



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di metodologie di controllo NDT su componenti saldati e correlazione con le caratteristiche meccaniche

M. Moncada, G. Barbieri, A. Tatì, U. De Angelis

SVILUPPO DI METODOLOGIE DI CONTROLLO NDT SU COMPONENTI SALDATI E CORRELAZIONE CON LE CARATTERISTICHE MECCANICHE

Massimo Moncada, Giuseppe Barbieri, Angelo Tatì, Ugo De Angelis (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

Progetto : Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

Indice

Sommario.....	4
Introduzione.....	5
Le schiume metalliche AFS.....	6
Esami non distruttivi.....	8
<i>Tecnica Ultrasonora</i>	<i>9</i>
<i>Esami con tecnica radiografica (RX).....</i>	<i>12</i>
<i>Caratterizzazione Meccanica dei pannelli AFS</i>	<i>14</i>
<i>Prova di flessione su pannelli AFS.....</i>	<i>14</i>
<i>Prove a flessione su 4 punti per correlazione con test radiografici e ultrasonori.....</i>	<i>16</i>
<i>Influenza delle tensioni residue sulla resistenza a compressione dei pannelli AFS.....</i>	<i>19</i>
<i>Esami non distruttivi su campioni di AFS saldati al fascio elettronico e LASER</i>	<i>24</i>
<i>Correlazione fra prove meccaniche ed analisi RX per i campioni saldati EBW.....</i>	<i>24</i>
<i>Conclusioni sulla saldatura a fascio Elettronico</i>	<i>28</i>
<i>Correlazione fra prove meccaniche ed analisi RX per i campioni saldati Laser-TIG.....</i>	<i>30</i>
<i>Conclusioni sulla saldatura a fascio Laser</i>	<i>30</i>
Conclusioni	32
Bibliografia.....	35

Sommario

I compositi a base di schiuma d'alluminio sono materiali molto interessanti per l'applicazione nel settore dei trasporti. In particolare, i sandwich realizzati tramite legame metallurgico con due pelli in alluminio e il core in schiuma d'alluminio (AFS), si candidano all'impiego in componenti strutturali grazie alla loro resistenza a fuoco, alla elevata riciclabilità associate ad un rapporto resistenza-peso ed a proprietà di assorbimento di energia estremamente elevate.

Questi materiali teoricamente sono considerati isotropi ed omogenei, tuttavia, i prodotti commerciali di grosse dimensioni presentano spesso una certa disomogeneità che può essere concentrata sia a livello di *bonding* metallurgico pelle-*core*, sia a livello di una coalescenza più o meno localizzata degli alveoli.

Il lavoro è mirato a verificare se e quali in formazioni è possibile ottenere mediante test non distruttivi standard come gli UT e gli RX su un materiale non convenzionale come gli AFS. In particolare presenta lo sviluppo di un procedimento di controllo mediante UT in trasmissione su pannelli AFS per verificare la possibilità di individuare le zone di distacco pelle *core* e le zone di disomogeneità. I risultati sono stati confrontati con test di tipo RX e gli stessi pannelli sono sottoposti a caratterizzazione meccanica mediante test a flessione su 4 punti per verificare la correlazione fra caratteristiche meccaniche e livello di imperfezione negli AFS.

La correlazione fra immagini radiografiche e test distruttivi ha mostrato come sembra esistere un legame fra densità media e ubicazione della zona di frattura. Tuttavia, le tecniche tradizionali non sono in grado di fornire indicazioni nel caso di difetti di scollatura sia superficiale alle pelli sia interna al core. Infatti la correlazione fra immagini visive di campioni con scollature anche molto marcate e immagini radiografiche non permette di rilevare questo tipo di difetto. Per tale motivo è stato avviato uno studio per individuare quale tecnica innovativa di controllo possa essere applicata a questo tipo di materiale e sono riportati alcuni dati preliminari relativi all'applicazione della tecnica Shearografica.

Introduzione

Il lavoro è inquadrato nell'ambito delle attività sul Progetto 3.5 "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" dell' AdP ENEA-MSE, obiettivo E "Sviluppo di procedure fabbricazione, progettazione e simulazione del comportamento di componenti di dimensione rappresentativa per l'alleggerimento strutturale di vettori per il trasporto". In particolare, l'impiego degli Aluminum Foam Sandwich (AFS) nella realizzazione di mezzi di trasporto permetterebbe una riduzione del peso associata ad elevati standard di sicurezza grazie alle eccezionali doti di assorbimento di energia.

I pannelli AFS (Aluminium Foam Sandwich) possono ritenersi i componenti di maggior interesse dal punto di vista strutturale tra quelli realizzabili con schiume metalliche: essi sono costituiti da un "core" in schiuma e da due sottili pelli esterne in alluminio (Al bulk), il cui assemblaggio permette la realizzazione di componenti dall'elevata rigidità flessionale ed alta capacità di assorbimento di urti. Tali caratteristiche meccaniche, associate alle doti di estrema leggerezza (densità dal 20 al 40% del bulk) e alla capacità di schermatura elettromagnetica, rendono questi materiali particolarmente interessanti nell'ambito dei trasporti, sia come assorbitori di energia (resistenza passiva) sia nello sviluppo di "space frame" ad elevata rigidità e peso ridotto che possono contribuire alla realizzazione di vettori leggeri e a basso impatto ambientale. I pannelli AFS utilizzati sono pannelli sandwich realizzati in continuo con due pelli esterne in alluminio, ed un core centrale in schiuma di alluminio. Il legame fra pelli e core è realizzato mediante legame metallurgico. A differenza degli AFS con pelli incollate e dei pannelli Honeycomb, gli AFS con legame metallurgico possono essere impiegati anche in quei componenti semi strutturali di navi e treni, dove le norme di resistenza al fuoco escludono materiali polimerici e gli stessi materiali ibridi metallo polimero come gli Honeycomb o gli AFS con pelli incollate.

Con i dovuti accorgimenti gli AFS con legame metallurgico possono essere saldati. Esistono dei limiti allo spessore minimo delle pelli usualmente non inferiore a 1 mm mentre sono stati prodotti AFS con pelli spesse 20 mm e core di 76 mm per un pannello di spessore complessivo di 116 mm.

Gli AFS possono essere uniti fra di loro con tecnologie che vanno dalla rivettatura alla saldatura TIG/MIG. Tuttavia, la zona di giunzione con tecniche tradizionali rappresenta un forte punto di discontinuità nelle proprietà del materiale. Questo lavoro presenta lo sviluppo di un procedimento di analisi NDT sia su materiale base tal quale (TQ) sia di procedimenti di saldatura per la giunzione di pannelli per realizzare componenti, minimizzando l'estensione e l'entità delle variazioni delle caratteristiche del particolare materiale base. I campioni saldati analizzati sono stati realizzati sulla base delle ottimizzazioni riportate nel rapporto "Sviluppo di procedimenti di Saldatura laser ed EBW per pannelli AFS" Rds/2011/203. Per quanto riguarda la geometria delle giunzioni sono state prese in considerazione diverse soluzioni, sia per il collegamento dei pannelli tra di loro, che con elementi strutturali esterni. La qualificazione è stata effettuata mediante test non distruttivi di tipo ultrasonoro e radiografico sui quali successivamente è stata effettuata una qualifica meccanica con test di flessione a 4 punti. I dati sperimentali sono stati anche utilizzati per validare i modelli FEM semplificati utilizzati per la simulazione del test in modo da sviluppare modelli specifici per la progettazione di strutture complesse con questi materiali nelle attività riportate nel report "Fabbricazione e qualificazione di componenti saldati e progettazione di componenti in AFS" Rds/2012/102.

Le schiume metalliche AFS

Nelle figure seguenti sono riportate le principali caratteristiche dei pannelli oggetto di studio.

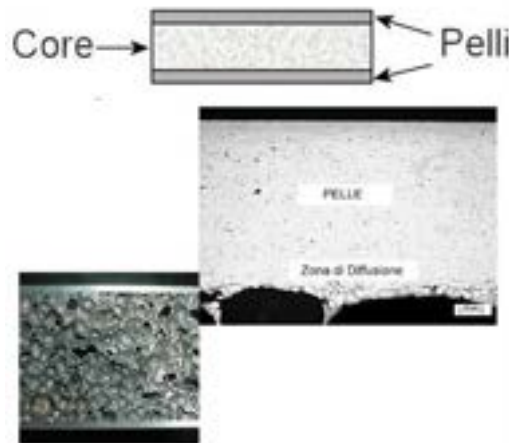


Figura 1: Struttura delle Schiume metalliche

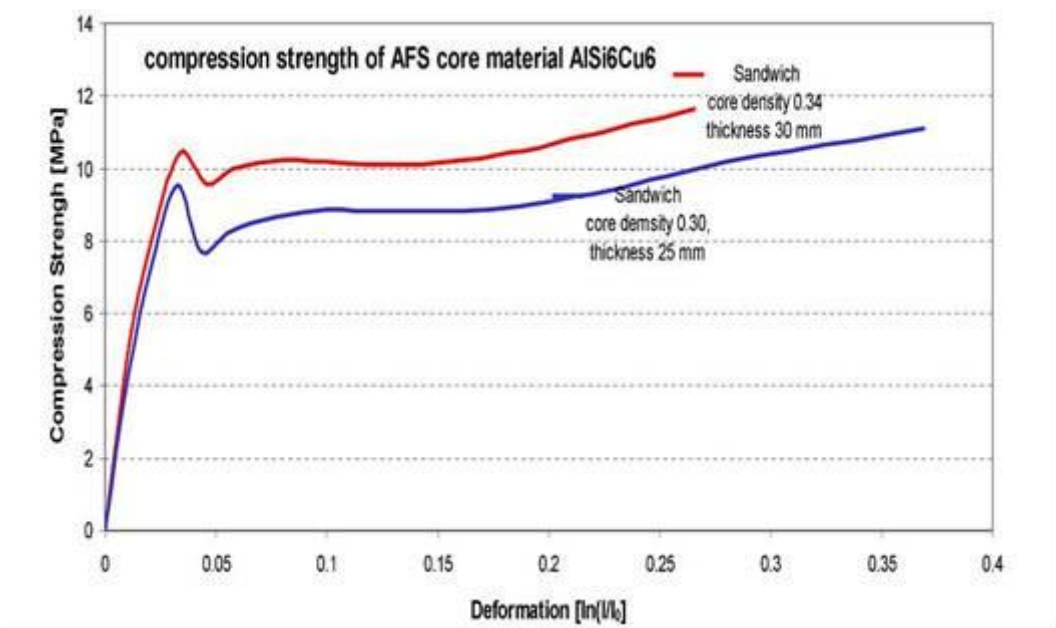
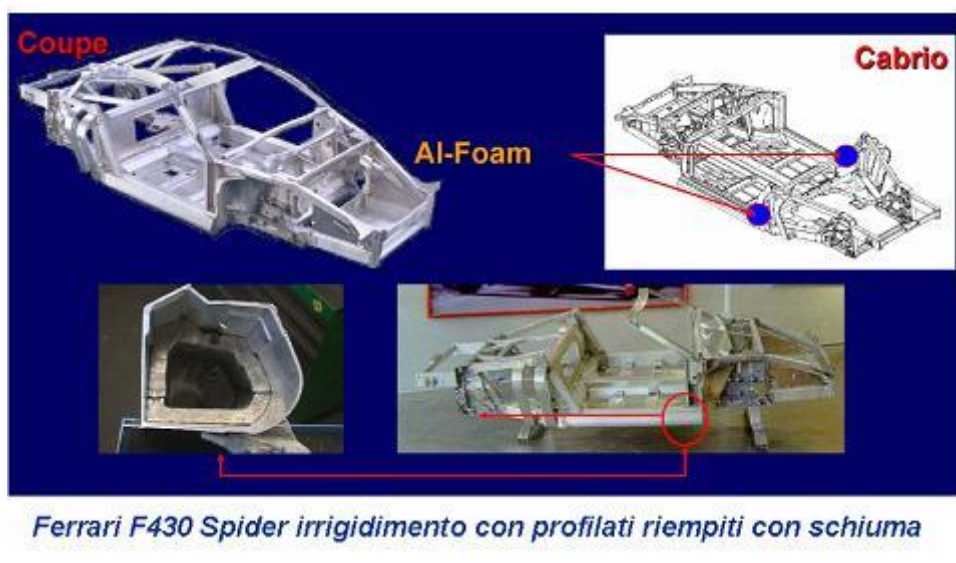


Figura 2: Caratteristiche meccaniche tipiche

Pelli	- Spessore nominale: 2 mm - Materiale : AA6082 - Densità: 2.7 g/cc	
Core	- Spessore nominale: 26 mm - Materiale AlSi6Cu6 - Densità : 0.34g/cc	
AFS	- Spessore: 30 mm +/-0.5 mm - Densità : 0,65 g/cc	

tab. 1: Dimensioni degli AFS esaminati

Alcune applicazioni commerciali dei prodotti Alulight riguardano: i crashworthiness per la Audi Q7 e componenti di rinforzo del frame della Ferrari spider 430 sviluppati in collaborazione con ALCOA. Questi materiali hanno ancora un costo piuttosto elevato e quindi tali da renderli utilizzabili esclusivamente per automobili di alta fascia ed allo stato attuale principalmente come elementi front end ed in generale per l'assorbimento degli urti. Un impiego su larga scala di questo tipo di materiali, che dovrebbe portare alla riduzione dei costi, attualmente non esiste, mentre esistono alcuni studi per la realizzazione di body in white di autoveicoli dedicati principalmente a concept di auto sportive con dimostratori prototipali che evidenziano come associato ad un riduzione del peso vengano notevolmente migliorate le proprietà di crashworthiness.



Autocarro leggero con braccio sollevatore telescopico in AFS



Figura 3: Applicazioni di AFS in componenti strutturali del settore automotive

Esami non distruttivi

Per la tipologia del materiale da esaminare e per le proprietà su cui vogliamo maggiormente investigare (p.e. la densità del core in schiuma), sono state prese in considerazione le seguenti tecniche di controllo non distruttivi (NDT):

- Tecnica Ultrasonora
- Tecnica Radiografica (RX)

Lo scopo di queste analisi è essenzialmente quello di valutare la densità della *core* dei pannelli. Infatti la variazione di densità mi da in qualche modo una misura dell'omogeneità interna del materiale e del maggiore o minore numero di sezioni resistenti. Le dimensioni dei campioni analizzati sono: 400x100x30 mm (secondo lo schema di Figura 4)

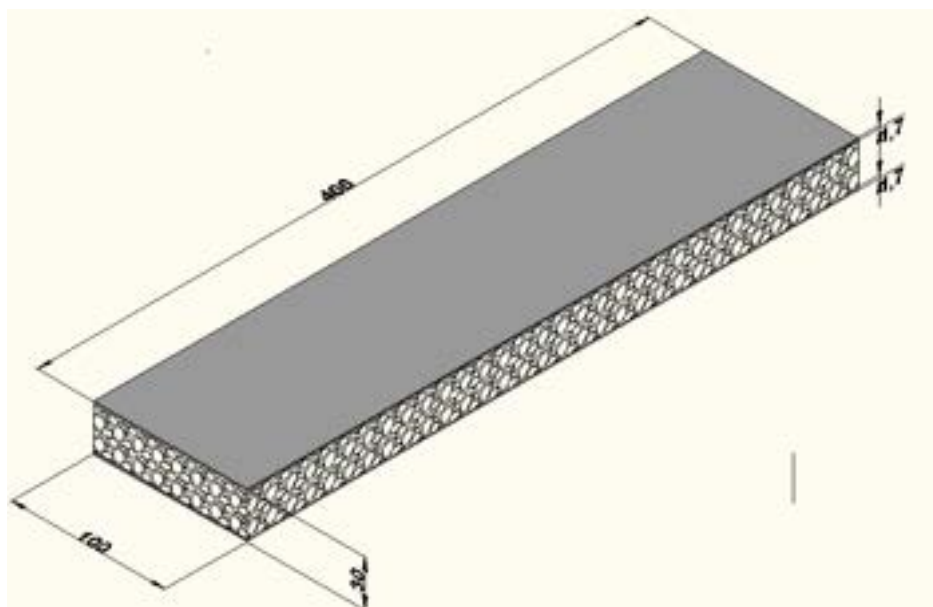


Figura 4: Schema di campioni sottoposti ad esami non distruttivi

Con queste tecniche ci sono comunque dei limiti sulla possibilità di individuare tutti i possibili difetti. In particolare, quello più “subdolo” da individuare è la scollatura parallela alla pelle che non ho modo di evidenziare (Figura 5).

