



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

*Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica*

Analisi della distribuzione degli spessori di  
provini in sandwich metallo/polimero/metallo  
sottoposti a prove di formabilità

Analysis of thickness distribution about  
sandwich specimen MPM subjected to  
formability test

**Relatore:**

Ch.mo. Archimede Forcellese

**Tesi di laurea**

**di:**

Filipponi Francesco

**Correlatrice:**

Prof. Michela Simoncini

---

Anno accademico 2019/2020

## *Sommario*

Le proprietà meccaniche e la formabilità di un composito sandwich a tre strati metallo-polimero-metallo sono state studiate in funzione dell'angolo dell'asse di campionamento rispetto alla direzione di laminazione. Il sandwich è stato ottenuto incollando un'anima in polimero, dello spessore di 0,4 mm, tra due lamiere d'acciaio, ciascuna con uno spessore di 0,2 mm. Le caratteristiche di resistenza alla deformazione e il comportamento anisotropo sono stati studiati per mezzo di prove di trazione monoassiale. Sono state inoltre effettuate prove di punzonatura emisferica per valutare sia la formabilità, in termini altezza limite della cupola e delle curve limite di formabilità, sia l'atteggiamento di assottigliamento del composito sandwich MPM. Infine, sono state analizzate le superfici di frattura dei campioni a trazione che di quelli a punzonatura e analizzati con la microscopia elettronica a scansione. È stato osservato che i campioni orientati a 45° rispetto la direzione di laminazione sono caratterizzati dalle più alte proprietà meccaniche e dalla più alta formabilità in confronto a quelli a 0° e 90°. Tali risultati sono stati correlati al meccanismo di scollamento che si verifica in corrispondenza delle interfacce tra la lamiera d'acciaio e il riempitivo in plastica, quando l'angolo dell'asse del campione era di 0° e 90°.

## Indice

<b>1) Strutture in materiale composito</b>	<b>3</b>
Generalità .....	3
Sistemi di rinforzo.....	6
Fibre .....	7
Matrici.....	8
<b>2) Proprietà Elastomeri</b>	<b>9</b>
Gomme.....	12
<b>3) Pannelli Sandwich</b>	<b>14</b>
Analisi caratteristiche del Core .....	15
Criteri di utilizzo .....	16
Costituenti.....	18
Pelli .....	18
Riempitivo .....	19
Adesivo .....	26
Fabbricazione .....	27
Preparazione del riempimento .....	28
Preparazione delle pelli.....	28
Preparazione dell'adesivo .....	29
Unione di pelli e riempitivo .....	30
Accorgimenti .....	34
Dettagli, inserti e giunzioni.....	34
<b>4)Analisi sperimentale:proprietà meccaniche e formabilità..</b>	<b>37</b>
Procedure materiali e sperimentali.....	39
Prova a trazione monoassiale .....	39
Punch test .....	41
Risultati e considerazioni .....	44
Formabilità.....	47
Conclusioni .....	53
<b>5)Bibliografia e sitografia.....</b>	<b>54</b>

# Strutture in Materiale Composito

## - Generalità

Le strutture in materiale composito sono ottenute dalla stretta unione di almeno due componenti, con caratteristiche fisiche e meccaniche molto differenti tra loro; lo scopo di questa unione è ottenere un materiale finale con caratteristiche superiori a quelle dei singoli componenti. Il composito è generalmente costituito da rinforzo e matrice, la cui unione dà luogo ad un materiale solido e continuo in grado di trasmettere e ridistribuire sforzi interni dovuti alle sollecitazioni impresse. Il principale vantaggio di una struttura in composito è di sfoggiare le qualità migliori dei costituenti e talvolta qualità che nessuno dei componenti possiede.

Alcune proprietà che possono essere migliorate formando un materiale composito sono:

- resistenza meccanica
- rigidità
- resistenza alla corrosione
- peso
- vita a fatica
- dipendenza dalla temperatura
- isolamento termico
- conducibilità termica

Naturalmente tutte queste caratteristiche non possono essere migliorate simultaneamente, dato che alcune risultano in conflitto tra di loro. Quando si studia la realizzazione di una struttura in composito il fine è di creare un materiale che abbia le sole proprietà necessarie a rispondere a determinati requisiti di progetto.

