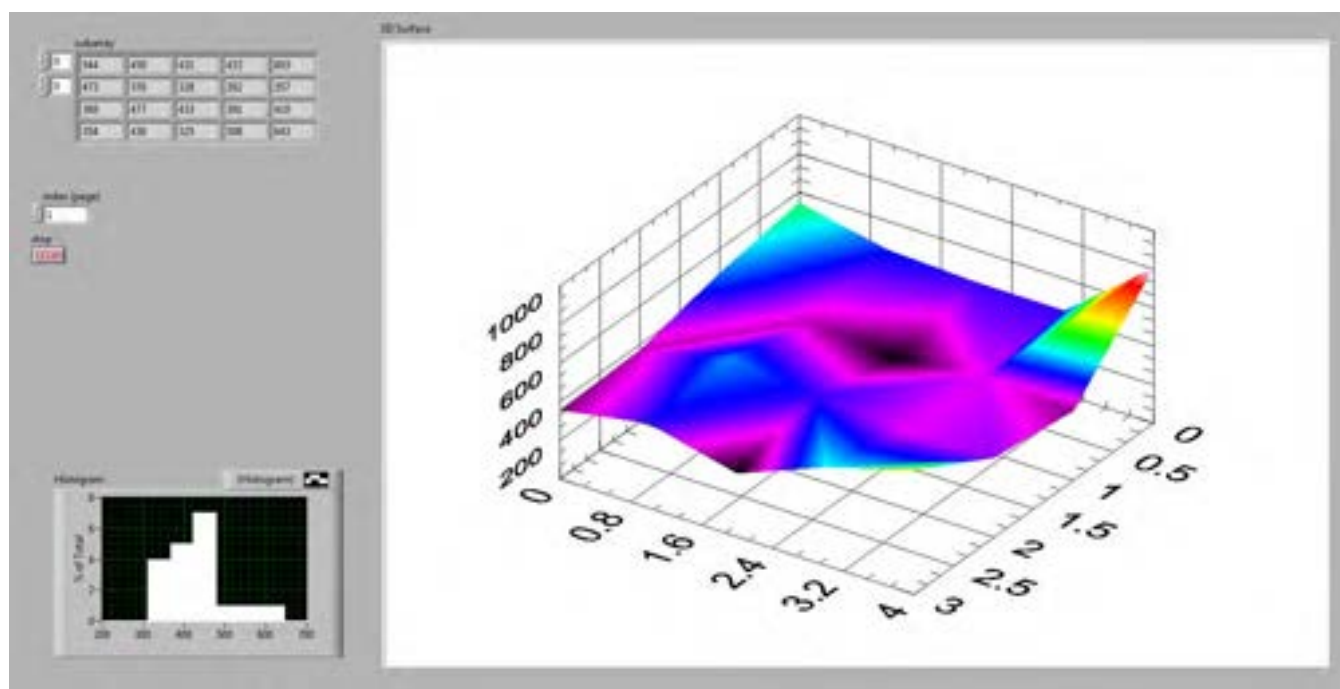


Figure 2.7.24: Mappa ultrasonora del pannello con PCM prima delle prove

Dopo prove su tavola



Figura 2.7.25: Pannello senza PCM Dimensioni 54 x 42 x 10 cm

Tabella 2.7.7: Tabella valori di velocità di propagazione del suono in m/s pannello senza PCM dopo prove dinamiche.

Colonna/Riga	1	2	3	4	5
1	520	427	370	504	681
2	664	290	254	299	293
3	350	234	230	290	404
4	204	242	135	193	157

