

VALUTAZIONE DEL DANNO DA IMPATTO IN PANNELLI SANDWICH CON LA TECNICA TERMOGRAFICA

Chiara Colombo^a, Laura Vergani^a

^a Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica,
Via La Masa 1, 20156, e-mail: chiara.colombo@polimi.it, laura.vergani@polimi.it

Sommario

Oggetto di questo studio sono dei pannelli sandwich per applicazioni automobilistiche, costituiti da pelli esterne in acciaio separate da poliolefina. Lo scopo del lavoro è lo studio del loro comportamento quando sono soggetti a impatti a bassa velocità. In particolare, si vogliono valutare le modalità e l'entità del danneggiamento subito, al variare della geometria e delle caratteristiche meccaniche dei componenti dei sandwich.

Il lavoro è distinto in una parte sperimentale e in una numerica. Quella sperimentale consiste nella valutazione del danneggiamento, tramite la tecnica termografica, dei pannelli sottoposti a impatto.

La seconda parte, numerica, sviluppa dei modelli a elementi finiti che simulano i pannelli durante la fase di impatto e le successive prove di trazione. Questi modelli numerici permettono di determinare parametri direttamente confrontabili con le grandezze termografiche.

Abstract

Object of this study is a sandwich material for automotive applications, made of two steel skins and a polyolefin core. Aim of the work is to understand the sandwich behaviour, when damaged by low velocity impacts. In particular, the study focusses the attention on the damage quantification, varying the geometry and the mechanical characteristics of the sandwich components.

The work is made of an experimental and a numerical part. The experimental part analyses the thermographic behaviour of impacted and tensile loaded specimens.

The second numerical part develops FE models of the impact and of the tensile test, in parallel to the experimental one. These models allow evaluating parameters directly comparable with the thermographic measurements.

Parole chiave: Materiali sandwich; impatto a bassa velocità; termografia; danneggiamento.

1. INTRODUZIONE

I pannelli sandwich sono costituiti da due o più strati di materiali caratterizzati da diverse caratteristiche fisiche e meccaniche. Nella configurazione più diffusa ci sono due strati esterni in acciaio o in lega d'alluminio e uno interno in polimero o in polimero rinforzato con fibre.

Le loro caratteristiche principali sono la leggerezza abbinata alla rigidità e resistenza, la facilità di lavorazione e una buona capacità di smorzamento [1, 2, 3]. Inoltre si prestano facilmente ad essere adattati a specifiche applicazioni, variandone gli spessori e i materiali. Sono principalmente utilizzati in campo automobilistico, aerospaziale e marino.

In letteratura si trovano diversi lavori che trattano le problematiche legate ai pannelli sandwich.

In [4] sono considerati dei pannelli costituiti da due strati di acciaio austenitico (316L) e un *core* di poliolefina (PP/PE), che è una miscela di polipropilene (PP) e polietilene (PE), ed è stato studiato

l'effetto della geometria e delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio sulla deformabilità dei pannelli.

Altri lavori considerano le applicazioni specifiche dei pannelli sandwich in campo automobilistico, per le quali la deformabilità è una caratteristica molto importante che diventa determinante quando si considera il punto di vista costruttivo/realizzativo [5]. Un altro aspetto per il quale la deformabilità è fondamentale è quando si considera la risposta del materiale ad eventuali urti o impatti [6], come ad esempio quelli molto frequenti dovuti a piccoli oggetti come sassi e pietre.

In questi casi è importante riuscire a valutare l'eventuale degrado del materiale. Alcuni lavori hanno valutato la capacità di assorbimento urti dei pannelli sandwich variando il materiale polimerico [7-9], altri hanno considerato pannelli costituiti da uno strato di acciaio e uno di polimero posizionato nella parte opposta all'impatto [10-12]. Da questi lavori è evidente che uno strato da 1 mm di polimero è in grado di assorbire parte dell'energia di impatto e di evitare la rottura del pannello.

In [13] si considerano ancora pannelli costituiti da due strati di materiale (alluminio e poliurea PU) e si mette in evidenza l'effetto dello spessore dello strato polimerico, che è fatto variare fino a 12 mm, quando i pannelli sono soggetti ad impatti ad alta e bassa velocità [14]. In [15] sono considerati pannelli multi strato (acciaio-poliurea-acciaio) e sono analizzate le caratteristiche dissipative anche con modelli numerici a elementi finiti.

In questo lavoro i pannelli sandwich considerati sono simmetrici a tre strati (acciaio-polimero-acciaio), come si vede in Figura 1, e si è voluto studiarne il comportamento quando sottoposti ad impatti a bassa velocità, al variare delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei diversi strati.

In particolare, per analizzarne e quantificarne il danneggiamento, i pannelli, dopo essere stati soggetti ad impatti, sono stati sottoposti a prove di trazione ed analisi termografiche.

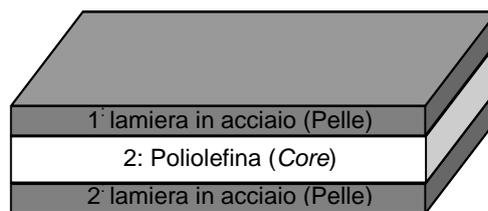


Figura 1: Schema del sandwich.