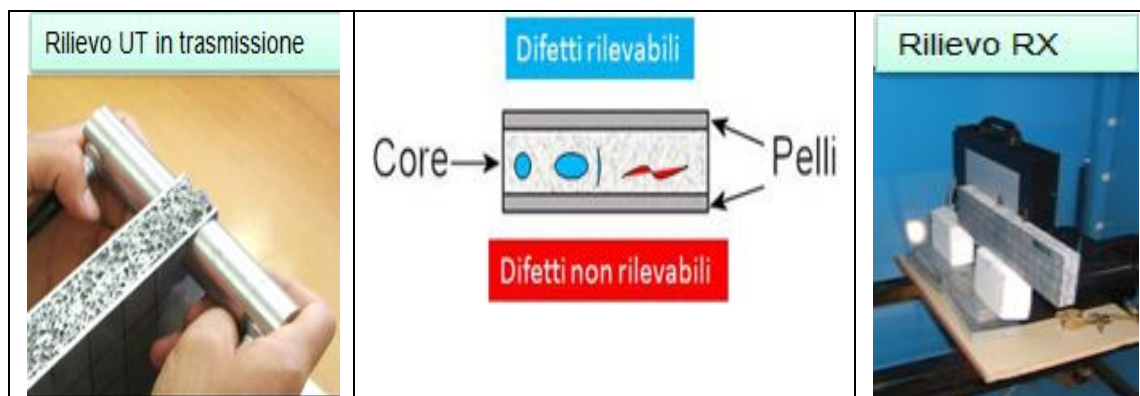


Figura 5: difetti individuabili con tecnica Ultrasonora e Radiografica

Tecnica Ultrasonora

Per il controllo dei campioni con gli ultrasuoni, normalmente si utilizzano due diverse tecniche:

- riflessione (Pulse Echo=PE): la sonda trasmette e riceve l'onda ultrasonora. Il componente è controllato solo da un lato. La presenza di una discontinuità è rilevata dall'ampiezza del segnale elettrico ed è possibile determinarne: grandezza, profondità e inclinazione.
- trasmissione (True-Trasmission=TT): consiste in una sonda trasmittente ed una ricevente, il componente 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 rilevata dall'attenuazione del segnale elettrico.

La prima tecnica, necessita di una elaborazione successiva ed è utilizzata su componenti omogenei spesso metalli e compositi di spessore contenuto in quanto l'onda UT attraversa il materiale 2 volte.

La seconda tecnica (Figura 6), quella da noi presa in considerazione, è più semplice ed immediata ed è utilizzata su componenti con elevato assorbimento e disomogenei (Nido d'ape o Honeycomb, Sandwich, composito) in quanto lo spessore è attraversato una sola volta e spesso le superfici non sono parallele. [1]

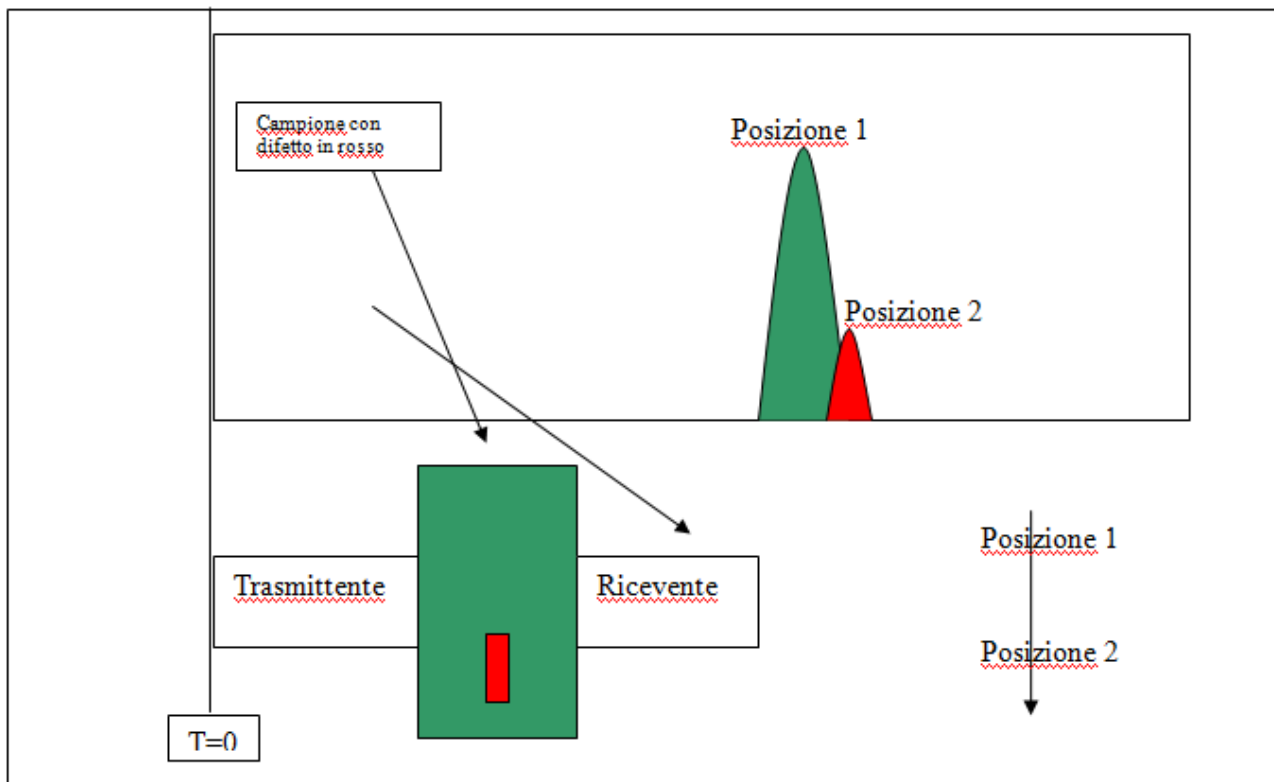


Figura 6: schema TT

Per ogni campione (Figura 7) di pannello AFS è stata eseguita una campionatura di 4 x 16 misure UT per stimare la velocità del suono nel materiale. Lo strumento ultrasonoro utilizzato è a bassa frequenza modello USM 23 Krautkramer portatile con sonde di frequenza 50 KHz e diametro cristallo ½" (Figura 8).

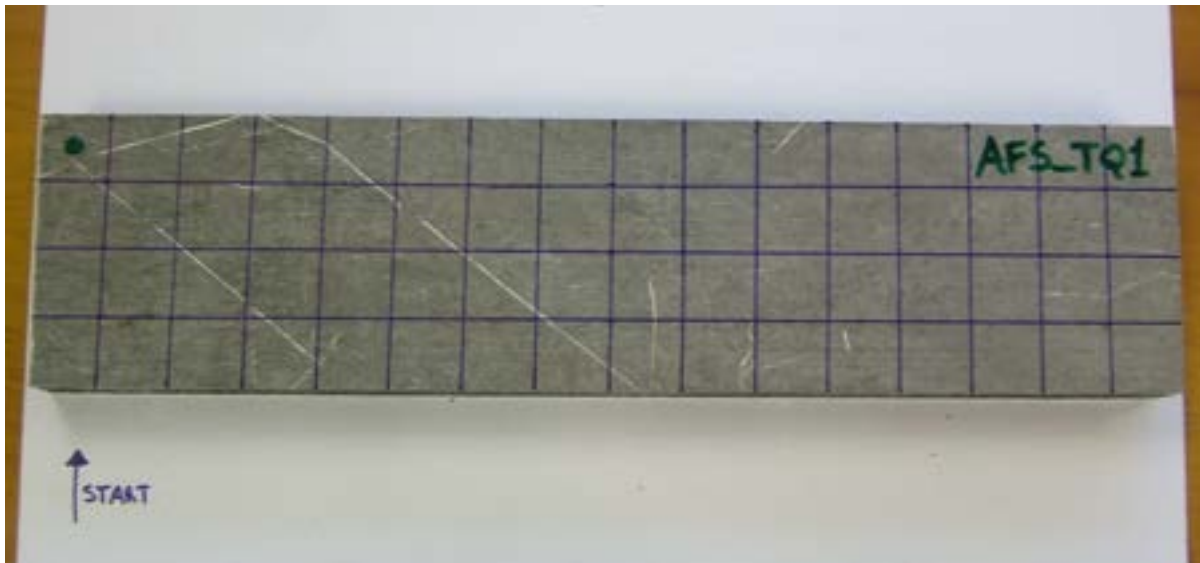


Figura 7: griglia di campionatura sul pannello AFS



Figura 8: Tecnica TT – Schiuma metallica in alluminio – il componente è tra le due sonde – Strumento a bassa frequenza

E stato utilizzato un software sviluppato da ENEA che mostra i valori di velocità del suono sotto forma di (Figura 9):

- valori numerici
- Mappa in falsi colori
- Mappa tridimensionale
- Istogramma di distribuzione delle velocità

Questo ci permette di comparare i campioni tra di loro ed estrarre degli indici di distribuzione e dimensione dei pori nella schiuma all'interno dei pannelli AFS.

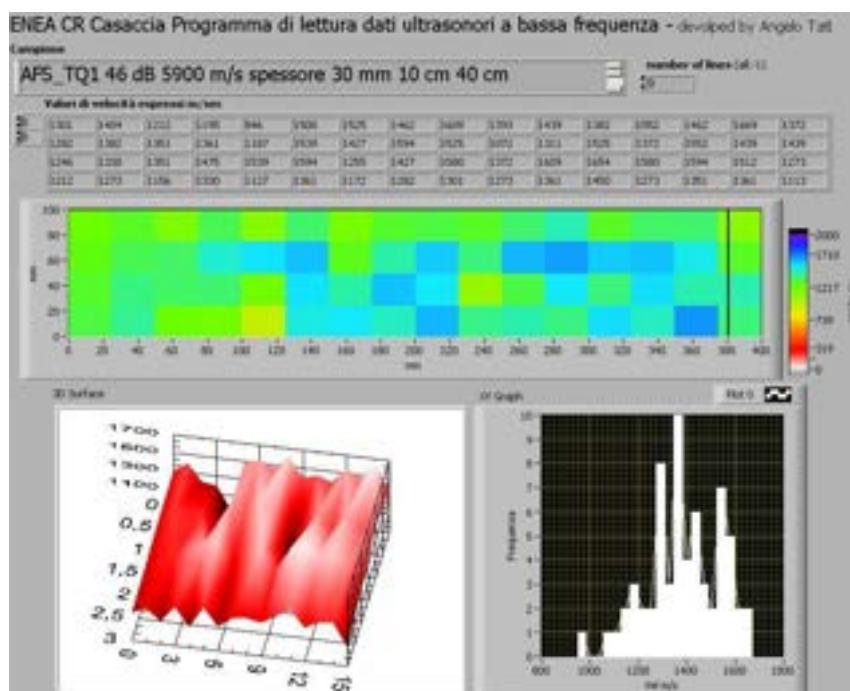


Figura 9: Risposte del programma di lettura ed analisi dati UT sviluppato in ENEA - campione TQ1

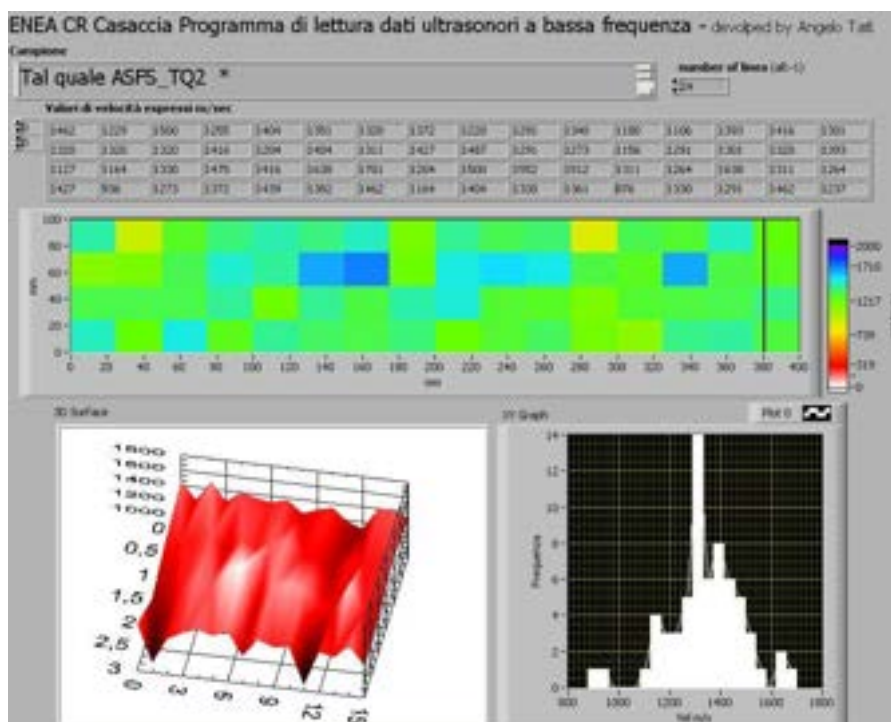


Figura 10: Risposte del programma di lettura ed analisi dati UT sviluppato in ENEA - campione TQ2

Da un primo confronto fatto sui campioni di pannello tal quale "TQ1" e "TQ2" (Figura 9 e Figura 10), si può vedere come la distribuzione della porosità sia molto disomogenea all'interno di ogni campione creando così delle aree maggiormente porose, e presumibilmente con una resistenza meccanica maggiore, ed altre con pochi pori e più grandi meno resistenti. Quest'ultima affermazione è stata verificata con i successivi test di flessione, attraverso i quali abbiamo individuato le regioni in cui hanno inizio i fenomeni di cedimento (fratture).

Esami con tecnica radiografica (RX)

Nella tab. 2 sono riportate le caratteristiche principali dell'impianto utilizzato (Figura 11), e la tab. 3 riporta i parametri utilizzati per radiografare i pannelli AFS.

La tecnica radiografica utilizza [2] una macchina a potenziale costante, fuoco da 2 mm e un pannello digitale a stato solido. L'immagine radiografica viene convertita in una immagine bitmap di risoluzione 512 x 512.

Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3.00
Detector	Perkinlmer	XRD 840 BE13	512x512 16 bit

tab. 2: caratteristiche principali dell'impianto utilizzato

Thickness	KV	mA	Avarege	Distance mm
30 mm	73	2	100	960

tab. 3: parametri radiografici per AFS



Figura 11: impianto radiografico – ENEA Casaccia

Il campione è diviso in tre zone di esposizione, la sequenza con cui i pannelli AFS sono radiografati è mostrata nella Figura 12, ogni radiografia viene digitalizzata ed elaborata con software dedicato per avere l'immagine radiografica dell'intero campione.