Media	Dev. Std
337.05	155.2399

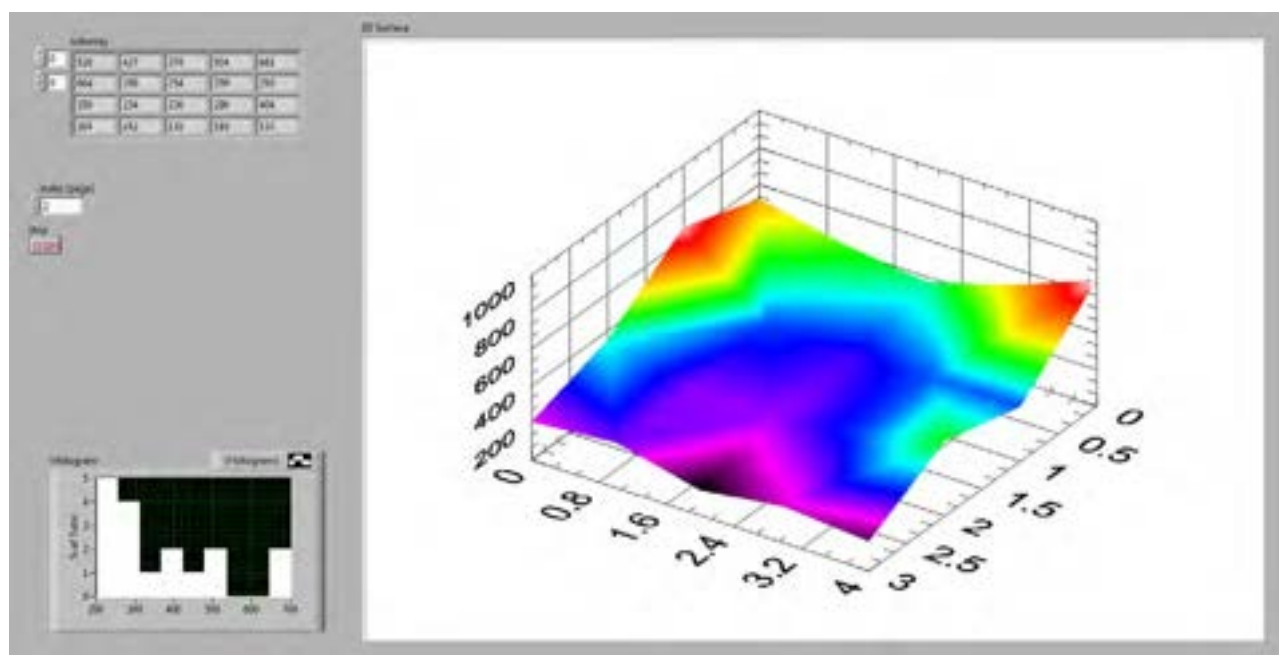


Figura 2.7.26: Mappa ultrasonora del pannello senza PCM



Figura 2.7.27: Pannello con PCM Dimensioni 54 x 42 x 14 cm

Tabella 2.7.8: Valori di velocità di propagazione del suono in m/s del pannello con PCM dopo prove dinamiche.

Colonna/Riga	1	2	3	4	5
1	464	295	393	414	631
2	589	403	287	399	327
3	233	413	427	347	409
4	418	254	183	512	612