Lo scopo è quello di trovare un parametro che ci permetta di valutare e quantificare l'entità del danno del pannello, per decidere gli interventi (ad esempio se è necessaria la sostituzione) da effettuare.

Con le prove di trazione si vogliono, infatti, determinare dei valori di resistenza residua da confrontare con quelli dei pannelli integri e con la termografia si vuole verificare se è possibile ottenere informazioni aggiuntive sullo stato di danneggiamento dei pannelli.

La termografia ad infrarossi è una tecnica sperimentale non distruttiva, basata sul concetto della misura della temperatura superficiale senza contatto durante l'applicazione di un carico termico o meccanico a un componente strutturale. In letteratura questa tecnica è stata utilizzata con successo per applicazioni diverse.

Dapprima utilizzata su materiali omogenei [16], acciai, più recentemente è stata applicata anche a materiali compositi [17, 18], per cercare una correlazione tra la risposta termica del materiale sottoposto a carichi meccanici, statici o variabili, e la definizione di un parametro di danneggiamento.

In particolare, è stata verificata l'abilità della tecnica termografica di evidenziare il danneggiamento del materiale in una fase molto iniziale, in corrispondenza della fine del comportamento termoelastico, quando i valori determinati sperimentalmente nella prova di trazione non denunciano ancora uno scostamento dalla linearità.

Se si misura la temperatura di un provino, durante una prova di trazione, si evidenzia, infatti, che lo sforzo, σ_D , che si trova in corrispondenza del termine del tratto di comportamento termoelastico, rappresenta il primo scostamento dalla linearità indice di un danneggiamento iniziale e localizzato, interpretato da alcuni autori [19] come il limite di fatica del materiale.

In questo lavoro la tecnica termografica è stata applicata per la prima volta a dei pannelli sandwich e si è visto che è possibile definire, anche per questa applicazione, un sforzo di inizio danneggiamento, σ_D ,

che può essere utilizzato come un parametro oggettivo per la valutazione della resistenza residua del pannello stesso.

Le analisi sperimentali sono state affiancate da una simulazione numerica, eseguita con un programma ad elementi finiti, con lo scopo di riprodurre le prove sperimentali ed, in particolare, l'analisi termografica.

Il confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali è risultato soddisfacente.

2. I PANNELLI SANDWICH

Sono stati considerati dei pannelli sandwich formati da tre strati: due lamiere esterne in acciaio, ed un *core* in poliolefina, una miscela di polipropilene e polietilene. Questi pannelli sono stati realizzati presso la Technical University of Clausthal, secondo la procedura descritta in [20].

Sono stati analizzati diversi pannelli, variando sia lo spessore sia il tipo di acciaio per verificare l'effetto combinato di geometria e caratteristiche del materiale. In Tabella 1 sono riportati i 4 tipi di pannelli considerati.

La Figura 2.a riporta i risultati delle prove statiche di trazione eseguite su provini costruiti con gli acciai delle lamiere.

Tabella 1: Identificazione dei pannelli sandwich. Designazione degli acciai secondo norma EN 10027-1.

Pannello	Acciaio	Spessore acciaio	Spessore poliolefina	Spessore totale
		[mm]	[mm]	[mm]
A	TS245	0.49	0.6	1.58
B	TH620	0.135	0.6	0.87
C	TS245	0.24	0.6	1.08
D	TS245	0.24	0.3	0.78

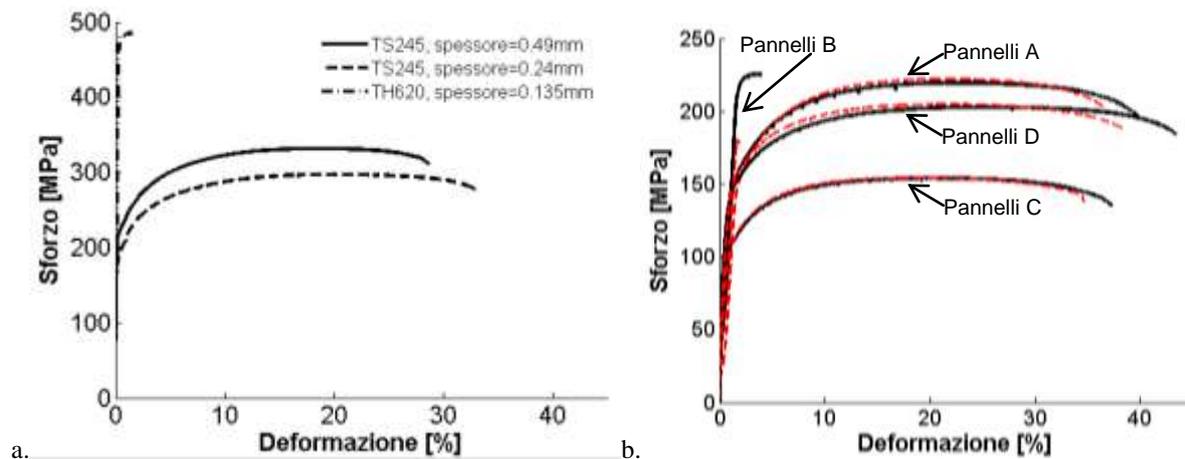


Figura 2: Risultati delle prove sperimentali di trazione statica (a.) sulle lamiere e (b.) sui sandwich.