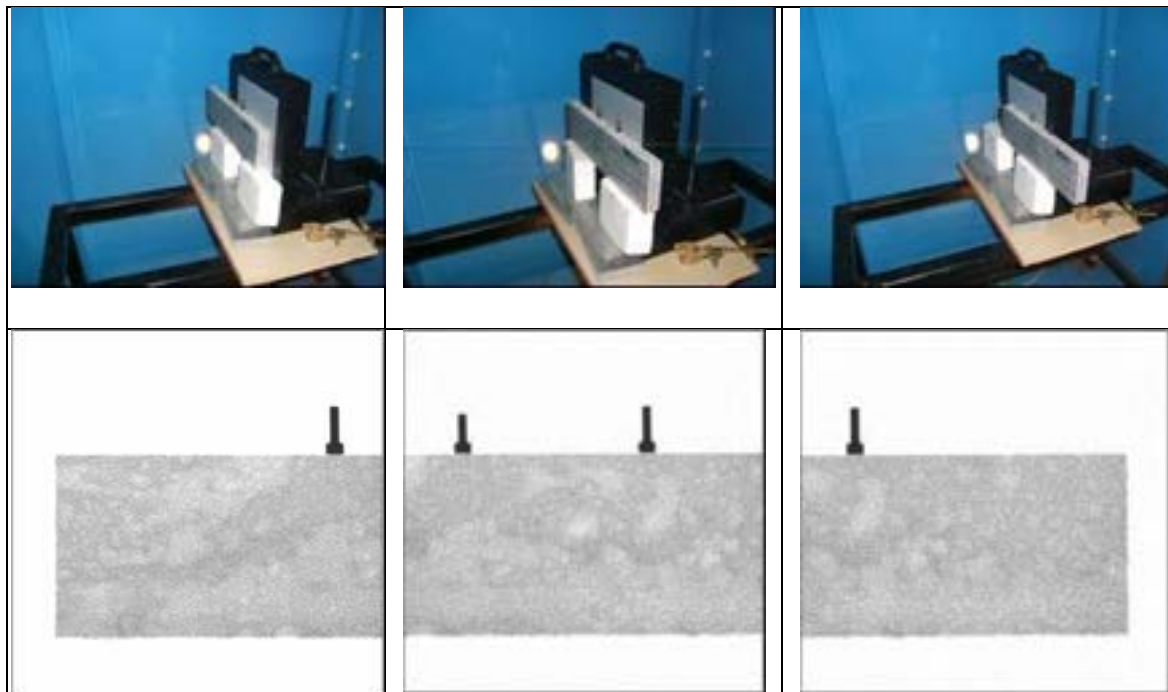


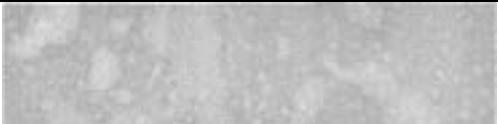
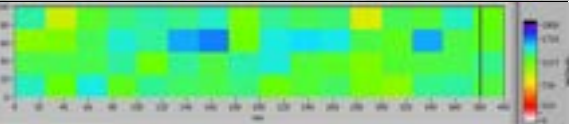
Figura 12: sequenza radiografica per i campioni di AFS

Nella tabella seguente sono riportate le immagini delle radiografie così ottenute per ogni campione (TQ1 e TQ2) dalle quali si evidenzia, in accordo con la precedente tecnica ultrasonora, una densità di schiuma molto disomogenea su tutti i campioni.

AFS TQ1	
AFS TQ2	

tab. 4: radiografie dei campioni tal quali TQ1 e TQ2

Possiamo quindi affermare che entrambe le tecniche di indagine non distruttiva (NDT) mettono in evidenza uno dei limiti dei pannelli AFS, ossia una distribuzione molto disomogenea dei pori e della loro dimensione. Inoltre dalla tab. 5 si può osservare come la tecnica radiografica, rispetto a quella ultrasonora, mostra questa disomogeneità in maniera più evidente e chiara

ID	Esame RX	Esame Ultrasuoni
AFS TQ1		
AFS TQ2		

tab. 5: Confronto tra tecniche NDT

Caratterizzazione Meccanica dei pannelli AFS

la caratterizzazione meccanica dei pannelli AFS tal quali è stata svolta mediante prove di flessione e di compressione.

Lo scopo della prova di flessione è molteplice in quanto può evidenziare aspetti diversi del comportamento del campione [3] [4], ovvero:

- resistenza e modo di cedimento;
- rigidità (in regime elastico lineare).

La metodologia con cui è stata eseguita la prova di compressione è servita essenzialmente alla valutazione del modulo di elasticità del *core*.

Prova di flessione su pannelli AFS

La prova di flessione è stata eseguita con una macchina elettro-meccanica DMG, Denison Mayes Group, ad attuatore centrale e movimentazione tramite vite e madrevite a ricircolazione di sfere. La capacità di carico massima è pari a ± 100 kN e le velocità di traslazione della traversa mobile sono comprese tra 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ e 200 mm/min .

Il carico applicato viene misurato mediante una cella di carico del tipo resistivo (strain gauges) e la corsa dell'attuatore è monitorata da un Trasformatore Differenziale a Variazione Lineare (LVDT) mediante un sistema di controllo e acquisizione dati gestito da PC.

Il telaio può essere controllato imponendo un rateo di caricamento (N/s), un rateo di deformazione, nominale, espresso in mm/s ed infine, se il provino è munito di un adeguato sistema estensimetrico, di un rateo di allungamento (ϵ/s). Il controllo della grandezza guida è assicurato da un sistema a circuito chiuso (closed loop); il segnale del carico, della corsa dell'attuatore o dell'estensimetro vengono comparati in tempo reale con quello del generatore di funzione ed ogni scostamento immediatamente corretto da una controreazione del sistema di controllo (feedback signal). E' così possibile mantenere la costanza dei parametri operativi entro un margine pari al $\pm 0,1\%$ del valore selezionato.

In funzione dello spessore dei pannelli AFS e degli standard di riferimento per la caratterizzazione di pannelli sandwich è stata definita la dimensione dei campioni tipo ed è stata progettata l'apparecchiatura specifica che consente la caratterizzazione di questo tipo di pannelli con elevata riproducibilità delle condizioni di prova e con una discreta flessibilità ad adattarsi a diversi spessori e quindi lunghezze di campioni di AFS. L'apparecchiatura, progettata in modo da rispettare i requisiti previsti dalla ASTM C393 "Flexural Properties of Sandwich Constructions", consente di realizzare la prova di flessione sia su 4 punti

sia su 3 punti In Figura 13 è mostrata la macchina con la relativa attrezzatura per prove di flessione nella configurazione di test a flessione su 4 punti (L/4).



Figura 13: Vista di insieme del telaio di prova (capacità ± 100 kN)

L'esecuzione della prova a flessione su 4 punti permette infatti di caratterizzare il campione nelle condizioni di pura flessione nella sua parte centrale ed è di solito preferita per la caratterizzazione di questo tipo di materiale. Tuttavia, la possibilità di eseguire la prova anche su tre punti permette di ricavare immediatamente quelle che sono la rigidezza flessionale del pannello ed il modulo di rigidezza a taglio del core del pannello (Report RdS/2011/202).

I parametri di misura rilevati sono:

- **P** = curva di carico con registrazione del carico massimo;
- **Δ** = deflessione in mezzzeria (freccia) del campione;
- Curva carico/deflessione.
- Descrizione del tipo di rottura (rottura per taglio nel core, per delaminazione, delle pelli etc).

Prove a flessione su 4 punti per correlazione con test radiografici e ultrasonorici

I motivi per cui la prova a 4 punti è preferibile a quella a 3 (di più semplice esecuzione) sono i seguenti:

- applicando l'intera forza P in un unico punto al centro del campione, si determina una concentrazione di sforzi doppia rispetto a quella che si ha in corrispondenza degli appoggi;
- il punto di massimo momento è sotto il carico per cui, se il materiale non è omogeneo è meno probabile che si evidenzii la presenza di punti deboli situati in prossimità delle reazioni;
- la determinazione del carico di punta locale delle facce (*wrinkling*) è poco affidabile poiché, proprio laddove la forza di compressione della pelle è massima, essa è schiacciata sul *core* dal carico applicato;
- nella flessione a 4 punti, porzioni più ampie del campione sono sottoposte a sforzi costanti, ed eventuali punti deboli (nel *core* per la sollecitazione di taglio, nelle pelli per il momento) sono più facilmente evidenziabili.

La posizione dei carichi nella prova a 4 punti può essere scelta con relativa libertà ma la configurazione in cui i punzoni distano tra di loro metà della luce, produce momento e taglio massimi pari a quelli di un carico uniformemente distribuito e quindi è più realistica rispetto all'utilizzo effettivo del pannello stesso. Pertanto è la configurazione che è stata utilizzata.

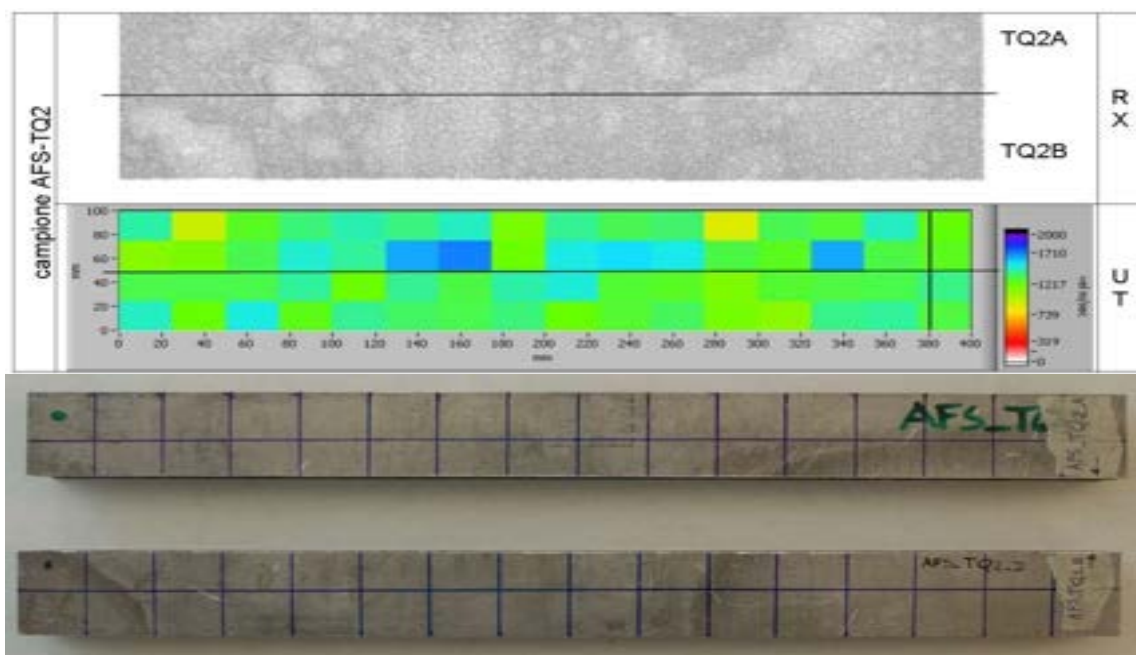


Figura 14: Estrazione dei campioni per qualifica meccanica dopo caratterizzazione NDT.

I campioni precedentemente radiografati sono stati suddivisi in due provini e sottoposti a prova a flessione su 4 punti. A titolo di esempio di seguito sono riferite le immagini relative al campione TQ2 (Figura 14). Il campione TQ2 mostra un andamento tipico della resistenza a flessione con un comportamento abbastanza omogeneo (vedi Figura 15). In particolare il carico massimo raggiunto è compreso fra 80 ed 85 MPa. Le parti lineari iniziali sono sovrapponibili fino a circa 30 MPa.

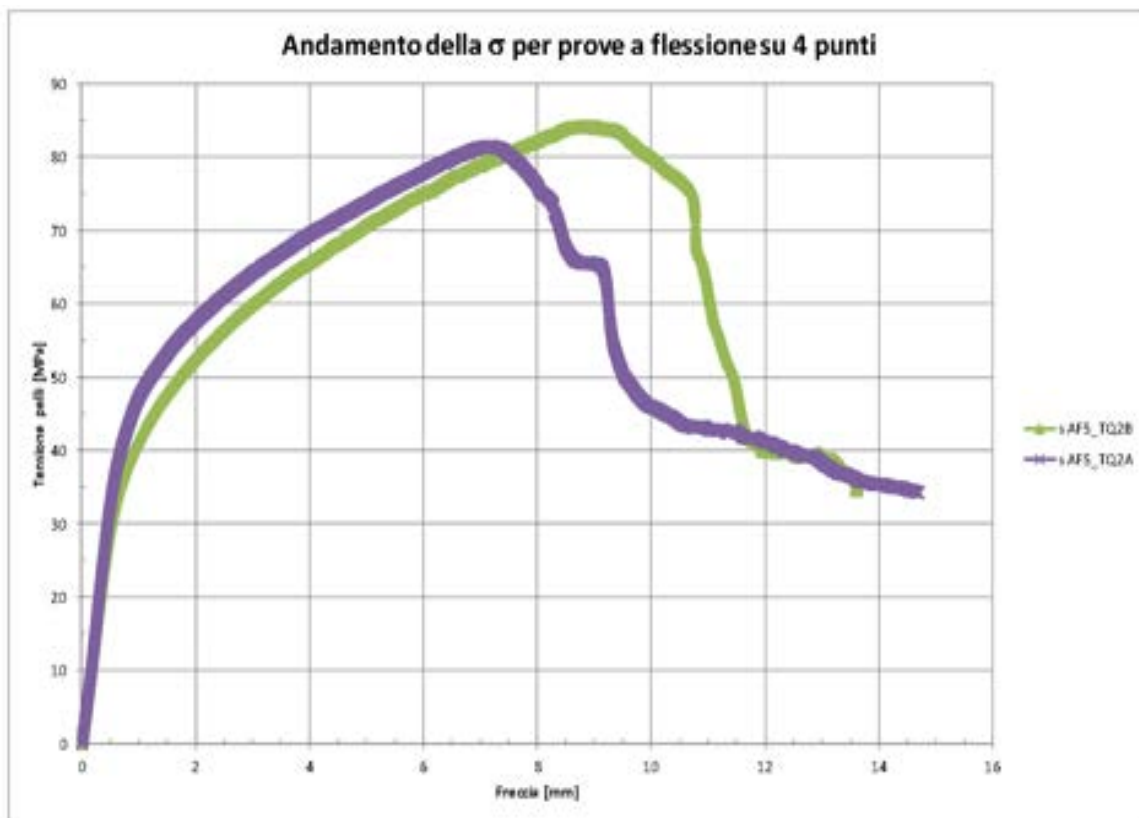


Figura 15: grafici della curva di tensione nelle pelli vs. freccia relative al campione TQ2.

Di seguito viene riportato il grafico complessivo di tutte le prove effettuate su materiale tal quale. Tutti i campioni esaminati si sono rotti a taglio per cedimento della schiuma (core).

Inoltre si osserva che, mentre i test relativi ai campioni TQ2 e TQ3, che hanno il lato maggiore perpendicolare alla direzione di laminazione, presentano andamento simile e valori di tensione massima compresi fra 82-e 92 MPa, il campione TQ1, il cui lato maggiore è parallelo alla direzione di laminazione (vedi schema riportato in Figura 16), presenta un andamento della curva tensione - freccia molto differente raggiungendo valori di tensione molto più alti (circa 130 MPa).