Media	Dev. Std
400.5	121.4918

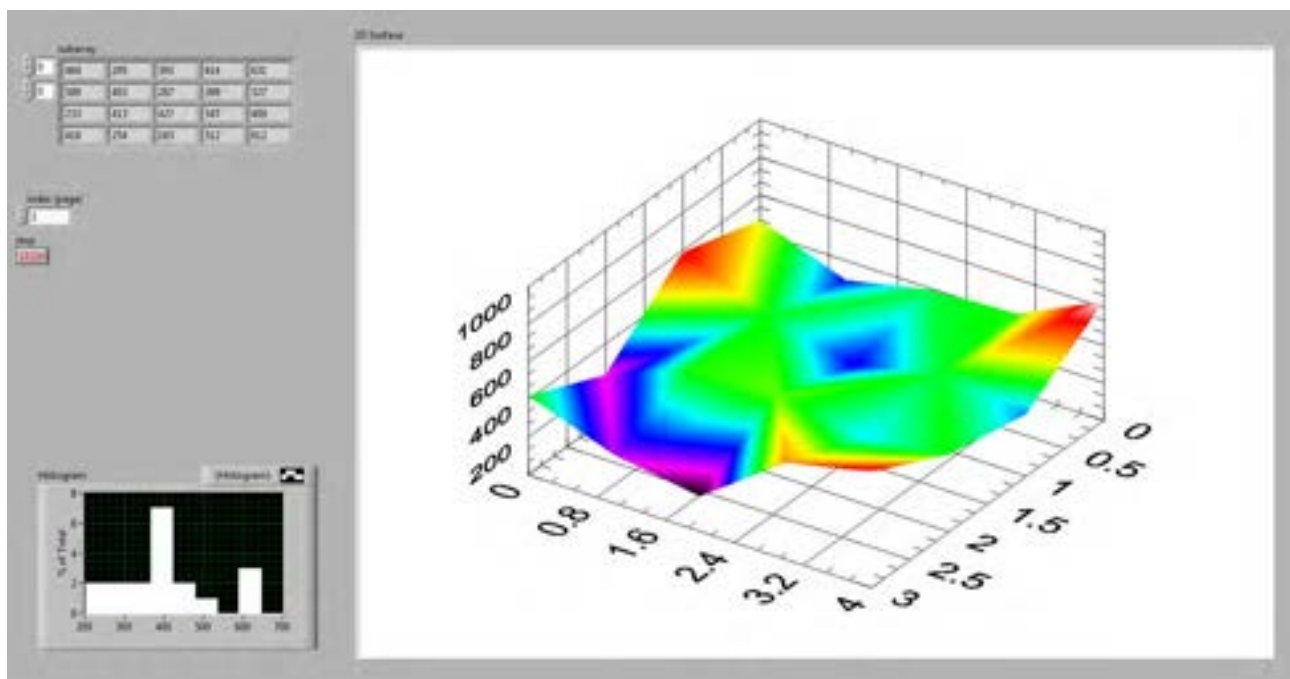


Figura 2.7.28: Mappa ultrasonora del pannello con PCM

Il confronto dei risultati 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 .

Tabella 2.7.9: Prove ultrasonore pre/post test su tavola vibrante.

	Pannello T. Q. prima	Pannello T. Q. dopo	Pannello con PCM prima	Pannello con PCM dopo
Velocità sonora media m/s	377	337	446	400
Deviazione standard m/s	147	155	113	121

3 Conclusioni

E' stato progettato e realizzato un sistema per contenimento dei PCM trovando i materiali da costruzione, e le geometrie di contenimento più appropriate per resistere alle sollecitazioni termiche e meccaniche. La tecnica di riempimento e sigillatura del sistema di contenimento ha mostrato di funzionare bene in tutte le prove effettuate.

Le prove sperimentali alle quali sono stati sottoposti i prototipi hanno evidenziato la bontà della progettazione del pannello innovativo per cella frigorifero mostrando una buona resistenza del pannello alle sollecitazioni termiche e meccaniche e assicurandone la compatibilità con la movimentazione sulla rete ferroviaria, considerando le azioni contemporanee di vibrazione e sollecitazione termica. La realizzazione dei prototipi di pannello ha sofferto invece i limiti e le imprecisioni dovute ad una costruzione artigianale che potranno ragionevolmente essere superati in una produzione industriale, con l'uso delle tecnologie costruttive più accurate. Le prove termiche hanno infatti evidenziato la non completa e uniforme aderenza del pannello esterno di finitura con la superficie esterna del sistema di impacchettamento dello strato di PCM che ha introdotto all'interfaccia una sottile intercapedine d'aria che a livello sperimentale non ha fatto raggiungere al pannello i livelli di efficienza attesi dai risultati delle elaborazioni numeriche. La resistenza termica introdotta dal sottile strato di aria riduce fortemente la capacità di trasmettere il calore verso lo strato di accumulo termico. Le prove meccaniche, effettuate confrontando il comportamento del pannello innovativo con PCM con un pannello senza PCM ma realizzato con gli stessi limiti artigianali, non hanno evidenziato invece particolari problemi legati all'introduzione del sistema di contenimento del PCM.

Le prove dinamiche hanno sollecitato i pannelli simulando le vibrazioni che un container fatto dello stesso materiale avrebbe durante un trasporto. Il sistema 3D Vision ha misurato gli spostamenti assoluti e relativi dei marker fissati sui pannelli e non ha evidenziato cambiamenti di spessori del pannello o deformazioni della struttura.