La linea continua nera rappresenta i provini integri, la linea tratteggiata rossa quelli impattati.

3. PROVE SPERIMENTALI

3.1 Impatto

I pannelli sandwich sono stati impattati con una massa in caduta libera, con un'energia cinetica media di impatto pari a 9.06 J. Questo valore è stato scelto in modo che i pannelli non venissero perforati. I valori di energia sono misurati durante le prove di impatto con un laser posizionato in prossimità del pannello da impattare e collegato con un sistema di acquisizione ad alta frequenza. La massa è di 0.6 kg con una punta in acciaio temprato di diametro 25.4 mm, in modo da localizzare il danneggiamento interamente nel materiale sandwich. I pannelli utilizzati sono rettangolari di dimensioni 60 x 60 mm² e incastrati sui contorni.

Sono stati effettuati 6 impatti per ogni tipo di pannello.

Al termine delle prove, sono state misurate le deflessioni residue dei pannelli impattati con un profilometro (Zeiss Prismo). I risultati di queste misure sono mostrati nella Tabella 3 del prossimo paragrafo, in parallelo a quelli ottenuti dalle simulazioni numeriche.

3.2 Trazioni statiche post-impatto

Per studiare il comportamento meccanico del materiale sandwich post-impatto e valutarne il danneggiamento indotto dall'impatto, si sono effettuate delle prove di trazione statica su dei provini di forma rettangolare ($45 \times 200 \text{ mm}^2$) ricavati dai pannelli impattati e non impattati. Le prove sono state condotte a una velocità pari a 5 mm/min (macchina di prova: MTS Alliance RT/150). Durante le prove, è stata monitorata la temperatura superficiale dei provini tramite una termocamera ad infrarossi (FLIR SC7000), posizionata a circa 300 mm dalla zona da inquadrare. I provini sono stati trattati con una vernice opaca nera per evitare variazioni del coefficiente di emissività delle superfici da analizzare. Durante la prova di trazione, il cedimento di tutti i provini si è verificato nella zona centrale; i provini impattati, in particolare, hanno mostrato un cedimento a partire dall'area danneggiata per l'impatto.

In Figura 2.b sono mostrati i risultati delle prove di trazione dal punto di vista puramente meccanico. Confrontando queste curve sforzo-deformazione dei pannelli sandwich con quelli di Figura 2.a, si può osservare come l'aggiunta dello strato di poliolefina rispetto alla singola lamiera porta ad un aumento delle deformazioni (maggiore formabilità del sandwich) a discapito delle sollecitazioni massime applicabili. Considerando inoltre i grafici di Figura 2.b, risulta che i pannelli danneggiati presentano delle deformazioni finali a rottura inferiori rispetto a quelle dei pannelli non impattati, e un valore dello sforzo massimo molto simile.

Il comportamento dei pannelli B si discosta dagli altri: essi sono costituiti da un acciaio più performante, ma che mostra anche un comportamento abbastanza fragile. Lo scostamento tra il massimo sforzo applicabile ai pannelli danneggiati rispetto a quelli integri è quindi maggiore. I provini impattati B, inoltre, hanno mostrato un comportamento lineare elastico fino a rottura: in questo caso, lo snervamento coincide con la sollecitazione massima.

In Figura 3 sono mostrate alcune elaborazioni di questi dati sperimentali. La Figura 3.a mostra l'andamento dei valori dello sforzo di snervamento, R_s , e massimo a rottura, R_m , adimensionalizzati rispetto alla R_m del materiale integro, per pannelli con stesso spessore di *core*. In tutti i casi tranne che per i pannelli B, si osserva come il valore di R_m non è influenzato dall'impatto, mentre il valore di snervamento, R_s , risente dell'effetto dello spessore, soprattutto se si riduce quello della lastra di acciaio. Inoltre, al diminuire di questo spessore, la differenza tra snervamento e rottura è meno marcata, identificando un comportamento più fragile dell'intero sandwich.