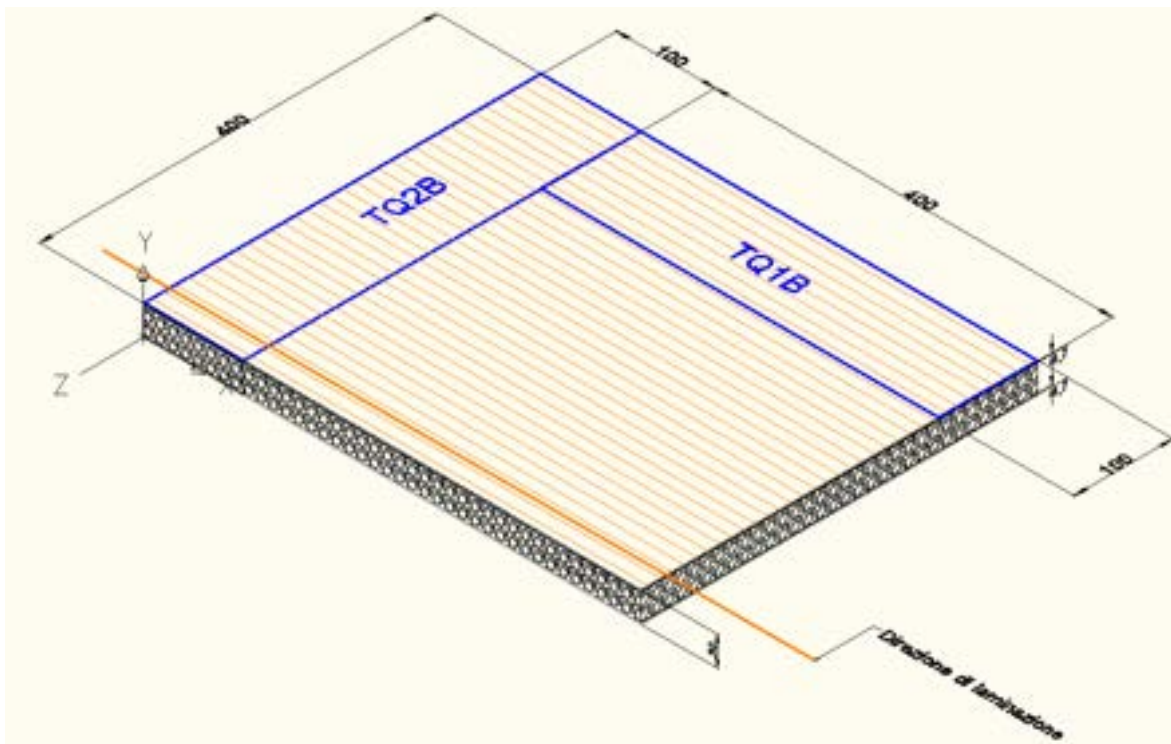


Figura 16: Schema di estrazione dei campioni di qualifica TQ1 e TQ2

Questo comportamento concorda con quanto riportato nell'articolo di J. Vogel ed altri (vedi Figura 18) in cui però i campioni di pannello hanno dimensioni leggermente differenti ($b=40$ mm; $L_t=300$; $d=34$; $t=1$ mm) [5]

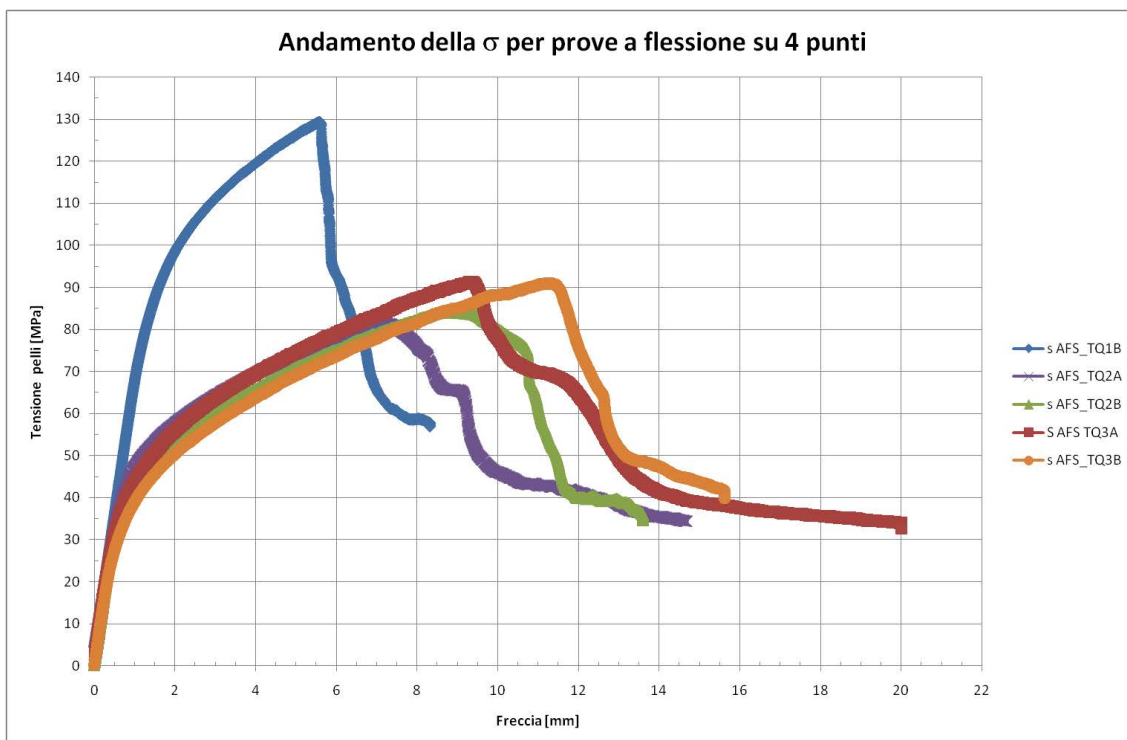


Figura 17: prove a flessione su 4 punti di campioni AFS Tal quali: grafico delle tensioni nelle pelli

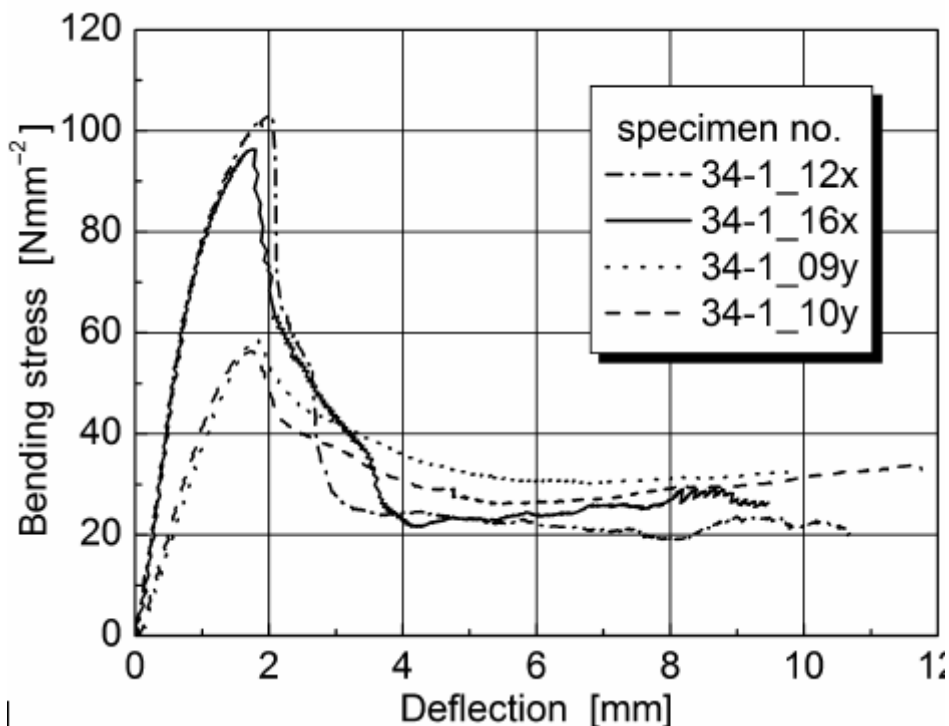


Figura 18: Curve di flessione a 4 punti, influenza della direzione di laminazione [5]

Influenza delle tensioni residue sulla resistenza a compressione dei pannelli AFS

Le indagini microscopiche eseguite sulle schiume metalliche costituenti il core dei pannelli sandwich (RdS/2012/100) hanno mostrato la presenza di tensioni residue nelle pareti dei pori. Tali tensioni, di diversa entità e segno, a seconda della posizione in cui sono misurate, possono essere ridotte o annullate da opportuni trattamenti termici di distensione. E' verosimile che ciò abbia un effetto sul comportamento macroscopico della schiuma (e quindi dei pannelli). Per verificare tale ipotesi sono state eseguite prove di compressione, a temperatura ambiente, ricavando 6 campioni da un pannello (numerato 03) come indicato dalla **Figura 19**. Il pannello è stato precedentemente radiografato (Figura 20), per valutare la diversa distribuzione dei pori nei rispettivi campioni di compressione. Metà dei campioni sono stati sottoposti al seguente ciclo termico:

- Tempo di salita 10 min. (dalla temperatura ambiente alla temperatura di 345°C)
- Velocità di riscaldamento 32°/min.
- Sosta per 10 minuti a 345°C
- Raffreddamento in forno (si spegne il forno e si lascia raffreddare per circa 20 ore)

In letteratura sono presenti poche indicazioni in merito: secondo [13] la curva di compressione del materiale tal quale ha un andamento più irregolare rispetto al materiale ricotto, il che è interpretato come effetto della presenza di tensioni residue e/o incrudimento nelle pareti dei pori. Va però notato che l'effetto è maggiore alle basse temperature dove si verifica anche una discreta diminuzione della resistenza e dell'assorbimento energetico rispetto alla schiuma tal quale. A temperatura ambiente le curve sono invece decisamente sovrapponibili, pur con l'irregolarità sopra indicata.

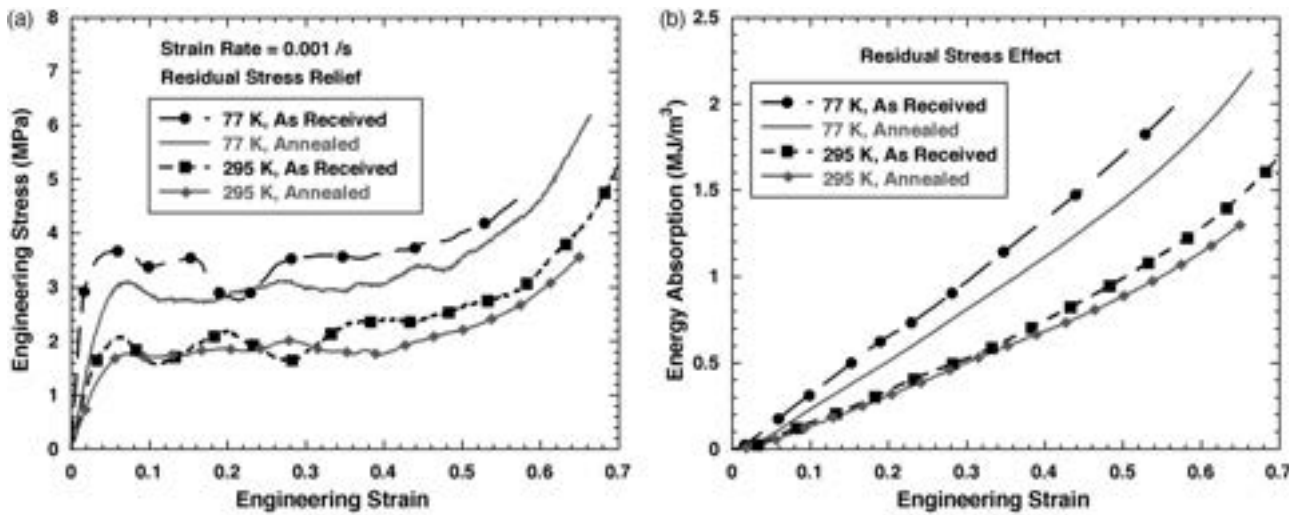


Figura 21: effetto della ricottura sul comportamento a compressione [13]

Nella tabella seguente sono riportate le dimensioni dei campioni (Figura 22) e i rispettivi pesi:

nominativo	Trattamento termico	H (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Peso (g)
03-1	Si	30	39,7	40,6	31,1
03-2	Si	30,1	39,2	40,5	30,4
03-3	Si	30	38,5	40,6	31,8
03-4	No	30,1	37,3	40	29,2
03-5	No	30,3	39,2	40,1	31,1
03-6	No	30,2	39,8	40,1	30,5

Tabella 1: caratteristiche geometriche dei campioni di compressione

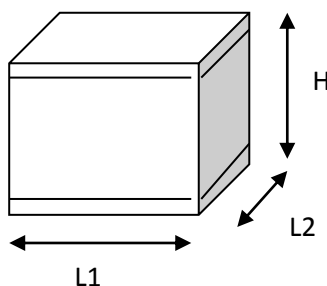


Figura 22: campioni di compressione

E' possibile quindi valutare la densità media della porzione di schiuma contenuta in ogni campione (Figura 23).

Il grafico di Figura 23 evidenzia una maggiore densità del campione 03_3 confermata anche dall'immagine RX (Figura 20) che mostra un addensamento nella zona in cui è stato estratto il campione (area tratteggiata in rosso).

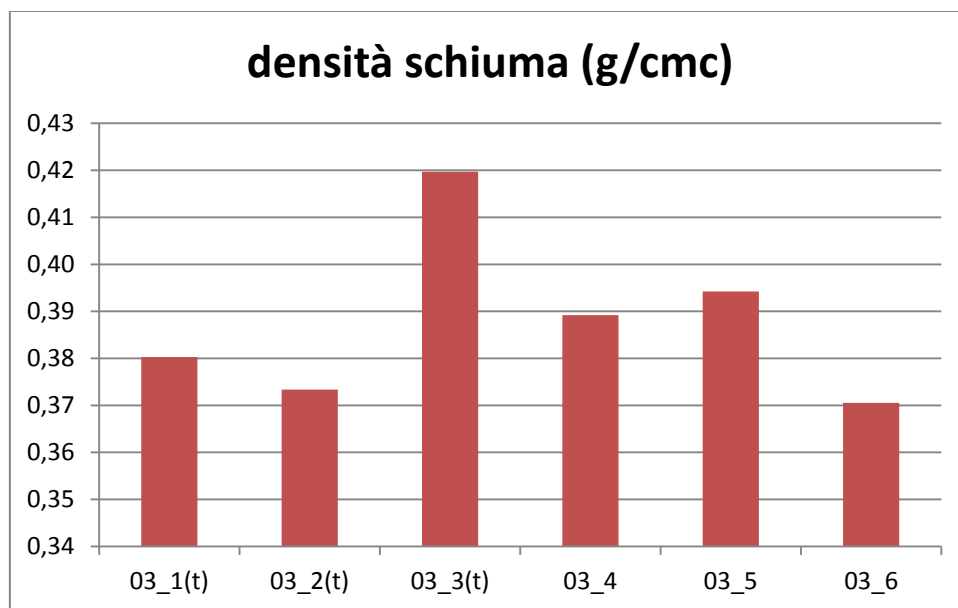


Figura 23: densità media della schiuma nei differenti campioni di compressione

Dall'analisi delle curve di compressione (Figura 24) si evince che tutti i campioni, eccetto quello 03_3(t), risultano avere lo stesso comportamento, dimostrando quindi che il trattamento termico non influisce sulla resistenza a compressione a temperatura ambiente. Per quanto riguarda il campione 03_3(t) possiamo concludere che la maggiore resistenza si debba imputare alla maggiore densità della schiuma di tale campione rispetto agli altri. In effetti la correlazione tra densità e resistenza a compressione delle schiume metalliche segue una legge del tipo seguente [7]

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0.33 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0.44 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$$

Pertanto con le densità medie delle schiume dei singoli campioni si otterrebbero i valori di resistenza relativa (tensione di snervamento) riassunti nella grafico di Figura 25.