La definizione intrinseca di materiale composito deriva dal fatto che i costituenti sono legati a livello macroscopico, in modo tale che i materiali originali possano essere distinti ad occhio nudo dopo la loro unione.

In definitiva possiamo affermare che i compositi sono materiali non omogenei e non isotropi in cui i singoli costituenti sono legati tra loro in maniera insolubile al fine di ottenere un prodotto finale che combini le proprietà migliori dei singoli componenti. Come si può facilmente immaginare esistono migliaia di diverse combinazioni di materiali che non sono di facile classificazione.

Una classificazione basata sulla geometria dei componenti strutturali è la medesima:

- materiali fibrosi
- materiali a scaglie
- materiali a scheletro continuo
- materiali laminati e/o stratificati
- materiali particellari

Al fine di determinare le caratteristiche finali di un prodotto, sarà necessario conoscere quelle dei suoi costituenti, rinforzo e matrice, e conoscere il modo con cui interagiscono tra loro.

### *-Sistemi di rinforzo*

La costruzione di un materiale composito si basa sulla funzione che il rinforzo deve assolvere nel sistema che andrà a costituire. Una primitiva concezione era quella dei materiali compositi a matrice rinforzata secondo cui la presenza del rinforzo costituisce soltanto un "aiuto" per la matrice, la quale al contrario svolge il compito principale nella determinazione delle caratteristiche meccaniche di tutto il sistema. Si possono utilizzare fibre corte, lamelle o anche polveri di vari materiali per affinare le caratteristiche della matrice. Nell'idea odierna il sistema di rinforzo è costituito da fibre lunghe che svolgono il ruolo cardine, mentre la matrice tiene insieme le fibre, le protegge dagli agenti esterni e garantisce il trasferimento delle tensioni alle fibre. L'utilizzo di fibre lunghe è vantaggioso in termini di resistenza, rigidità e anche tenacità nella direzione di allineamento, mentre calano drasticamente in tutte le altre. Per ovviare a ciò si ricorre all'utilizzo di tessuti o più strati di fibre, differenziate e ordinate.

### *- Fibre*

Le fibre sono masse solide di forma allungata, aventi dimensioni lineari maggiori longitudinalmente rispetto a uno sviluppo minore su quella trasversale. Il loro compito è di indispensabile importanza, al fine di fornire un aumento delle caratteristiche meccaniche. Nei materiali fibrosi tali lunghi filamenti monodirezionali sono orientabili come tessuti nelle direzioni più appropriate per resistere ai carichi esterni. I rinforzi più adoperati sono il vetro, il carbonio, il Kevlar, il boro, il carburo di silicio e i filamenti metallici. La maggior parte delle fibre utilizzate nell'industria metalmeccanica oggi sono normalizzate e posseggono una sezione trasversale circolare o simile. I materiali

di rinforzo sono assai più costosi, ad esempio del semplice alluminio, e il loro costo rappresenta una grossa percentuale in volume del composito.

I rinforzi hanno diverse funzionalità tra cui:

- svolgono il ruolo principe nel trasferimento dei carichi nel materiale
- danno al composito rigidità e resistenza flessionale, a compressione e a trazione
- definiscono le proprietà elettriche e il coefficiente di dilatazione termica

Le fibre più lunghe trovano largo utilizzo nella realizzazione di solidi di rotazione, corpi cilindrici pieni o cavi, specialmente con finalità di trasferimento di carichi o forze dal punto di applicazione alla zona vincolata di scarico, invece quelle corte consentono la progettazione di parti più complesse a discapito dell'efficienza relativa le sollecitazioni assorbite e trasmesse, poiché tale matrice è nota a priori per prestazioni nettamente minori. La distribuzione dei rinforzi nei compositi è fondamentale nella definizione delle proprietà meccaniche del manufatto finale, infatti la resistenza in una particolare direzione è strettamente dipendente al numero di fibre orientate secondo tale orientamento.