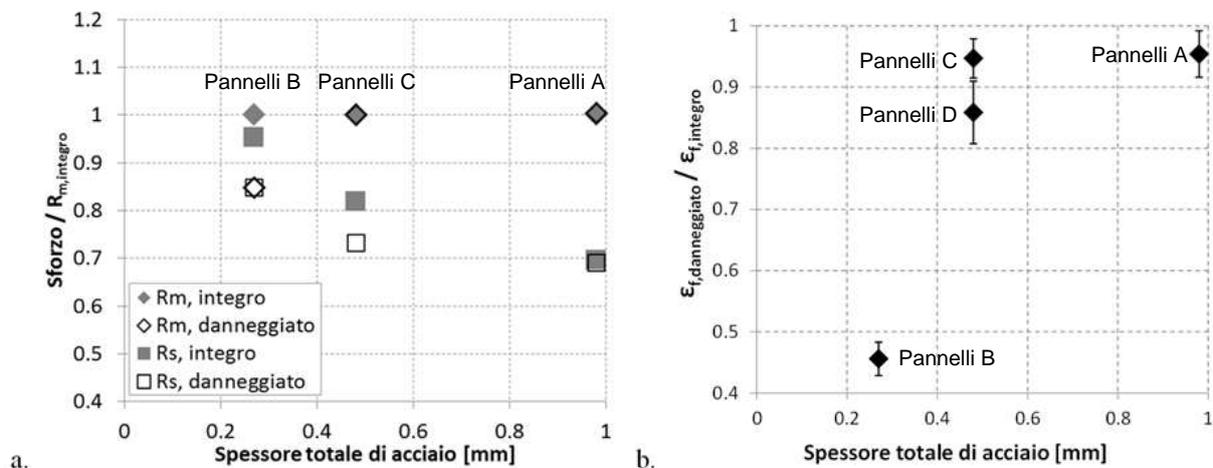


Figura 3: (a.) Andamenti dello sforzo di snervamento (R_s) e massimo a rottura (R_m), normalizzati rispetto alla R_m del materiale non danneggiato, in funzione dello spessore di acciaio.

Pannelli A, B, C con lo stesso spessore di *core*.

(b.) Deformazioni a rottura (ϵ_f) in funzione dello spessore di acciaio.

La Figura 3.b mostra l'andamento del rapporto tra deformazione massima a rottura del materiale danneggiato ($\epsilon_{f,danneggiato}$) rispetto a quello integro ($\epsilon_{f,integro}$). Si nota un trend decrescente di questo parametro con il diminuire dello spessore di acciaio, dunque una ridotta capacità del pannello di deformarsi sotto carico. Anche lo strato di poliolefina ha effetto sul rapporto tra le deformazioni: confrontando i pannelli C e D, ad esempio, si vede come raddoppiando lo strato di poliolefina il valore $\epsilon_{f,danneggiato}/\epsilon_{f,integro}$ passa dal 95 all'86%. Da questo punto di vista, quindi, questo rapporto può essere considerato come un indice del danno indotto.

Per quanto riguarda le misure termografiche, si sono selezionate diverse aree di analisi a secondo del tipo di provino. Per i provini integri, si è valutata la differenza di temperatura superficiale ΔT mediandola su tutta l'area utile, esclusi i bordi (Figura 4.a, Area 0). Per i provini danneggiati, si sono selezionate due aree circolari per l'analisi: la prima corrispondente ad una zona integra e lontana dall'impatto (Figura 4.b, Area 1); la seconda centrata nella zona di impatto (Figura 4.b, Area 2). Entrambe queste aree hanno uguale diametro pari a 7.5 mm.

In accordo con la letteratura, l'andamento della variazione di temperatura superficiale, ΔT , nel tempo di prova presenta tre regioni: 1) una diminuzione lineare nel tempo, nota come effetto termoelastico [21], 2) una deviazione dalla linearità che porta la curva ad un minimo, 3) un successivo incremento fino ad un massimo che corrisponde all'istante di cedimento del materiale.

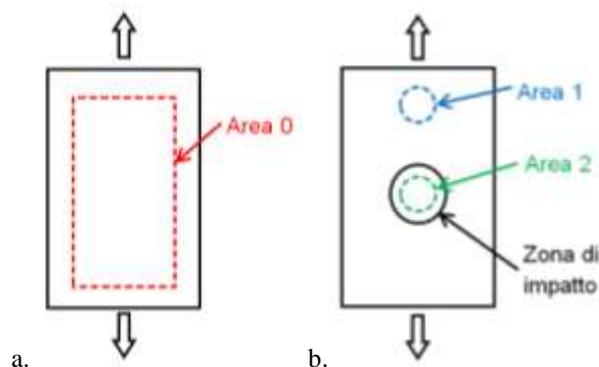


Figura 4: Selezione delle aree per le analisi termografiche: (a.) provino integro; (b.) provino danneggiato.