Anche il grafico dell'energia di deformazione (Figura 26), area sottesa dalla curva σ - ϵ , mostra la sostanziale somiglianza del comportamento di tutti i campioni con l'eccezione di quello 03-3(t).

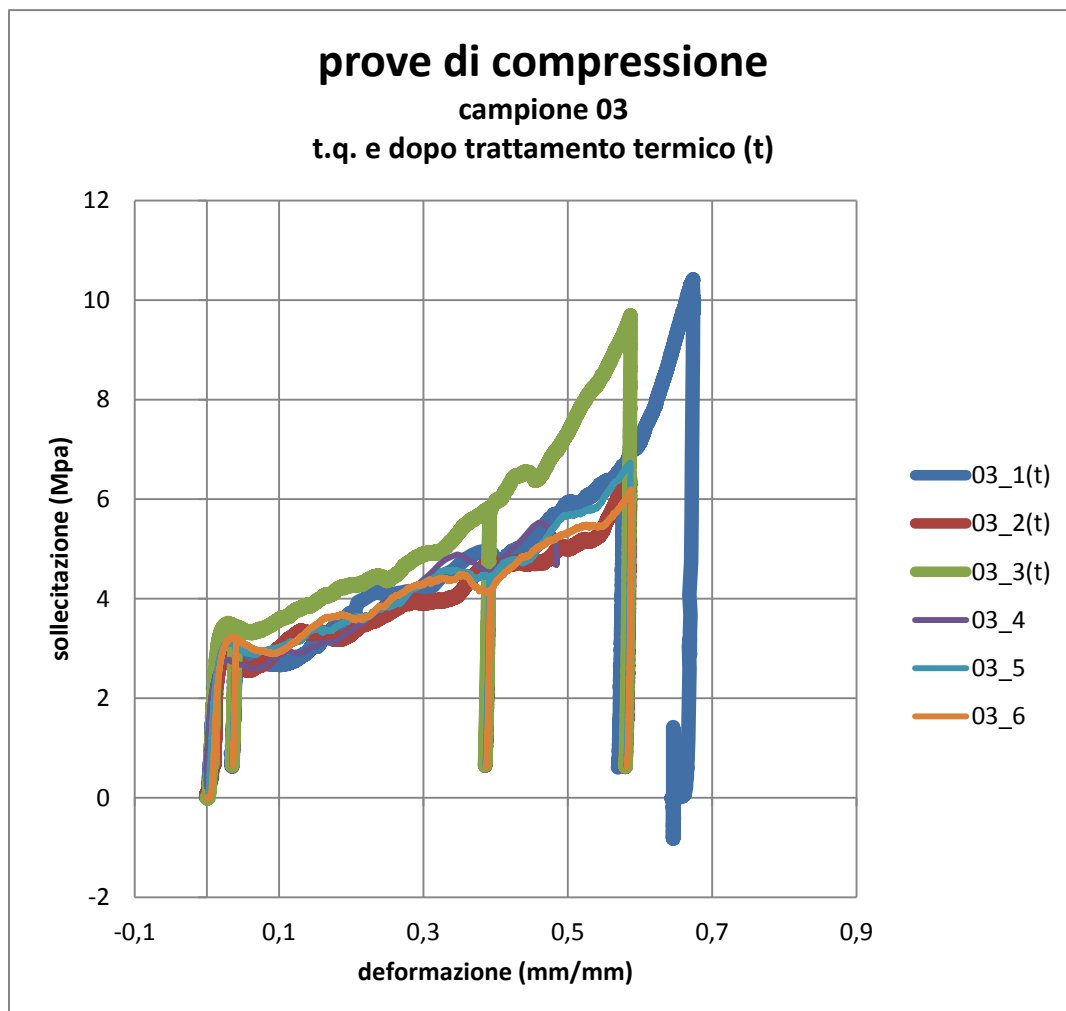


Figura 24: complessivo delle prove di compressione

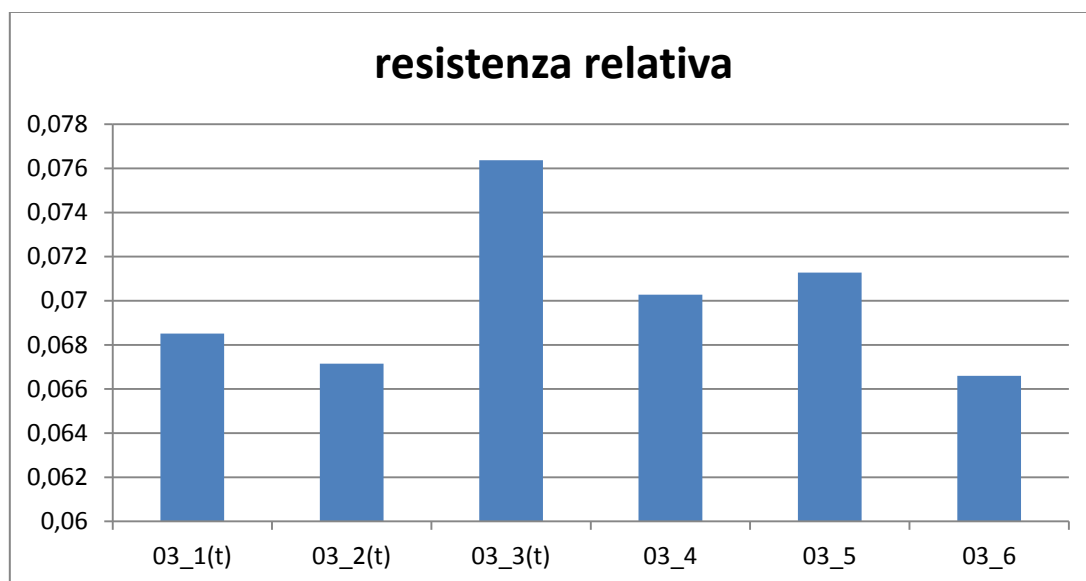


Figura 25: resistenza a compressione valutata secondo correlazione [7]

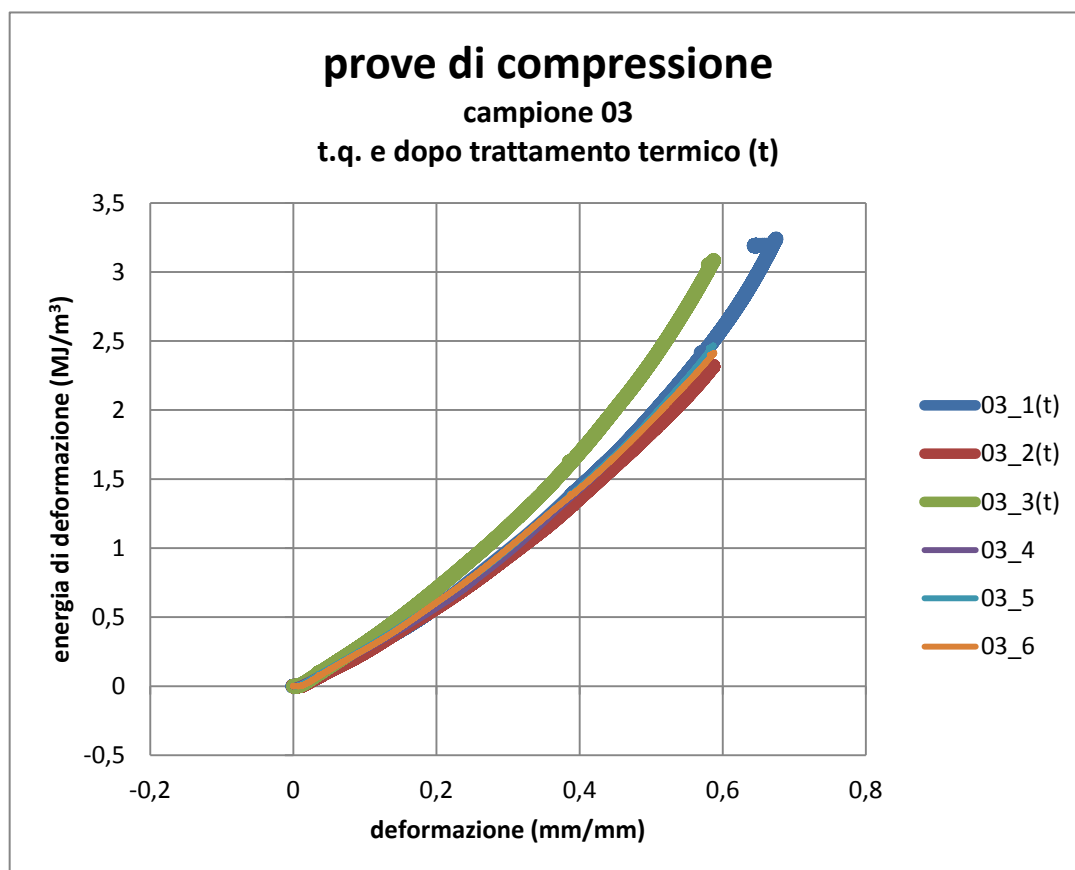
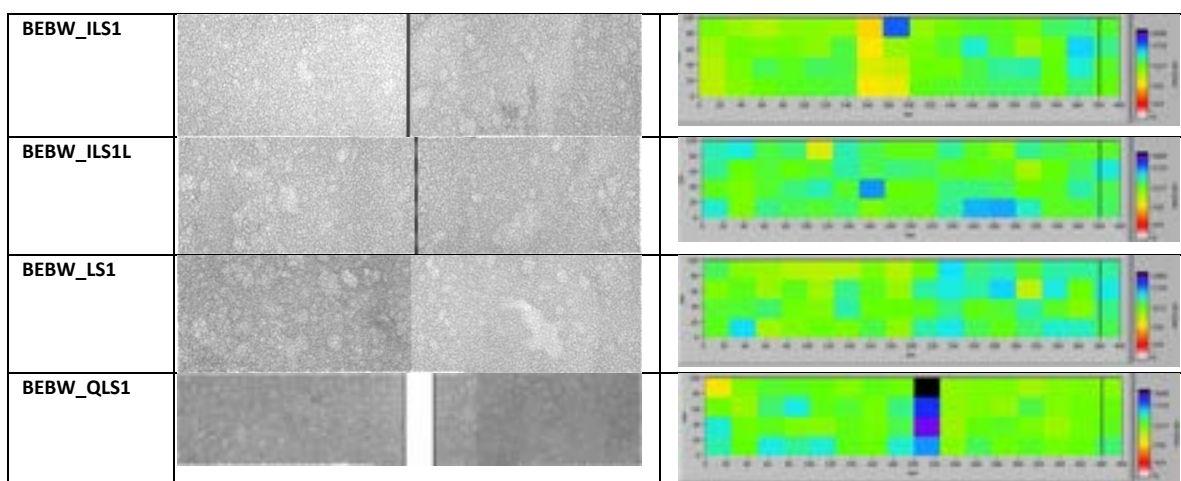


Figura 26: energia di deformazione delle prove di compressione

Esami non distruttivi su campioni di AFS saldati al fascio elettronico e LASER

Nella tab. 6 sono mostrati gli esami radiografici ed ultrasonori dei campioni, nelle diverse tipologie di giunto, sottoposte successivamente come i materiali base a test di flessione su 4 punti.

Da queste immagini si può vedere come i campioni, nelle immediate vicinanze del cordone di saldatura (ZTA) non risultino danneggiati dal processo stesso utilizzato, infatti ciò che ci si poteva aspettare era un incremento delle dimensioni dei pori legato alla presenza nella schiuma di idruro di titanio non dissociato. Questi tipi di analisi tuttavia non dà delle risposte esaustive riguardo ai possibili difetti presenti nel cordone di saldatura stesso. Risulta invece interessante la lastra del campione BEBW_LS1 in cui si può vedere anche ad occhio nudo che sono stati saldati due pannelli con densità di schiuma molto differenti, il lato sinistro risulta più denso, e quindi più resistente, di quello destro. Tale affermazione è stata verificata dalle successive prove di flessione.



tab. 6: Esami Radiografici e Ultrasonori dei campioni per la caratterizzazione del giunto

Correlazione fra prove meccaniche ed analisi RX per i campioni saldati EBW

Le prove di flessione sui campioni saldati sono state fatte con la stessa attrezzatura e nelle stesse condizioni di carico precedentemente utilizzate nella caratterizzazione del materiale tal quale. Ogni provino è stato ottenuto dividendo a metà i campioni di qualifica della saldatura (Figura 28). I provini hanno le stesse dimensioni di quelli del materiale base (45x400x30 mm) e sono stati posizionati sull'attrezzatura in modo che il cordone di saldatura stesse al centro, in corrispondenza dell'LVDT, nella zona in cui si ha solo momento flettente (come mostrato in Figura 35).

Le prove di flessione sui campioni saldati sono state realizzate sia con direzione di saldatura ortogonale al verso di laminazione sia con direzione di saldatura parallela al verso di laminazione. In generale la rottura è avvenuta in tutti i casi a livelli di sollecitazione comparabile con quella del materiale base, nel core tra punzone e coltello. In un solo caso la rottura è avvenuta nel giunto saldato tuttavia a livelli di sollecitazione molto elevati.

La saldatura caratterizzata è stata solamente quella con i parametri ottimizzati ad 1,5 m/min. Questa scelta è stata dettata dall'analisi visiva dei campioni preliminari di saldatura che ha evidenziato come la saldatura a minore velocità permette un migliore raccordo fra le creste del giunto saldato. Inoltre sono minimizzate le variazioni di penetrazione dovute all'elevata conducibilità del materiale.

Il campione di saldatura LS, senza inserto, è stato ottenuto con direzione di saldatura parallela al verso di laminazione e successivamente il campione standard 100 mm x 400 mm è stato suddiviso in due parti uguali identificati con LS1A ed LS1B.

Il risultati delle prove a flessione mostrati nella Figura 27 sono simili nell'andamento ma hanno performance in termini di tensione massima notevolmente differenti. Il provino LS1A mostra infatti una σ_{max} di circa 104,8 MPa contro gli 86,8 MPa del provino LS1B.