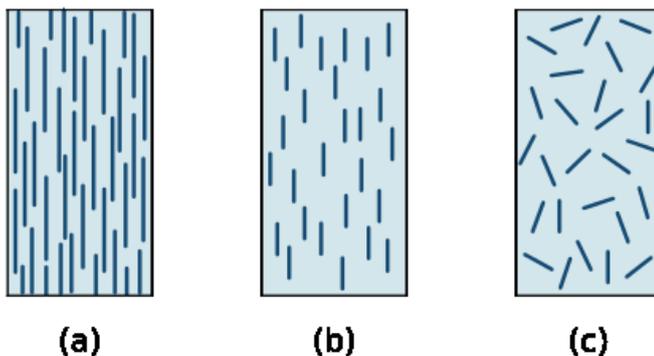


Figura 1 Orientamento delle fibre di riempimento

Nel grafico tensione-deformazione proposto è messo a confronto la curva caratteristica di ogni composito dopo prova a trazione per i principali materiali appena sopracitati, usati come rinforzi longitudinali. La scelta di uno o dell'altro è fondamentale impartita dall'esigenze progettuali, infatti preferire un tipo di fibra con proprietà superiori a quelle necessarie potrebbe tradursi in un innalzamento dei costi di produzione, ma anche del peso complessivo della struttura come possibilità indesiderata nei casi dove è chiaramente non voluto come in applicazioni aeronautiche o militari.

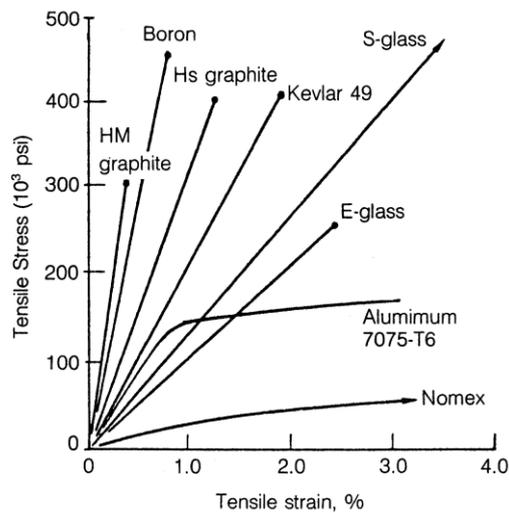


Figura 2 Tensione a rottura per le diverse tipologie di fibre

### -Matrici

La matrice ha il compito di legare insieme le fibre di rinforzo, trasferendo i carichi alle stesse e tra le medesime, di proteggere dagli urti esterni e dall'abrasione e prevenendo i difetti. La resina inoltre protegge le fibre dall'umidità ambientale, dalla corrosione chimica e dall'ossidazione, cause che possono condurre all'infrangimento e alla loro rottura anticipata.

Ingegneristicamente, alla matrice è affidato il compito di orientare le fibre verso la direzione desiderata, in modo da poter trasportare i carichi prestabiliti; inoltre assicura assorbimento all'urto, opponendosi alla propagazione delle cricche fornendo opposizione agli sforzi di taglio interlaminari nel materiale composito. La scelta delle matrici viene eseguita in base ad alcune proprietà meccaniche e alla temperatura massima di impiego, inoltre il composito deve essere chimicamente compatibile con le fibre in esse immerse. Le matrici in generale hanno natura plastica, metallica o ceramica ma il materiale di rinforzo può essere di natura diversa.

Grazie alla loro facilità di applicazione le matrici plastiche sono utilizzate per la maggiore grazie soprattutto ad un basso costo di produzione. Si distinguono in due tipologie:

- resine termoindurenti (epossidica, fenolica, poliesteri) cioè polimeri che una volta prodotti non possono essere fusi senza andare incontro a decadimento chimico causato da un grado di reticolazione elevato.
- resine termoplastiche cioè polimeri formati da catene lineari, non reticolate, che attraverso un aumento di temperatura si portano ad uno stato iniziale. Ogni qualvolta che si ripete l'operazione di riscaldamento e formatura il materiale perde un po' delle sue caratteristiche.

Le resine termoindurenti, a causa della bassa temperatura di processo  $120^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ , sono costituite da molecole semplici e presentano bassa viscosità. Questa caratteristica ne consente l'impiego per oggetti di forma complesse, e di poter impregnare le fibre di rinforzo; il susseguente indurimento è irreversibile, poiché provoca la nascita di legami chimici tra le catene polimeriche, che andranno a costituire una unica macromolecola. Nello specifico la resina epossidica ha riscosso interesse nel corso degli anni per via delle sue eccellenti proprietà: infatti può essere impiegata in applicazioni a bassa temperatura di servizio (largamente sotto lo zero termico) garantendo sempre resistenza chimica, adesione elevata tra le fibre e compatibilità con i principali tipi di fibre. I maggiori rischi si presentano principalmente ad alte temperature, dove queste matrici hanno tendenza ad assorbire l'umidità e di conseguenza a diminuendo così le proprietà meccaniche. I materiali termoplastici, al contrario, mostrano caratteristiche meccaniche maggiori in termini di tenacità ed elevata resistenza all'urto, ma rammolliscono alle temperature di esercizio  $250^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$ .