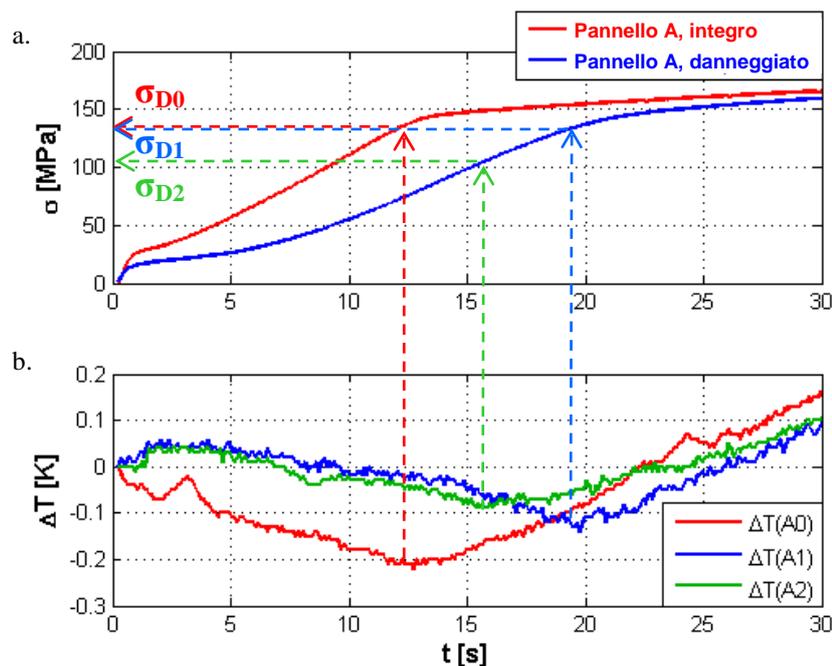


Figura 5: Identificazione degli sforzi di danneggiamento.

(a.) curva sforzo-tempo; (b.) curva di variazione di temperatura ΔT -tempo.

0: provino integro; 1: provino impattato, area non danneggiata; 2: provino impattato, area danneggiata.

L'osservazione termoelastica proposta in questo lavoro è innovativa perché non è mai stata applicata a un materiale sandwich, ed in particolare con la finalità di evidenziare il danneggiamento da impatto.

La Figura 5 mostra un esempio di analisi dei dati termografici per il pannello A. Il grafico è doppio: la Figura 5.a descrive la variazione di sforzo nel tempo di prova, mentre la Figura 5.b mostra la variazione di temperatura superficiale, ΔT , dove sono ben evidenti le tre regioni termografiche.

Infatti, dal grafico è possibile osservare che tutte e tre le aree (A0, A1 e A2) diminuiscono la loro temperatura superficiale, cioè si raffreddano, fino ad un minimo, per poi aumentare. Le aree del provino impattato hanno dati più dispersi: infatti, in questo caso, l'area analizzata è minore e la temperatura è mediata su un numero inferiore di acquisizioni (pixel). Confrontando i dati di A0 rispetto a A1 e A2, una caratteristica comune a tutte le aree analizzate sui vari pannelli è che i trend $\Delta T(A1)$ e $\Delta T(A2)$ possono presentare un leggero aumento di temperatura nei pochi istanti iniziali del test.

Al termine del tratto lineare decrescente della temperatura, attraverso la sovrapposizione dei due grafici di Figura 5, è possibile identificare un valore di sollecitazione che viene definito come quella corrispondente all'inizio del danneggiamento, σ_D . A seconda dell'area analizzata, vengono definite σ_{D0} , σ_{D1} , e σ_{D2} . Per identificare il tratto termoelastico e il valore di σ_D , si è implementato uno script Matlab[®] per selezionare valori sperimentali di ΔT -tempo in modo da massimizzare il valore del coefficiente di regressione R^2 della retta interpolante.

La Tabella 2 riassume i valori sperimentali dei diversi σ_D , rapportati a R_m . Si osserva che per i vari pannelli la σ_{D0} è sempre minore dello snervamento: la termografia sembra quindi identificare l'inizio del danneggiamento prima che avvenga lo snervamento del sandwich. Inoltre, tra le varie σ_D , la maggiore è σ_{D0} del provino integro. Le σ_{D1} e σ_{D2} sono pressoché sempre minori di σ_{D0} , ed in particolare σ_{D2} è generalmente la minore tra le tre. Attraverso σ_{D1} e σ_{D2} è quindi possibile stimare l'effetto dell'impatto rispetto al materiale integro e quantificare il danneggiamento indotto con l'impatto.

Tabella 2: Riassunto dei risultati termografici: σ_D confrontata con R_m .

Pannello	R_v/R_m	σ_{D0}/R_m (provino integro)	σ_{D1}/R_m (provino impattato)	σ_{D2}/R_m (provino impattato)
A	0.695	0.585	0.583	0.518
B	0.952	0.907	0.932	0.906
C	0.818	0.695	0.623	0.614
D	0.729	0.690	0.641	0.649

4. SIMULAZIONI NUMERICHE

Lo scopo delle analisi numeriche che si descriveranno in questo paragrafo è quello di ottenere dei modelli per valutare il danneggiamento indotto dall'impatto a bassa velocità, in modo simile all'analisi termografica condotta sperimentalmente. L'equazione che governa il tratto termoelastico è:

$$\Delta T = -K_0 \cdot T_0 \cdot \Delta(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (1)$$

dove K_0 è la costante termoelastica del materiale, T_0 è la temperatura iniziale di prova, e $\Delta(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ è l'invariante primo del tensore degli sforzi.

Sviluppando un modello ad elementi finiti e valutando l'istante in cui l'invariante primo degli sforzi non è più lineare rispetto al carico applicato, è quindi possibile fare un confronto con i valori sperimentali di σ_D .