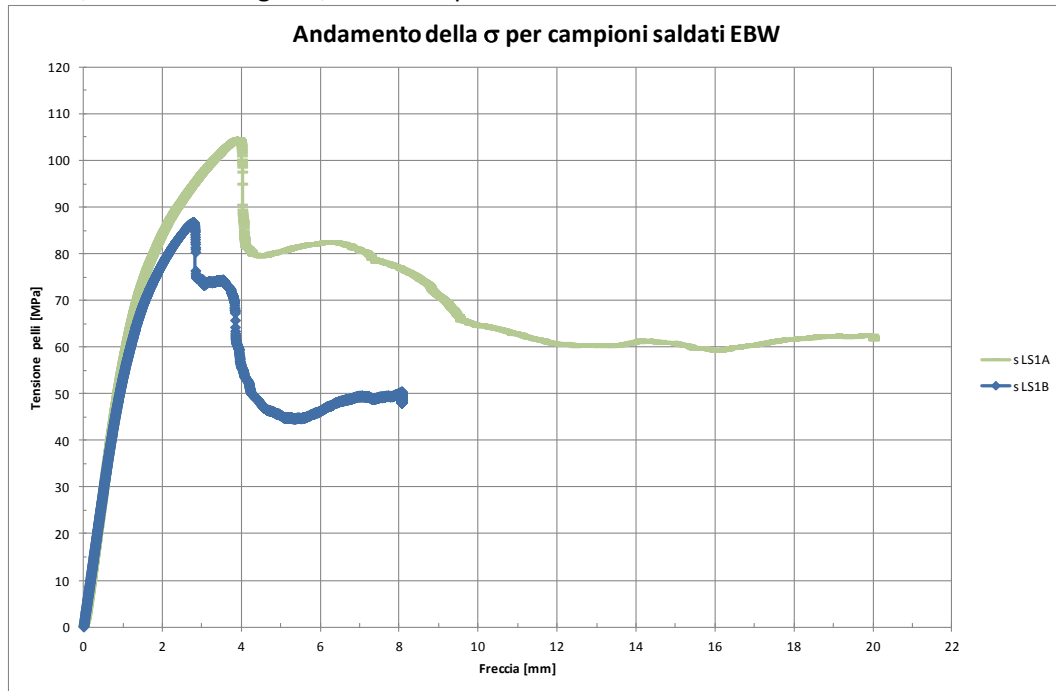


Figura 27: Tensione nelle pelli rispetto alla freccia del campione LS1 saldato al F.E.

La rottura è avvenuta per entrambi i provini nel core del materiale base sullo stesso lato (Tabella 2), la differenza nel valore massimo può essere giustificata osservando la RX riportata per migliore chiarezza nella figura successiva.

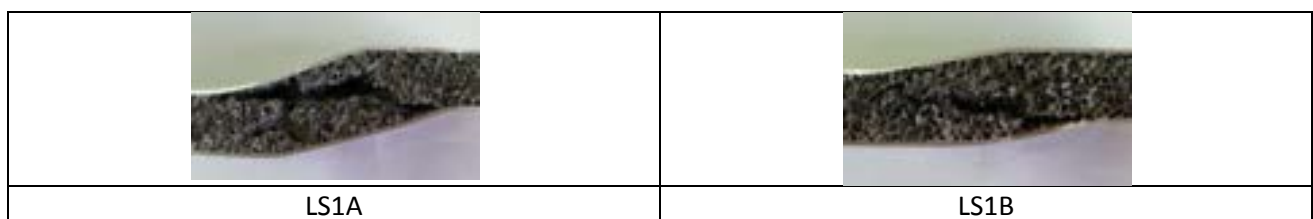


Tabella 2: vista della frattura nei campioni flessionali LS1A/B

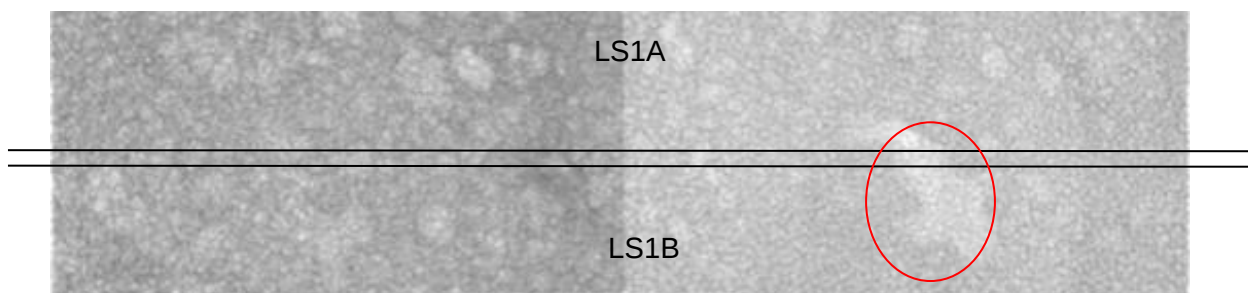


Figura 28: Radiografia digitale del campione LS1 da cui si sono ricavati i provini LS1A e LS1B

Come è facile osservare sono stati accoppiati due campioni solo apparentemente uguali. Il campione di destra presenta una densità certamente inferiore a quello di sinistra (la radiografia digitale infatti mostra i colori chiari come più vuoti a differenza delle tradizionali lastre radiografiche). Inoltre, è evidenziato nell'ovale in rosso una zona singolare in cui la densità è ancora più ridotta, tale zona dopo la suddivisione del campione ricade per la maggior parte nel provino LS1B che ha infatti mostrato una minore resistenza. C'è da evidenziare come tuttavia la resistenza raggiunta sia in linea con i valori medi di 83,6 MPa mostrati dai campioni tal quali.

I campioni saldati con inserto sono stati realizzati sia con direzione di saldatura perpendicolare al verso di laminazione (ILSL) sia con direzione di saldatura parallelo al verso di laminazione (ILS).

Anche in questo caso per entrambi i provini abbiamo ottenuto la rottura nel core del materiale base.

Per il campione ILSL si ha un risultato sostanzialmente uguale con una resistenza massima che supera per entrambi i provini i 140 MPa e quindi superiore anche a quanto mostrato nel materiale base. Anche in questo caso la rottura è avvenuta sullo stesso lato.

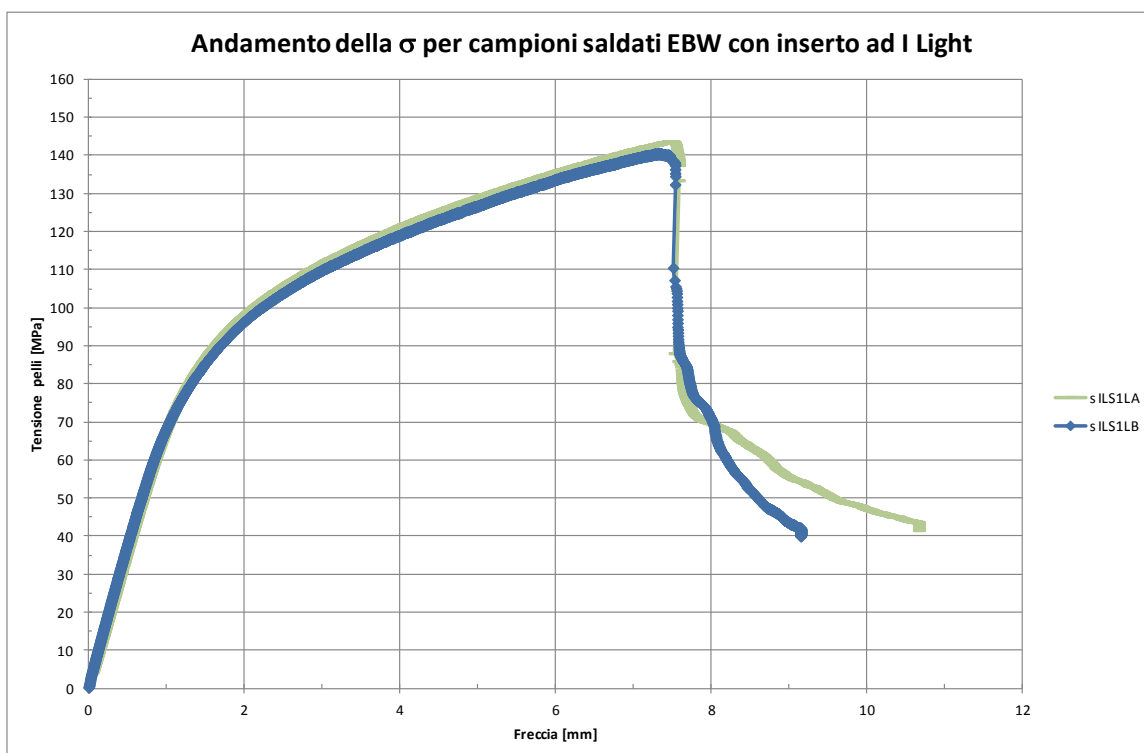


Figura 29: Tensione nelle pelli rispetto alla freccia del campione ILS1L saldato al F.E.

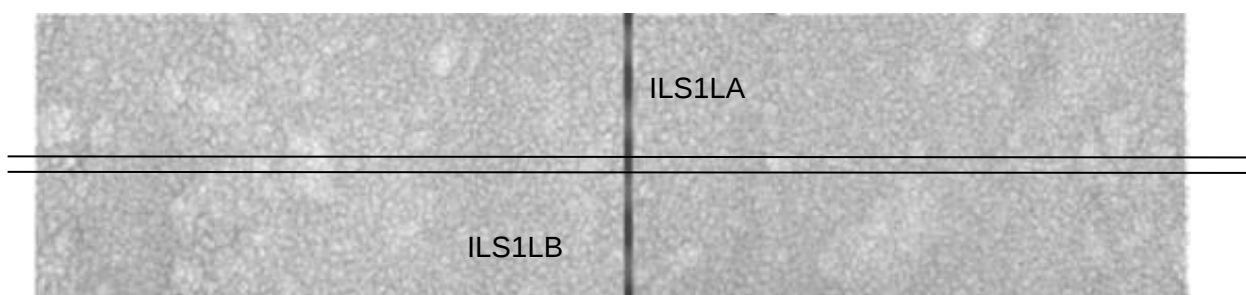


Figura 30: Radiografia digitale del campione ILS1L da cui si sono ricavati i provini ILS1LA e ILS1LB

La radiografia mostra come in questo caso vi sia una sostanziale omogeneità della densità dei due campioni saldati anche una volta suddiviso nei due provini A e B. La rottura dallo stesso lato si può giustificare dalla lieve riduzione di densità evidente sul lato sinistro.

Il campione ILS saldato con inserto ad I, in cui la direzione di saldatura è parallela a quella di laminazione del pannello, mostra la rottura sempre nel materiale base ma questa volta esiste una notevole differenza fra il provino del lato A e quello del lato B ed il livello di sollecitazione massimo raggiunto è praticamente pari alla metà rispetto ai valori ottenuti con i campioni in cui la direzione di saldatura è ortogonale alla laminazione.

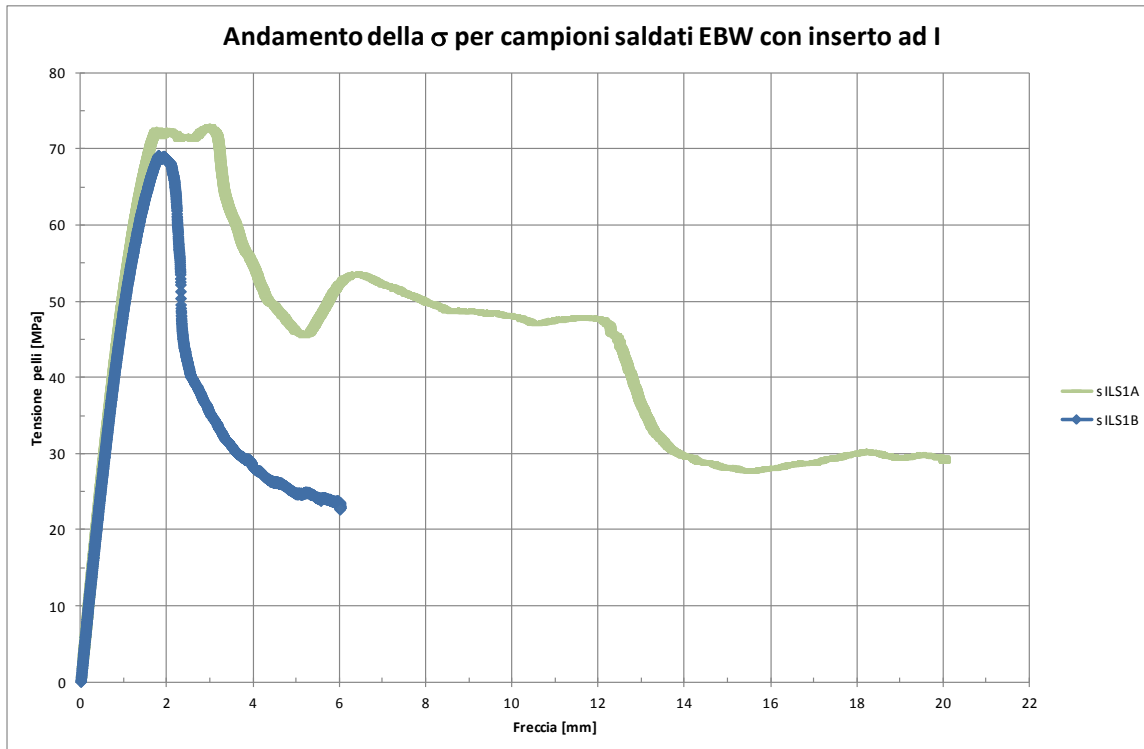


Figura 31: Tensione nelle pelli rispetto alla freccia del campione ILS1 saldato al F.E.

Anche in questo caso la rottura è avvenuta sulla stessa porzione di pannello. La giustificazione è sempre legata all'analisi radiografica che mette in luce come una delle porzioni di pannello utilizzate per realizzare i campioni di saldatura (Figura 32) abbia, nonostante una buonissima omogeneità nella distribuzione delle celle (lato sinistro), una densità media inferiore rispetto al lato destro.

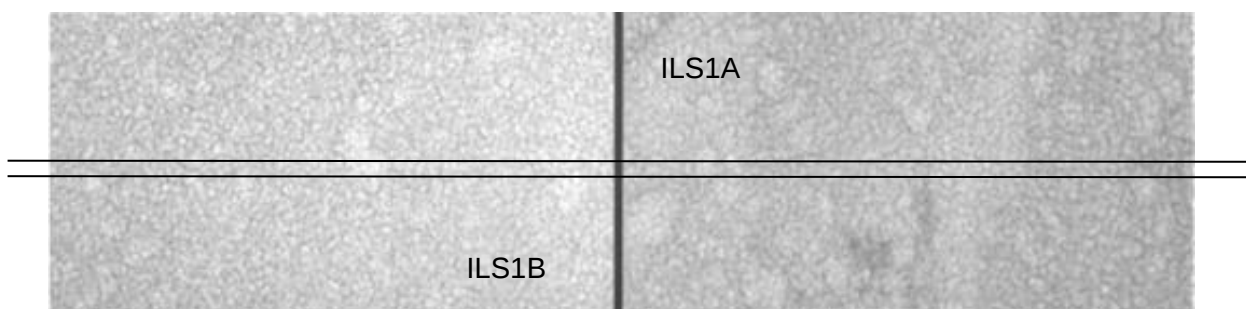


Figura 32: Radiografia digitale del campione ILS1 da cui si sono ricavati i provini ILS1A e ILS1B

Da un confronto con gli altri campioni radiografati si osserva come anche i bassi valori di resistenza possono essere giustificati dalla ridotta densità del core.

In fine il campione saldato con inserto quadro in AA 6060 T6, con direzione di saldatura ortogonale al verso di laminazione, è l'unico che ha mostrato un cedimento del giunto, anche se per valori estremamente elevati di carico: "superiori a 140 MPa", come si può vedere dal grafico di Figura 33.

La rottura del giunto saldato è da attribuire sia ad una elevata prestazione del *core* del campione, sia ad un effetto di softening che la saldatura fra AA6082 T4 e AA6060 T6 mostra in ZF e in ZTA, evidenziato anche dalle prove di micro durezza.