Le prove ultrasonore eseguite prima dei test hanno evidenziato che il riempimento è omogeneamente distribuito all'interno della struttura a sandwich. Le prove dopo i test non hanno verificato sostanziali attenuazioni nella trasmissione dei segnali imputabili a presenza di vuoti rilevabili da possibili scollamenti/delaminazioni/cambiamenti di fase.

I risultati di test eseguiti sono da ritenersi propedeutici alla verifica dell'effetto delle vibrazioni sul comportamento di altri materiali a cambiamento di fase di varia composizione (es. sali idrati).

E' da studiare il comportamento di questi materiali nella configurazione di posizionamento verticale/orizzontale relativa al tetto ed alle pareti laterali della cella frigorifera; a tal fine sono da individuare eventuali 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.

4 Bibliografia

1. M. Mongelli, G. De Canio, I. Roselli, A. Colucci, A. Tati, "3DMotion Capture and FEM Analysis for Shaking Table tests at ENEA Casaccia Research Center ", Ohrid, Republic of Macedonia, 14th European Conference on Earthquake Engineering, August 30–September 3, 2010.
2. I. Roselli, G. Mencuccini, M. Mongelli, F. Beone, G. De Canio, F. Di Biagio, A. Rocchi, "The DySCo virtual lab for Seismic and Vibration Tests at the ENEA Casaccia Research Center", 14th European Conference On Earthquake Engineering. August 30–September 3, Ohrid, Republic of Macedonia, 2010.
3. G. De Canio, M. Mongelli, I. Roselli, A. Tati, "Elaborazione di dati di spostamento da sistema di motion capture 3D per prove su tavola vibrante", ANIDIS 2013 XV CONVEGNO, L'ingegneria Sismica Italiana Padova, 30 giugno-4 luglio, 2013.
4. A. Savitzky, M. J. E., Golay, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, Analytical Chemistry", 36 (8), 1627–1639.
5. J. N. Lyness, C. B. Moler, "Numerical Differentiation of Analytic Functions", SIAM Journal on Numerical Analysis, 4(2), 1967, pp. 202-210.
6. R. W. Schafer, "HPL-2010-109: On the Frequency-Domain Properties of Savitzky-Golay filters", HP Laboratories, 2010.

5 Abbreviazioni ed acronimi

PCM : Materiali a Cambiamento di Fase fase o PCM (Phase Change Materials) sono materiali in grado di accumulare o rilasciare energia termica per transizione di fase da solido a liquido in intervalli di temperatura che possono essere scelti in funzione dell'applicazione. Un grande vantaggio nel loro utilizzo risiede nel fatto che questi materiali possono essere micro incapsulati e dispersi in matrici molto diverse, fra cui la polpa cellulosica o matrici poliuretatiche schiumate.

UNIPM : Università Politecnica delle Marche, in particolare ci si riferisce al Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche ed al gruppo del Prof. Ing. Paolo Principi con cui ENEA ha un accordo di collaborazione sia sul PAR2012 che 2013. L'attività scientifica del gruppo di ricerca è focalizzata nei seguenti campi: comportamento termoigrometrico dell'edificio, uso in edilizia di materiali in passaggio di fase (PCM) , efficienza energetica degli edifici, tetti verdi, tecniche per l'utilizzo dell'energia solare, componenti innovativi di Impianti termotecnici, sistemi solari passivi, ventilazione ibrida e naturale, dissalazione con metodi termici, ottimizzazione di elementi per l'involucro in edilizia

SA.M.E. : L'azienda SA.M.E. s.r.l. (Sargentini Materiali Edili, s.r.l.) si occupa della produzione e commercializzazione di materiali isolanti termoacustici di tipo riflettente. Nata dall'esperienza pluriennale nel settore edile, SA.M.E. si è posta l'obiettivo di sviluppare con propri brevetti il mercato degli isolanti riflettenti, già molto diffuso in alcuni Paesi Europei ed in Canada. L'automatizzazione dei processi produttivi e l'utilizzo di materiali di prima scelta mirano a prodotti con costante alta qualità certificata. Il personale tecnico aziendale ha collaborato alla produzione delle strutture di contenimento del PCM.