4.1 Creazione e validazione del modello numerico di impatto

Innanzitutto si è simulato l'impatto contro i pannelli sandwich selezionando quattro prove con caratteristiche intermedie. Il modello a elementi finiti simula il proiettile come superficie rigida alla quale è associata massa e velocità sperimentale. Il pannello sandwich è simulato con elementi *shell* lineari, a cui sono associati i tre *layer* come materiale composito. Il modello è mostrato in Figura 6. L'analisi è di tipo esplicito ed è stata condotta con il software *Abaqus*.

Le caratteristiche meccaniche degli acciai per le pelli esterne sono state estratte dalle prove di Figura 2.a; quella della poliolefina è invece stata stimata da [22] come lineare perfettamente plastica con $R_s = 10$ MPa, $E = 200$ MPa, e $\varepsilon_{el} = 3.75\%$.

Tra il proiettile ed il pannello è implementato un vincolo di contatto, mentre i bordi della lastra, di dimensione $60 \times 60 \text{ mm}^2$, sono incastrati come nelle prove sperimentali.

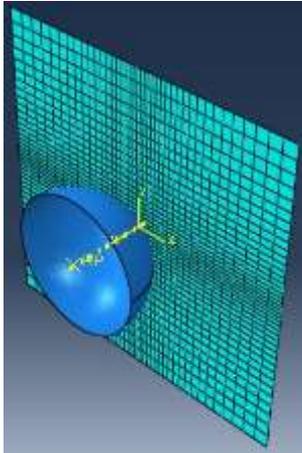


Figura 6: Modello numerico del proiettile e del pannello, con *mesh*.

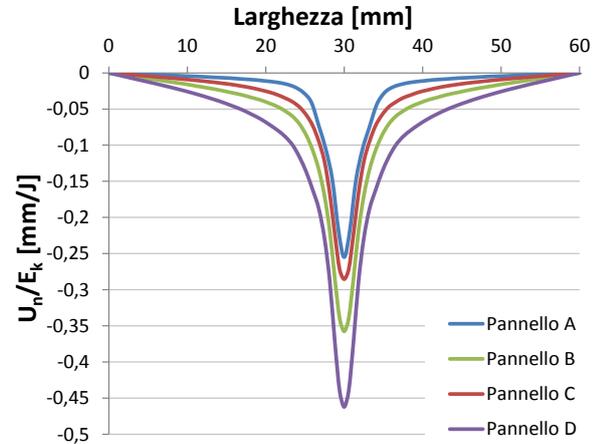


Figura 7: Risultati delle simulazioni di impatto: deflessione numerica U_n normalizzata rispetto l'energia di impatto E_k .

Tabella 3: Confronto tra deflessioni residue post-impatto sperimentali (U_s) e numeriche (U_n), adimensionalizzate rispetto all'energia di impatto (E_k) di ogni prova.

Pannello	U_s/E_k [mm/J]	U_n/E_k [mm/J]	Differenza [%]
A	-0.271	-0.255	6.2
B	-0.406	-0.358	13.6
C	-0.367	-0.285	28.4
D	-0.585	-0.462	26.4

In Figura 7 è mostrato l'andamento della deflessione residua generata nei quattro pannelli analizzati, e in parallelo la Tabella 3 confronta tali risultati con i corrispondenti valori sperimentali. Sia le simulazioni numeriche che i valori sperimentali classificano i pannelli A come i più performanti, seguiti da C, B ed infine D. Questi ultimi appaiono quindi i più danneggiati. Infatti, i pannelli B, pur avendo spessore delle lamiere inferiore, sono costituiti da acciaio con caratteristiche meccaniche superiori e dunque presentano una deflessione minore di quella dei pannelli D.

Confrontando inoltre la deflessione dei pannelli C e D, si nota un aumento maggiore del 40% sia sperimentale che numerico a fronte di un dimezzamento dello strato della poliolefina. La poliolefina si dimostra quindi molto utile per limitare la deflessione residua da impatto.

Il confronto tra i risultati numerici e sperimentali (Tabella 3) mostra delle differenze abbastanza contenute per i pannelli A e B, mentre sono più rilevanti per i pannelli C e D. Sembra verosimile imputare questi errori alle semplificazioni introdotte nella simulazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio che costituisce queste pelli.

Tutte le simulazioni FEM presentano delle deflessioni minori rispetto a quelle sperimentali: questo risultato è probabilmente dipendente dal fatto che i modelli numerici non sono in grado di simulare la naturale difettosità interna dei pannelli, che quindi risultano più rigidi rispetto a quelli sperimentali. Nonostante ciò, il confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali è soddisfacente. I parametri ottenuti numericamente potrebbero, quindi, essere utilizzati per una valutazione di vita residua.

4.2 Simulazione delle prove di trazione post-impatto e confronto con i dati termografici

Alla luce dei risultati ottenuti dalle prime simulazioni delle prove di impatto, ulteriori analisi sono state condotte per analizzare numericamente il comportamento dei pannelli sandwich durante le prove di trazione post-impatto. Al termine della simulazione esplicita di impatto, si crea un successivo *step* di analisi. Le condizioni al contorno sono mostrate in Figura 8: un lato del pannello rimane incastrato, due sono liberi, mentre quello superiore è vincolato a muoversi solo verticalmente, applicando la storia di carico sperimentale (ad esempio, per il pannello A, la curva sforzo-tempo di Figura 5.a) al bordo della *shell*. Il tempo della simulazione è stato limitato agli istanti iniziali della prova di trazione, fino al minimo della curva variazione di temperatura-tempo ($\Delta T-t$) (seconda regione termografica).