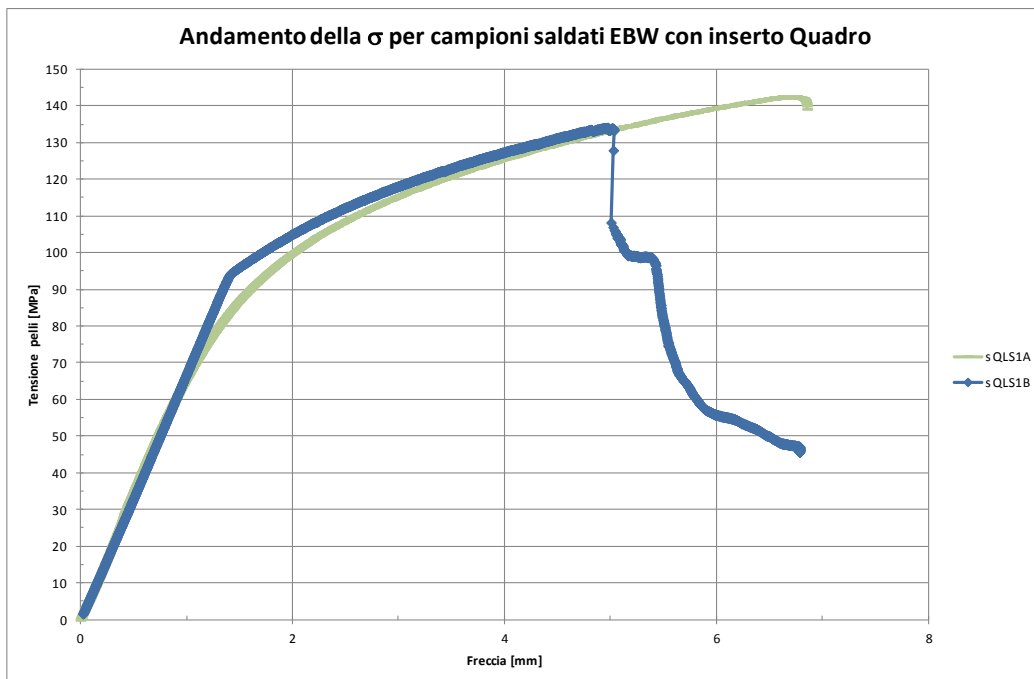


Figura 33: Tensione nelle pelli rispetto alla freccia del campione QLS1 saldato al F.E.

La rottura si è localizzata sulla ZTA adiacente la pelle dell'AFS. La curva QLS1A è interrotta bruscamente a causa del cedimento della saldatura che tuttavia avviene a valori superiori a 140 MPa. La normativa [UNI ENV 1999-1-1] prevede di considerare per questo giunto una resistenza ultima pari a 110,5 MPa (estruso in lega AA6060, stato T6, fattore di addolcimento 0,65 con tecnica MIG) e pertanto la prestazione del giunto realizzato risulta più che adeguata.

La singolarità, del provino QLS1B, di un tratto lineare netto superiore al consueto, mostrato chiaramente dal grafico di Figura 33, è legato ad un incrudimento subito dalle pelli a causa di un precarico accidentale indotto prima della reale prova di flessione.

Anche in questo caso la giustificazione alle eccezionali performance raggiunte dal campione viene dall'analisi radiografica del campione che mostra un colore mediamente più scuro e quindi una maggiore densità della schiuma rispetto agli altri campioni analizzati ed una omogeneità di distribuzione ottimale delle bolle.

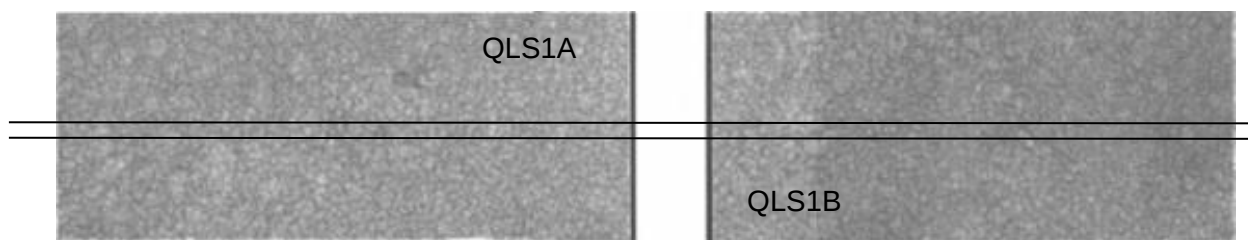


Figura 34: Radiografia digitale del campione QLS1 da cui si sono ricavati i provini QLS1A e QLS1B

Conclusioni sulla saldatura a fascio Elettronico

Si può concludere che la tecnologia al fascio elettronico permette di definire degli ottimi cordoni di saldatura, sia dal punto di vista metallurgico (assenza di macroporosità e cricche) che di resistenza meccanica. Infatti, come si può vedere nella Figura 35 (indicato dalla freccia rossa), che l'elemento debole, nelle prove statiche di flessione a quattro punti (4 PBT), risulta il *core*. Infatti come per la maggior parte dei casi il cedimento avviene proprio nella schiuma, in corrispondenza della regione del campione in cui si ha solo la sollecitazione di taglio (tra punzone e coltello). Nell'unico caso in cui si ha la rottura del giunto, possiamo comunque affermare che il livello di sollecitazione raggiunto (140 MPa) è superiore alla resistenza ultima di progetto indicata nell'Eurocodice 9 [26]

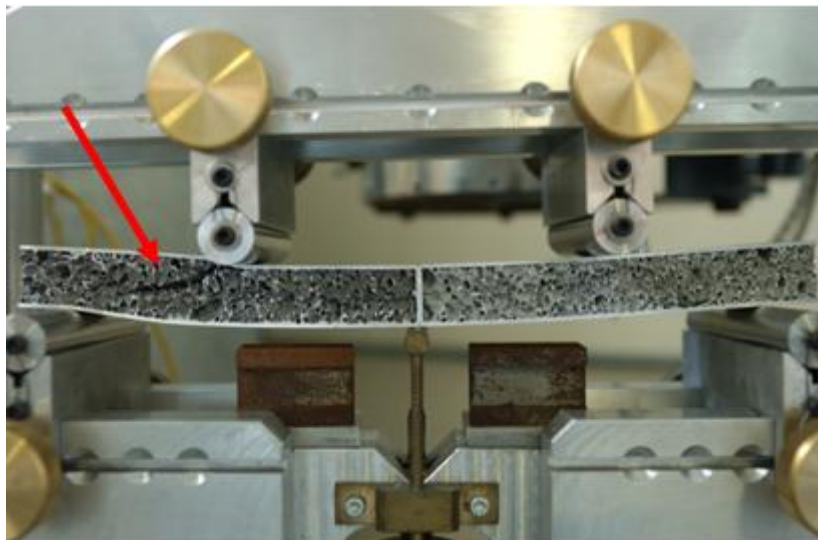


Figura 35: Esempio di rottura durante una prova di flessione 4 PBT (ILS1LA)

Allo stesso tempo si è verificata una grande variabilità dei risultati in termini di resistenza dovuta a diverse cause:

- la direzione di saldatura rispetto al verso di laminazione dei pannelli AFS

la densità e la distribuzione dei pori più o meno omogenea delle porzioni di pannelli AFS accoppiati per realizzare i campioni di saldatura.

Possiamo quindi considerare la saldatura al fascio elettronico dei pannelli AFS un benchmark di riferimento, in particolare utilizzando velocità di saldatura di 1,5 m/min, si hanno caratteristiche geometriche della forma migliori (come definito dalla norma UNI EN ISO 13919).

La resistenza del giunto

L'accoppiamento con profilati estrusi migliora le caratteristiche della saldatura se gli inserti sono in lega della serie 5xxx, eliminando l'effetto indesiderato di softening della ZF caratteristico delle leghe della serie 6xxx.

Permangono i problemi legati alla micro porosità persistente in ZF. Questo fattore è di difficile controllo a causa dei residui di agente schiumate presente all'interfaccia core-pelle che in qualche modo in piena penetrazione vengono disciolti nel bagno fuso.

Correlazione fra prove meccaniche ed analisi RX per i campioni saldati Laser-TIG

Dal campione saldato con tecnologia ibrida laser TIG sono stati ricavati due provini (LT1A e LT1B) per le prove di flessione.

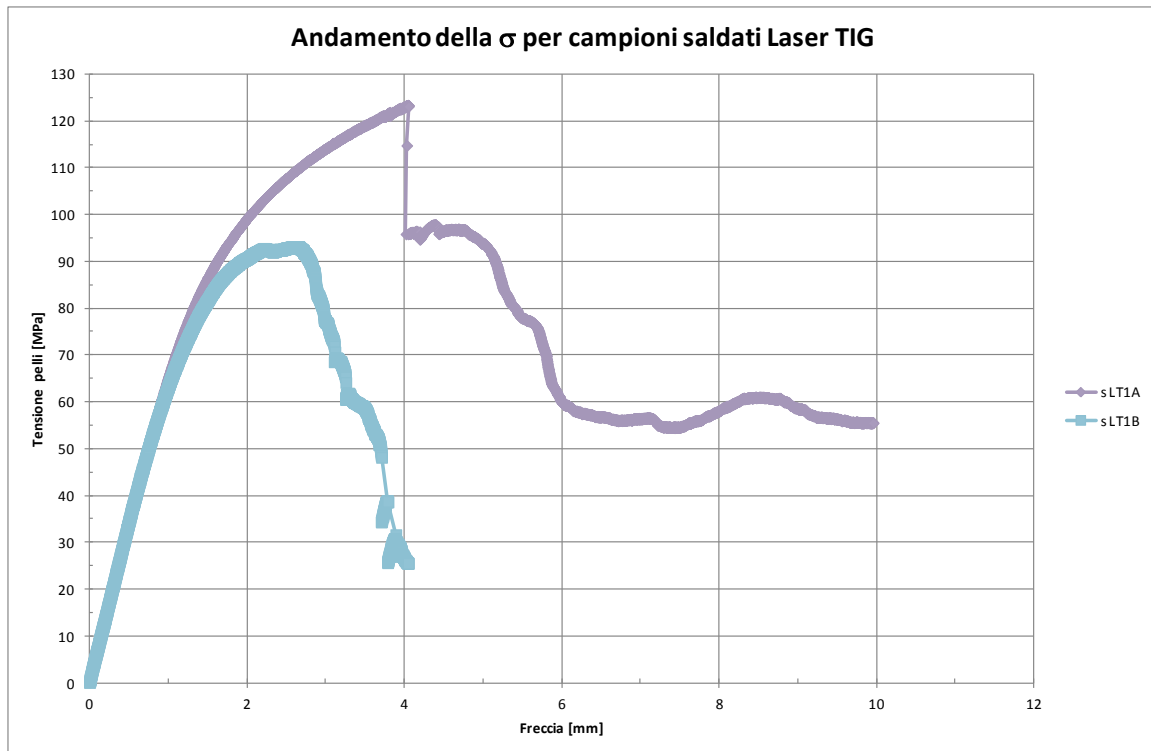


Figura 36: Grafici delle prove di flessione a 4 punti su campioni saldati Laser TIG.

I risultati dei test di flessione sono riportati nella Figura 36 e mostrano andamenti differenti legati al fatto che mentre il provino LT1A mostra la rottura nel *core* del materiale base, nel provino LT1B il cedimento avviene per criccatura della saldatura.

Il cedimento del cordone di saldatura è dovuto alla presenza di un maggiore gap pre welding che comporta una riduzione locale della sezione resistente, evidente anche dall'analisi radiografica (Figura 37).

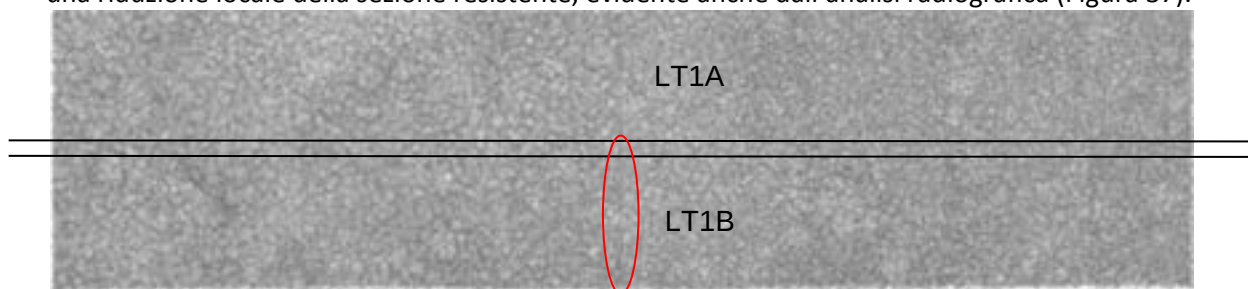


Figura 37: Radiografia del campione saldato Laser TIG

Conclusioni sulla saldatura a fascio Laser

La saldatura laser risulta più difficoltosa a causa di una forte riflettività della lega di alluminio AA 6082 di cui sono composte le pelli. La saldatura laser può essere realizzata solo se si dispone di sorgenti di potenza ≥ 2 kW. Tuttavia, la saldatura laser delle leghe di alluminio e quindi anche delle pelli degli AFS può essere migliorata attraverso l'accoppiamento sinergico della sorgente laser alla sorgente ad arco. Infatti, la saldatura laser, accoppiata a sorgente ad arcopulsata, permette due effetti positivi contemporanei:

- elimina lo strato di allumina;
- migliora l'accoppiamento ottico laser materia grazie al preriscaldamento fornito dalla sorgente ad arco.

È stato verificato come l'accoppiamento della sorgente TIG con quella laser permette di incrementare del 50% la velocità di processo e allo stesso tempo di migliorare l'aspetto superficiale (TIG dressing) a scapito però, di un maggiore apporto termico che induce un aumento della larghezza della ZF e della ZTA.

Inoltre possono essere ottenuti altri vantaggi, in termini di metallurgia della giunzione e di "gap bridging", con l'impiego di filo d'apporto in accoppiamento alla tecnica laser + TIG. Infatti con velocità del filo d'apporto comprese tra 3 e 4 m/min e una velocità di saldatura di 3 m/min è possibile compensare gap da 0,3 a 0,5 mm rispettando i livelli qualitativi della norma UNI EN 13919-2 level C.

Possiamo affermare quindi che la saldatura laser + TIG + filo si candida a livello industriale come la tecnologia regina in termini di elevata qualità e produttività nella saldatura di pannelli AFS.

Schearografia

La shearografia è una tecnica di controllo basata sull'olografia. L'olografia è un metodo che implica la registrazione di un fronte ottico comprendente contemporaneamente sia i dati di ampiezza che di fase della luce riflessa dall'oggetto in esame. La registrazione dei dati è chiamata "ologramma" e deriva dal termine greco holos (corpo). La shearografia è un metodo ottico che rende possibile la rivelazione di eventuali deformazioni della superficie dell'oggetto in esame in relazione al carico della struttura; in effetti questo metodo è riconducibile alla interferometria olografica.

Il carico può essere indotto a mezzo di calore, pressione o vibrazione. Gli eventuali difetti vengono evidenziati per differenza di deformazione rispetto alle zone circostanti non difettate.