## Proprietà Elastomeri

Con il termine elastomero si intendono le sostanze naturali o sintetiche, che mostrano le proprietà chimico fisiche proprie del caucciù, la più importante delle quali è la capacità di assorbire grandi deformazioni elastiche, potendo essere allungati molte volte e riassumendo la propria dimensione originaria al ritorno nella situazione a scarica. Se un solido cristallino viene riscaldato, all'aumentare della temperatura aumenterà anche l'energia dei singoli elementi strutturali, e le vibrazioni attorno alle posizioni di equilibrio del reticolo cristallino acquisiscono ampiezza maggiore. Avverrà la fusione quando l'energia dovuta alla vibrazione diventa tale da consentire il superamento dei vincoli che legano gli atomi tra loro. Allo stato liquido sono amorfi, caratterizzati dalla assenza di ordine strutturale a lunga distanza. Tale peculiarità può essere mantenuta, attraverso particolari accortezze, anche al di sotto della temperatura di fusione come nel caso del liquido sottoraffreddato. Esso possiede una proprietà particolarmente importante: la viscosità, cioè la grandezza che misura la resistenza allo scorrimento dei fluidi. Questa aumenta esponenzialmente abbassando la temperatura: l'aumento è in un primo momento lento poi molto più marcato in un ristretto intervallo di valori fino a tendere asintoticamente all'infinito quando la temperatura scende al di sotto di un valore critico che è caratteristico di ogni materiale. Tale fenomeno di transizione dallo stato di liquido sottoraffreddato allo stato solido amorfo dalle caratteristiche vetrose, identifica così la temperatura di transizione vetrosa  $T_g$ .

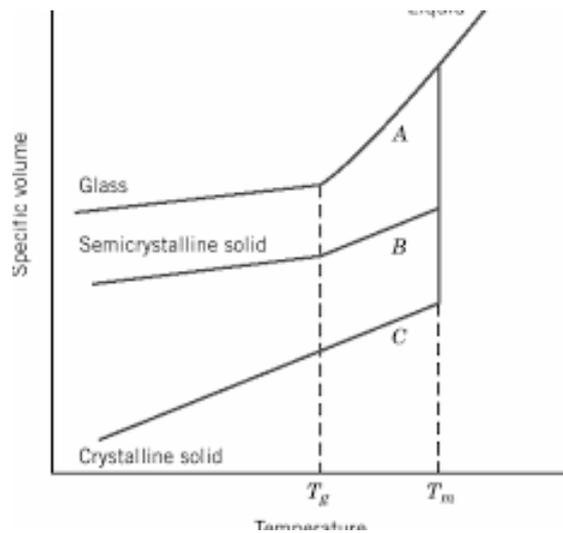


Figura 3 Andamento del volume specifico in relazione alla temperatura di transizione vetrosa

La particolarità di tale transizione è la diversa possibilità di movimento degli atomi al di sopra o sotto della temperatura critica. Mentre nel liquido ci sono le condizioni tali che gli atomi si possano spostare all'interno del sistema, ammettendo così rotazioni attorno ai legami di valenza e movimenti traslazionali, nel solido vetroso le molecole risultano bloccate, infatti sono possibili solo movimenti di vibrazione attorno alle posizioni di equilibrio senza la possibilità di spostamento nel sistema stesso, fermo in una situazione di non equilibrio. Attorno alla temperatura di transizione vetrosa alcune caratteristiche fisiche del materiale subiscono variazioni importanti. Abbiamo già mostrato la viscosità  $\mu$ , che tende all'infinito quando la temperatura scende sotto  $T_g$ .

L'andamento del modulo elastico in funzione della temperatura è di interesse, poiché i polimeri vetrosi, che hanno un valore del modulo di Young  $E$ , dell'ordine di 100 GPa nel passaggio allo stato viscoelastico scende a 1 MPa, per poi crollare a valori bassissimi nel liquido.