Tra le grandezze calcolate durante la simulazione, si è valutato l'andamento dell'invariante primo del tensore degli sforzi (*pressure*, per *Abaqus*) in funzione del tempo per ricavare uno sforzo equivalente di danneggiamento, come per il monitoraggio termografico sperimentale. I grafici ricavabili sono simili a quelli sperimentali mostrati in Figura 5, che possono anche essere riassunti in un unico diagramma Invariante primo-Sforzo applicato. La Figura 9 mostra proprio un esempio riferito ai pannelli A. Si è osservato che l'invariante primo decresce linearmente con lo sforzo applicato (o col tempo) in accordo con l'Eq.(1), e si sono valutati due sforzi di danneggiamento caratteristici delle aree lontano dall'impatto (Area 1, da cui $\sigma_{D1,n}$) e nella zona di impatto (Area 2, da cui $\sigma_{D2,n}$).

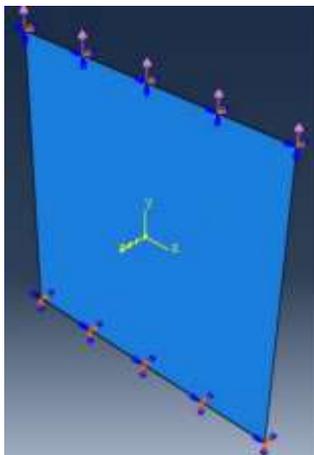


Figura 8: Condizioni al contorno nella prova di trazione post-impatto.

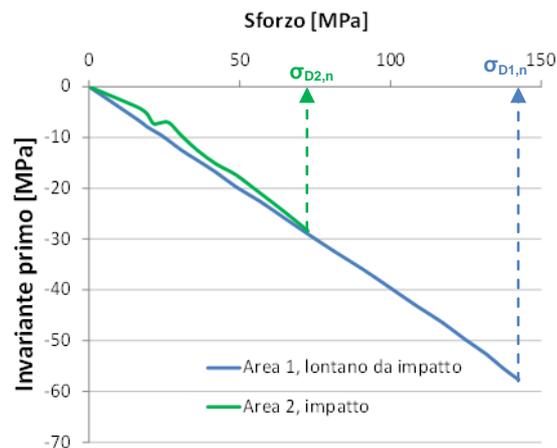


Figura 9: Risultati numerici per il pannello A: invariante primo in funzione dello sforzo applicato, e valutazione di $\sigma_{D1,n}$ e $\sigma_{D2,n}$. Aree come da Figura 4.

Tabella 4: Confronto tra sforzi che delimitano la fine del tratto termoelastico sperimentale ($\sigma_{D1,s}$ e $\sigma_{D2,s}$) e sforzi numerici che delimitano la fine del tratto in cui l'invariante primo del tensore di sforzi è lineare nel tempo ($\sigma_{D1,n}$ e $\sigma_{D2,n}$).

Pannello	$\sigma_{D1,s}$ [MPa]	$\sigma_{D1,n}$ [MPa]	Differenza [%]	$\sigma_{D2,s}$ [MPa]	$\sigma_{D2,n}$ [MPa]	Differenza [%]
A	144	142	-1.4	115	82	-28.7
B	168	163	-3.0	168	133	-20.8
C	85	83	-2.4	86	66	-23.3
D	116	114	-1.7	130	96	-26.2

In Tabella 4 sono riassunti i valori di sollecitazione che delimitano la fine del tratto in cui l'invariante primo del tensore degli sforzi è lineare nel tempo (o con lo sforzo applicato), valutati dalle simulazioni numeriche per i vari pannelli analizzati, con la procedura mostrata in Figura 9. La Tabella propone inoltre il confronto diretto con le σ_D valutate con il metodo termografico. Si osserva un'ottima concordanza tra le σ_{D1} numeriche e sperimentali, nelle zone non danneggiate del provino, per tutti i tipi di pannelli analizzati. D'altra parte, invece, la soluzione in prossimità dell'impatto sottostima i valori sperimentali e dunque il danneggiamento introdotto nel provino.

Nonostante siano necessarie ulteriori analisi per definire al meglio il comportamento in prossimità della zona impattata, si evince che la metodologia di simulazione proposta permette di ottenere dei

valori di sforzo di danneggiamento che possono essere comparati con i dati sperimentali. In quest'ottica, queste analisi possono essere affiancate alle prove sperimentali per simulare l'utilizzo di ulteriori materiali nella produzione dei sandwich e per una loro ottimizzazione in funzione dell'applicazione specifica in cui saranno applicati.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati considerati dei pannelli sandwich costituiti da tre strati, quelli esterni in acciaio e il *core* in poliolefina, con lo scopo specifico di valutare il loro comportamento a seguito di impatti a bassa velocità.