Nell'ambito dei controlli non distruttivi viene impiegata una sorgente laser, luce monocromatica, che produce un fronte sferico per illuminare la superficie da ispezionare; il risultato per una superficie piana, in assenza di deformazioni o difetti, è un interferogramma che mostra una serie di anelli concentrici bianchi e neri, vedi Figura 38: gli anelli neri rappresentano la differenza in fase di $\frac{1}{2}$ lunghezza d'onda tra i due fronti interferenti, e le zone chiare la differenza in fase di un numero integrale della lunghezza d'onda.

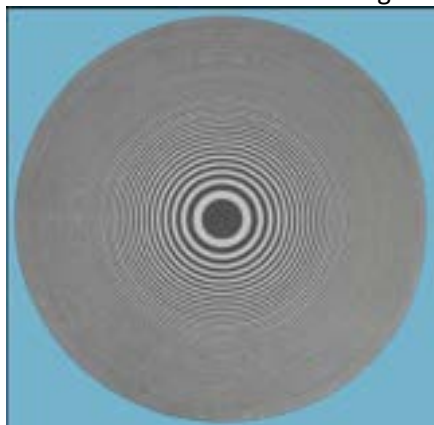


Figura 38:

Il sistema shearografico, vedi Figura 39, è composto da:

- laser per l'ispezione del componente
- interferometro (shearing interferometer) avente il compito di visualizzare l'interferenza dovuta alla collimazione di due fasci non coincidenti
- computer per il processamento, l'archiviazione dei dati, controllo del sistema.



Figura 39

Su alcuni componenti di Pannelli AFS sono state realizzate delle prove preliminari di verifica dell'efficacia del metodo di controllo sintetizzate nelle immagini seguenti che effettivamente permettono di individuare i difetti paralleli alle pelli.

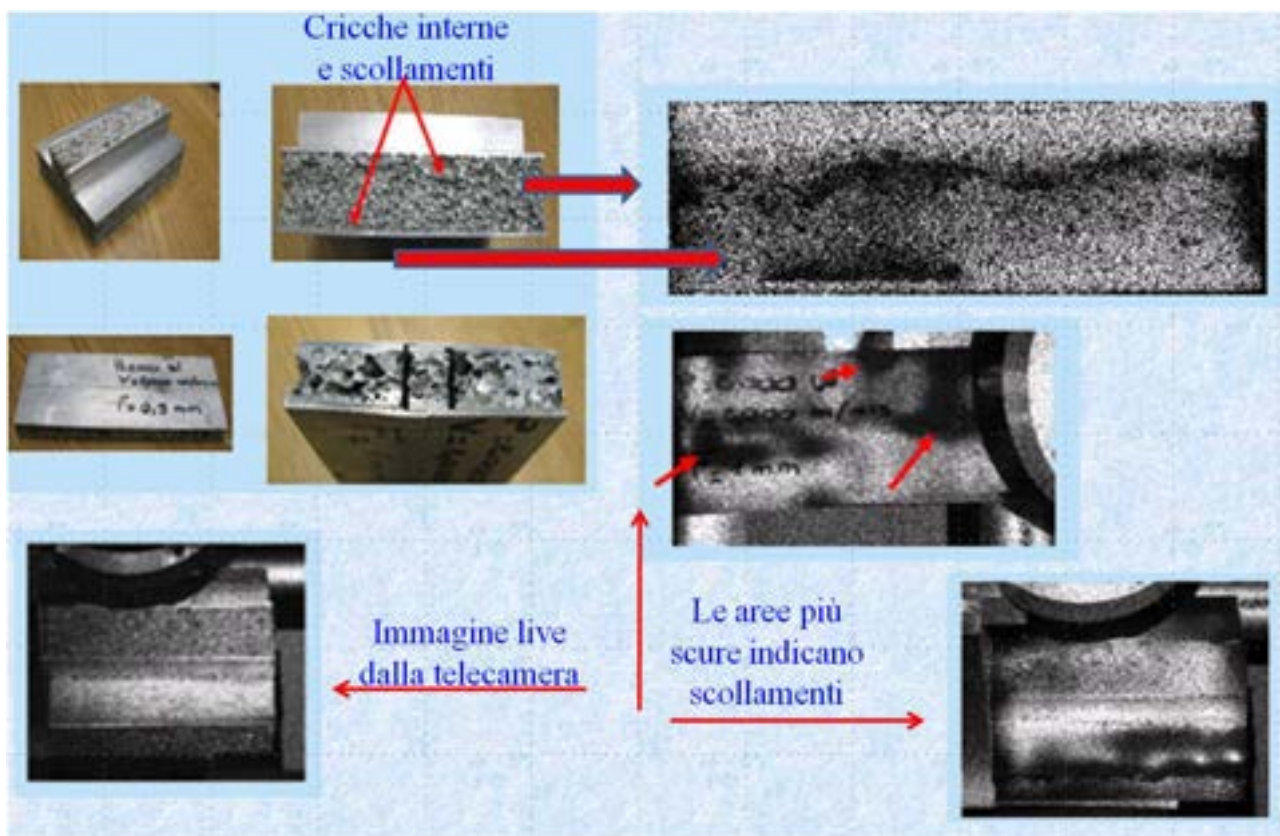


Figura 40: Esempi di test shearografici su AFS

I risultati esposti sono assolutamente preliminari e frutto di poche prove effettuate in fiere AIPND grazie alla cortesia del Direttore Tecnico dell'Associazione Italiana Prove non Distruttive Claudio Cappabianca. Tuttavia, questa nuova tecnica, usualmente impiegata nel controllo di materiali compositi, potrebbe essere ulteriormente investigata in attività future per il controllo degli AFS.

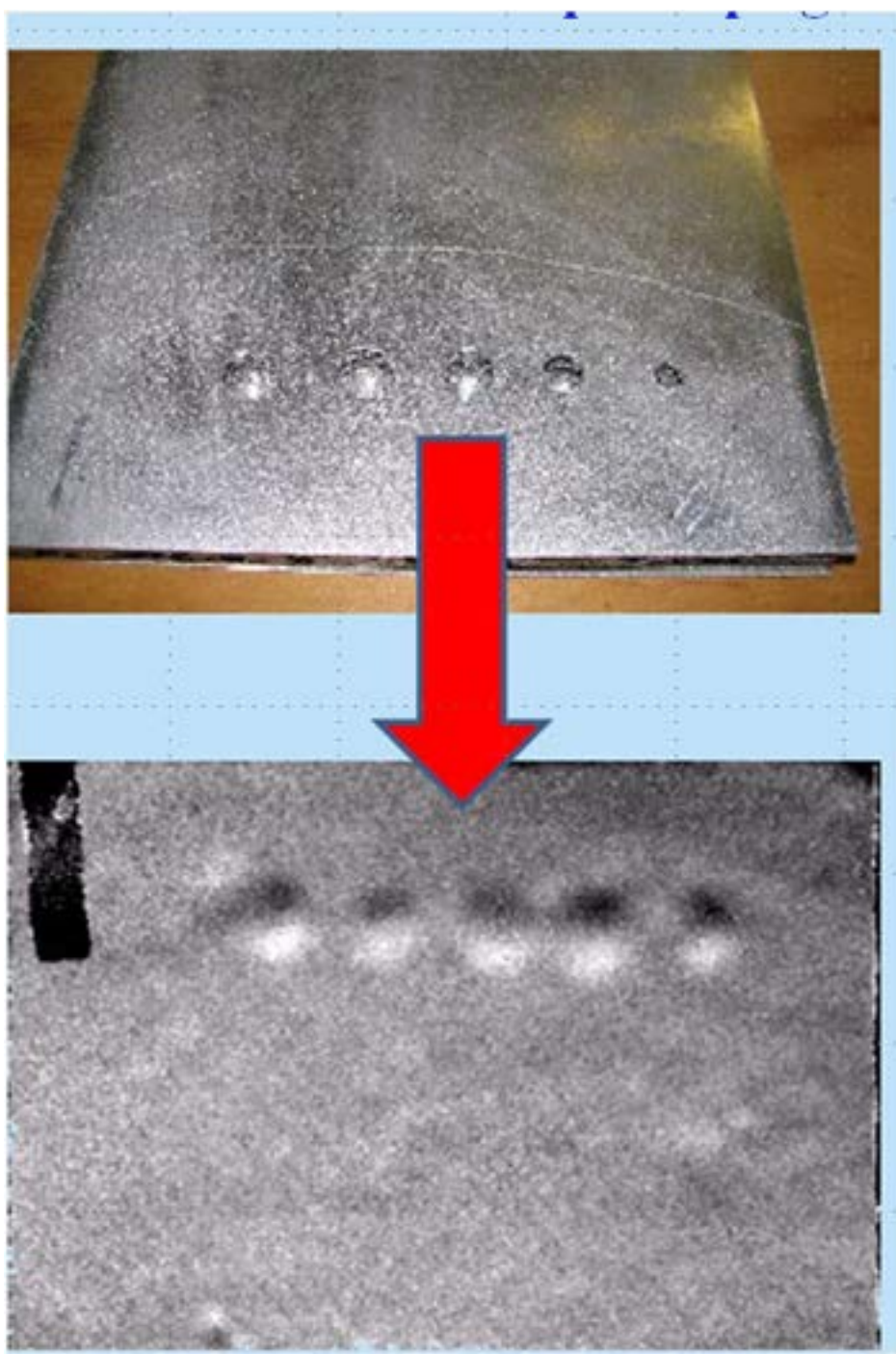


Figura 41: In alto il campione preparato con delle forature non passanti di diametro da 7 a 13 mm; sotto l'immagine shearografica ottenuta osservando il campione dalla pelle opposta. L'immagine shearografica mostra ulteriori difetti interni per i quali è necessario calibrare il processo per poterne discriminare forma e dimensione.

Conclusioni

Questo lavoro ha permesso di trovare una certa correlazione tra i risultati degli esami non distruttivi (con tecnica ultrasonora e radiografica) e i risultati delle prove meccaniche distruttive (flessione e compressione): l'elemento debole di tali pannelli, almeno in prove statiche, risulta essere il core del pannello in schiuma di alluminio.

In particolare le prove meccaniche di flessione hanno mostrato come la rottura è avvenuta nel *core* che cede a taglio, nella maggior parte dei casi, in corrispondenza di "difetti" intesi come zone di coalescenza di bolle e bande di collasso delle stesse nelle aree in cui tale schiuma risulta avere minor densità.

Per quanto riguarda, invece, l'analisi delle curve di compressione si evince che tutti i campioni, eccetto quello 03_3(t), risultano avere lo stesso comportamento, il campione 03_3(t) infatti offre una maggiore resistenza in quanto risulta avere una maggiore densità (evidenziata sia dalla radiografia di Figura 20, che dal grafico di Figura 23).

Possiamo inoltre affermare che gli esami radiografici sembrano quelli che meglio mettono in evidenza uno dei limiti dei pannelli AFS, ossia una distribuzione molto disomogenea dei pori e della loro dimensione a dimostrazione che l'aspetto più critico e che deve essere ancora migliorato, è il controllo di tutti i parametri che entrano in gioco durante il processo di schiumatura del *core* (temperatura del forno [20], tempo di permanenza [28], velocità di raffreddamento, tipo di agente schiumante [21], metodo di raffreddamento, ecc. [24]). Il limite della tecnica radiografica è che non si riescono ad evidenziare difetti piani ortogonali alla direzione del fascio dei raggi X (per es. scollature delle pelli).

Una tecnica migliore ma certamente meno convenzionale per il controllo NDT di pannelli AFS è la Shearografia.

Bibliografia

- [1] A. Tati and M. Mongelli, "Software di mappatura ultrasonora per componenti aeronautici," in *AIPND*, 2009.
- [2] A. Tati, "NON DESTRUCTIVE TESTS (X-RAY) ON THE PERMEATION MEMBRANE REACTOR IN STEEL ALLOY," 2011.
- [3] T.M. McCormack, R. Miller, O. Kesler, and L.J. Gibson, "Failure of sandwich beams with metallic foam cores," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 38, p. 4901, 2001.
- [4] A.-M. Harte, N.A. Fleck, and M.F. Ashby, "Sandwich panel design using aluminum alloy foam," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, no. 4, p. 219, 2000.
- [5] J. Vogel et al., "Characterisation of strength behaviour of aluminium foam sandwiches under static load," vol. 47, 2011.
- [6] H.G. Allen, *Analysis and design of structural sandwich panels*. Oxford: Pergamon Press, 1969.
- [7] L. J. Gibson, "Mechanical behavior of metallic foam," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 191, 2000.
- [8] G.C. Barozzi, *Introduzione agli algoritmi dell'algebra lineare*. Bologna: Zanichelli, 1989.
- [9] H.D. Young, *Elaborazione statistica dei dati sperimentali*. Roma: Veschi, 1965.
- [10] E.W. Kuenzi, "Flexure of structural sandwich construction," Forest Product Laboratory, report n. 1829, 1951.
- [11] M.F. Ashby et al., *Metal Foams: A Design Guide.*: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [12] K.Y.G. McCullogh, N.A. Fleck, and M.F. Ashby, "Uniaxial stress-strain behavior of aluminium alloy foams," *Acta Mater.*, vol. 47, p. 2323, 1999.
- [13] C.M. Cady, G.T. Gray, C. Liu, M.L. Lovato, and T. Mukai, "Compressive properties of a closed - cell aluminum foam as a function of strain rate and temperature," *Mat. Sci. Eng. A*, vol. 525, pp. 1-6, 2009.
- [14] B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20.
- [15] C. Eberl, Digital Image Correlation and Tracking, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12413-digital-image-correlation-and-tracking>.
- [16] C. Chen, A.-M. Harte, and N.A. Fleck, "The plastic collapse of sandwich beams with a metallic foam core," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, p. 1483, 2000.
- [17] O. Belluzzi, *Scienza delle costruzioni vol. 1*. Bologna: Zanichelli.
- [18] M. Styles, P. Compston, and S. Kalyanasundaram, "The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 80, p. 532, 2007.
- [19] M. Mukherjee, F. Garcia, Moreno, and J. Banhart, "Defect generation during solidification of aluminium Foam ," *Scripta Materials*, vol. 63, pp. 235-238, 2010.
- [20] F. Garcia-Moreno, N. Babcsan, and J. Banhart, "X-Ray Radioscopy of Liquid Metal Foams: Influence of Heating Profile, Atmosphere and Pressure," *Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 263, pp. 290-294, 2005.
- [21] B. Matijasevic-Lux, Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making Improved Metal Foams, 2006, Institut für Werkstoffwissenschaften und technologien, Dissertation.
- [22] M. Haesche, D. Lehmhus, J. Weise, M. Wichmann, and I. C. M. Mocellin, "Carbonates as Foming Agent in Chip - Based Aluminium Foam Precursor," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 9, pp. 845-850, 2010.
- [23] S. Asavavisithchai and A. Opa, "Effect of TiC Particels on Foamability and Compressive Properties of Alluminium Foam," *Chiang Mai J. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 213-221, 2010.
- [24] R. Neugebauer et al., "Proc. of the International Conference on Cellular Material," , Dresden, 2010, p. 3.
- [25] D. Lehmhus and J. Banhart, "properties of Het - Trated aluminium Foams," *Mater. Sci. Eng.*, vol. A349,

pp. 98-110, 2003.

- [26] UNI EN 1999-1-1:2007 - eurocodice 9 - progettazione delle strutture di alluminio - parte 1-1, regole strutturali generali, 2007.
- [27] J.Gilbert Kaufman, *Introduction to Aluminum alloys and tempers.*: ASM International, 2000.
- [28] I. Duarte and J. Banhart, "A Study of aluminium foam formation - kinetics and microstructure," *Acta mater*, vol. 48, pp. 2349-2362, 2000.