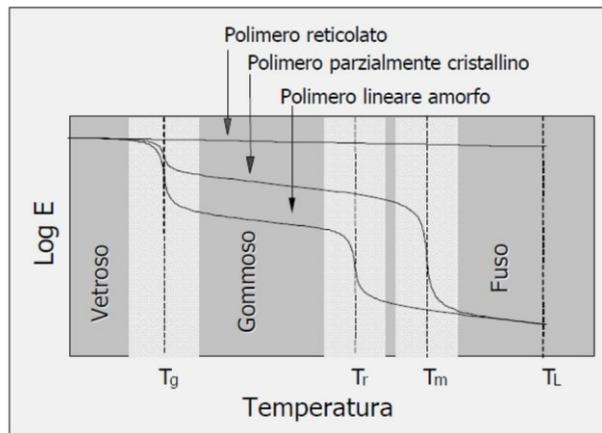


Figura 4 Andamento del modulo di Young in relazione a  $T_g$

Molteplici sono i parametri che concorrono a determinare il valore numerico della temperatura di transizione di un polimero. Vengono suddivisi in parametri interni, di tipo molecolare, e parametri esterni, i quali possono essere modificati. Tra i parametri interni più importanti troviamo la flessibilità della catena principale e le forze intermolecolari. I polimeri con alta mobilità interna hanno bassi valori di  $T_g$ . Quest'ultima aumenta con il parametro di solubilità di solubilità Hildebrand ( $\delta$ ), il quale fornisce una stima numerica del grado di interazione tra i materiali. Tra i parametri esterni invece menzioniamo la massa molecolare, infatti la temperatura di transizione vetrosa di un polimero varia con essa, prima rapidamente poi lentamente fino a raggiungere un valore costante secondo la curva di Flory-Fox .

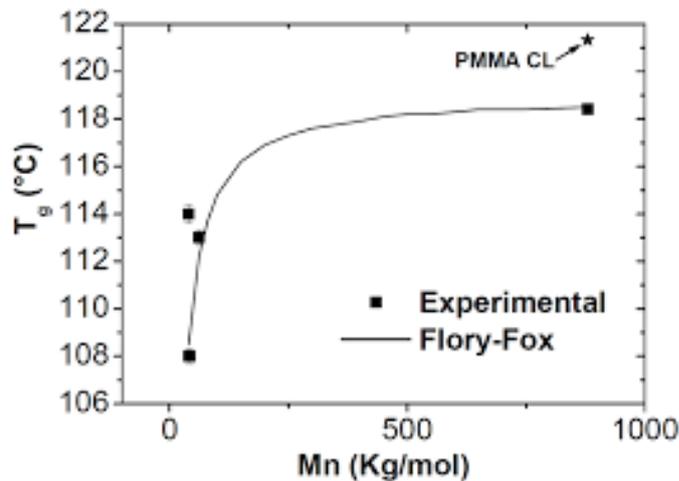


Figura 5 Grafico di Flory-Fox

## -Gomme

Si definisce gomma un materiale capace di subire deformazioni rilevanti sotto l'azione di tensioni relativamente piccole, e di recuperare alla rimozione del carico la forma e le dimensioni originali. Mentre un materiale cristallino ha un modulo di Young dell'ordine di 10 GPa e un allungamento a rottura  $A=10\%$ , nei materiali elastomerici avremo un modulo di elasticità dell'ordine di 1 MPa e una deformazione del 103 – 104%. La causa dell'elevata deformazione della gomma è da ricercarsi nel fatto che la catena della singola macromolecola, in assenza di sollecitazioni esterne, assume la conformazione media del gomitolato statistico, che è notevolmente deformabile attraverso una trazione modesta.