Dalle prove sperimentali di impatto è stato messo in evidenza l'effetto combinato dello spessore delle pelli e del *core* e delle caratteristiche meccaniche delle pelli. In particolare, la conseguenza principale della presenza del poliolefina consiste nell'aumentare la capacità di deformarsi e di assorbire l'energia di impatto. Chiaramente questa caratteristica è più o meno esaltata al variare delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei costituenti i sandwich.

E' stata utilizzata la tecnica termografica per valutare l'inizio del danneggiamento in corrispondenza del termine del tratto termoelastico. Questo primo scostamento dal comportamento lineare-elastico del materiale è misurabile solo con questa tecnica e può rappresentare un indice del danneggiamento subito dal pannello a seguito di un urto a bassa velocità.

Il modello numerico realizzato simula le stesse prove sperimentali e permette la definizione dello stesso indice di danneggiamento. Il confronto tra i valori numerici e quelli sperimentali è soddisfacente, anche se sicuramente sono necessarie ulteriori e più approfondite analisi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Palkowski, O.A. Sokolova, A. Carradò, "Sandwich Materials" in: D. Crolla, D.E. Foster, T. Kobayashi, N. Vaughan, ed. *Encyclopedia of Automotive Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd, 1-17 (2013)
- [2] B. Engel, J. Buhl, "Metal forming of vibration damping composite sheets", *Steel Research International*, 82, 626-631 (2011).
- [3] C. Colombo, A. Carradò, H. Palkowski, L. Vergani, "Impact behaviour of 3-layered metal-polymer-metal sandwich panels", *Composite Structures*, in pubblicazione (2015). DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.07.078.
- [4] M. Harhash, A. Carradò, H. Palkowski, "Lightweight titanium/polymer/titanium sandwich sheet for technical and biomedical application", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 45, 1084-1091 (2014).
- [5] K.J. Kim, D. Kim, S.H. Choi, K. Chung, K.S. Shin, F. Barlat, K.H. Oh, J.R. Youn, "Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets". *Journal of Materials Processing Technology*, 139, 1-7 (2003).
- [6] M. Seth, V.J. Vohnout, G.S. Daehn "Formability of steel sheet in high velocity impact", *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 390-400 (2005).
- [7] G.B. Chai, P. Manikandan, "Low velocity impact response of fibre-metal laminates – A review", *Composite Structures*, 107, 363-381 (2014).
- [8] J. Fan, Z.W. Guan, W.J. Cantwell, "Numerical modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to low velocity impact loading", *Composite Structures*, 93, 2430-6 (2011).
- [9] P. Manikandan, G.B. Chai, "A layer-wise behavioral study of metal based interply hybrid composites under low velocity impact load", *Composite Structures*, 117, 17-31 (2014).
- [10] M.R. Amini, S. Nemat-Nasser, "Micromechanisms of ductile fracturing of DH-36 steel plates under impulsive loads and influence of polyurea reinforcing", *International Journal of Fracture*, 162, 205-217 (2010).
- [11] M.R. Amini, J.B. Isaacs, S. Nemat-Nasser, "Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads", *International Journal of Impact Engineering*, 37, 82-89 (2010).

- [12] M.R. Amini, A.V. Amirkhizi, S. Nemat-Nasser, “Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads”, *International Journal of Impact Engineering*, 37, 90–102 (2010).
- [13] C.M. Roland, D. Fragiadakis, R.M. Gamache, R. Casalini, “Factors influencing the ballistic impact resistance of elastomer-coated metal substrates”, *Philosophical Magazine*, 93, 468–477 (2013).
- [14] D. Mohotti, T. Ngo, S.N. Raman, M. Ali, P. Mendis, “Plastic deformation of polyurea coated composite aluminium plates subjected to low velocity impact”, *Materials and Design*, 56, 696–713 (2014).
- [15] L. Xue, W.J. Mock, T. Belytschko, “Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating”, *Mechanics of Materials*, 42, 981-1003 (2010).
- [16] C. Clienti, G. Fargione, G. La Rosa, A. Risitano, G. Risitano, “A first approach to the analysis of fatigue parameters by thermal variations in static tests on plastics”, *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 2158–2167 (2010).
- [17] C. Colombo, F. Libonati, L. Vergani, “Fatigue damage in GFRP”, *International Journal of Structural Integrity*, 4, 424-440 (2012).
- [18] C. Colombo, L. Vergani, M. Burman, “Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites”, *Composite Structures*, 94, 1165-1174 (2012).
- [19] G. La Rosa, A. Risitano, “Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components”, *International Journal of Fatigue*, 22, 65–73 (2000).
- [20] O. Sokolova, A. Carradò, H. Palkowski, “Production of customized high-strength hybrid structures”, *Advanced Materials Research*, 137, 81-128 (2010).
- [21] W. Thomson (Lord Kelvin), “On the thermoelastic, thermomagnetic, and pyroelectric properties of matter”, *Philosophical Magazine*, 5, 4-27 (1878).
- [22] <http://www.matweb.com/>