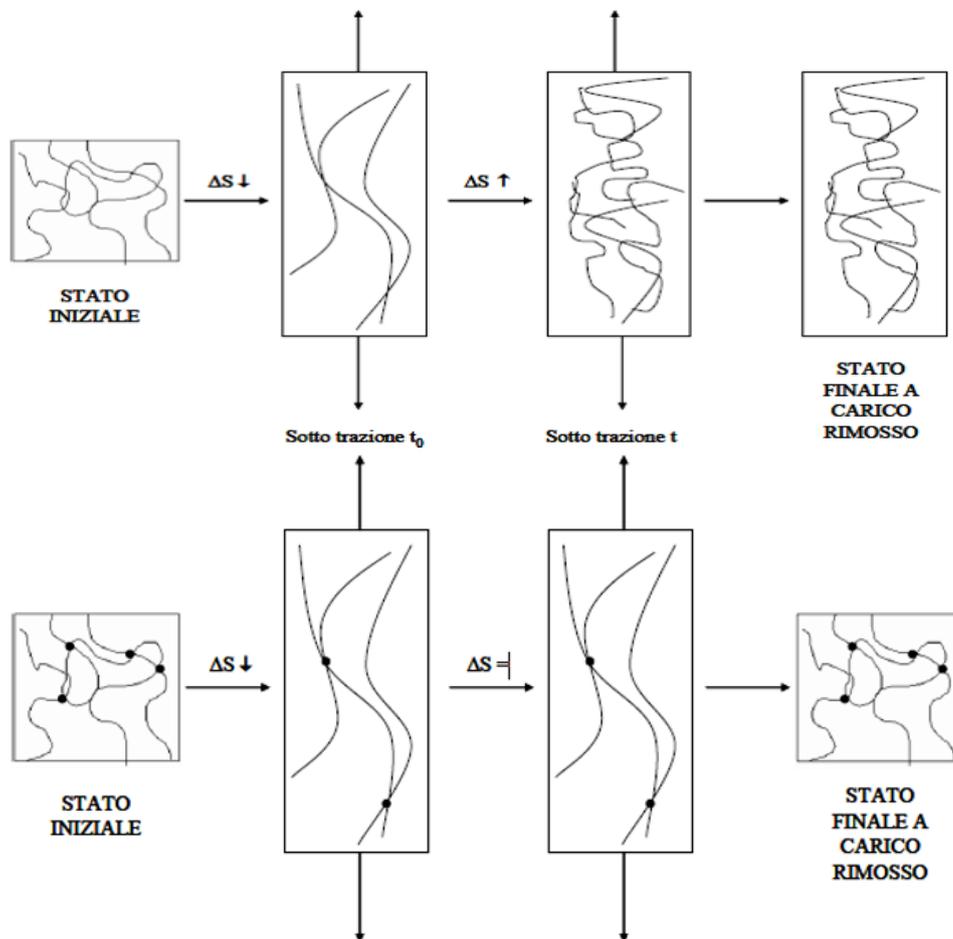


Figura 6 Confronto tra elastomero e termoplastico sotto sforzo unidirezionale

In un materiale polimerico viscoelastico, al di sopra della  $T_g$  i segmenti delle catene macromolecolari, sottoposte ad energia termica, hanno una conformazione casuale raggomitolata. Applicando una trazione, questa assumono un aspetto meno raggomitolato e gli assi delle catene si orientano nella stessa direzione di applicazione del carico. Se la forza non viene rimossa la struttura ha la possibilità di elasticizzare; ne risulterà un materiale macroscopicamente deformato, che non possiede alcuna forza di richiamo;

infatti il provino rimane deformato in modo permanente, poiché l'energia è stata dissipata nello scorrimento delle catene.

Tali considerazioni permettono di stabilire che per avere un elastomero è necessario che :

- il materiale sia costituito da lunghe molecole a catena
- il materiale non sia cristallino
- le catene siano mobili
- ci siano basse forze di coesione tra macromolecole in modo da permettere ampia libertà di movimento tra i tratti delle catene

Il fenomeno dell'elasticità nella gomma ha una natura diversa da quella che riscontrata nei solidi cristallini. In questi ultimi l'elasticità è legata a piccole deformazioni del reticolo cristallino, gli atomi sotto l'azione di un carico vengono spostati dalle posizioni di equilibrio ma non a tal punto da andare a occupare posizioni contigue equivalenti nel reticolo. In questo modo si genera una forza di richiamo, direttamente proporzionale alla deformazione che fa tornare l'elemento strutturale nella posizione iniziale.

Questa forma di elasticità è di origine prettamente energetica, mentre nelle gomme il fenomeno è di natura in prevalenza entropica. Tale diversità si traduce in un diverso andamento del fenomeno con l'aumentare della temperatura: mentre nei solidi cristallini diminuisce lo sforzo necessario per ottenere la deformazione prestabilita, quindi diminuisce il modulo di Young per un aumento della temperatura, negli elastomeri è necessario un aumento del carico per via del fatto che la macromolecola tende ad assumere una conformazione raggomitolata.

# Pannelli Sandwich

Le strutture sandwich si ispirarono in origine ai favi cioè a un raggruppamento di celle esagonali costruito dalle api nel loro alveare. È accertato che i primi manufatti dall'uomo per risalgono alla Cina di 2000 anni fa, con una struttura a nido d'ape di carta. Benché il loro impiego in parti strutturali risale addirittura ai primi dell'Ottocento, solo dopo più di un secolo, grazie allo sviluppo degli adesivi strutturali nei paesi occidentali, c'è una prima marcata diffusione nel suo utilizzo. Grazie alla messa a punto dei materiali gomma-fenolici e dei vinilfenolici è stato possibile tale sviluppo. Questi materiali (prima fra i quali la colla Redux, un adesivo epossidico bicomponente) incollavano bene sia al legno che al metallo, godevano di resistenza piuttosto marcata e prevedibile, diedero così impulso a una rivoluzione della tecnica di incollaggio. Ulteriori considerevoli sviluppi susseguirono in poco tempo: metodi innovativi di pulitura per le pelli metalliche, riempitivi a struttura nido d'ape performanti, adesivi tenaci utilizzati come film semi-reticolati, resine prestazionali con reticolazione a una minor temperatura e pressione, rinforzi pre-impregnati con contenuto in resina stabilito a priori.

Si definiscono pannelli sandwich strutture in composito costituite da tre parti differenti:

- le pelli o lamine superficiali, che svolgono la funzione strutturale cioè quella di resistere alle sollecitazioni di trazione e flessione.
- il riempitivo (core), o l'anima, più spesso e leggero che funge da collegamento tra le due lamine e garantisce il trasferimento dello sforzo di taglio tra di esse.
- l'adesivo che assume il ruolo fondamentale di resistere agli sforzi di taglio che passano tra core e pelli. Nei pannelli sandwich di più recenti, il ruolo dell'adesivo viene compiuto dalla resina presente nel tessuto preimpregnato.

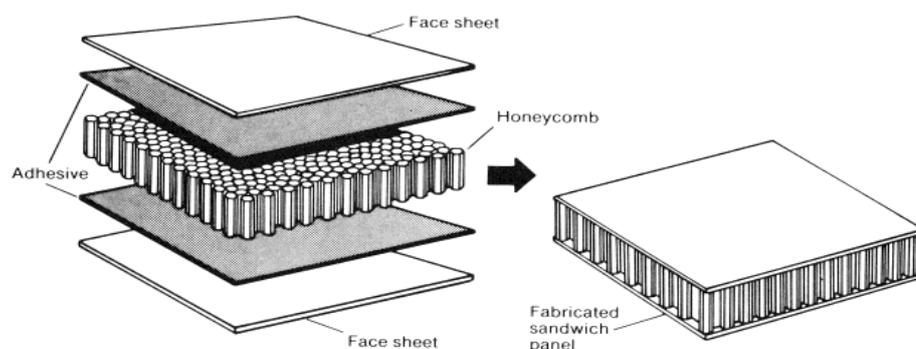


Figura 7 Esempio pannello in sandwich

I pannelli sandwich rappresentano una delle più importanti innovazioni nel campo dei materiali compositi; se gli strati più esterni sono costituiti da laminati

con buone proprietà di resistenza meccanica, il core è costituito da materiale leggero e strutturalmente poco performante, il quale deve assolvere il compito di trasferire gli sforzi mantenendo integra la distanza tra i piani delle pelli, oppure di mantenerle parallele al piano contenente l'asse neutro nel caso di flessione.

### *-Analisi caratteristiche del core*

Una semplice trave ricavata da un laminato sandwich può essere uguagliata ad una trave a doppia T dove le pelli rappresentano le ali della trave. Generando un momento flettente la pelle superiore sarà sollecitata a compressione, mentre la pelle inferiore a trazione. Il core trasferirà gli sforzi di taglio causati dall'azione delle due facce superficiali, che modificano la loro lunghezza a causa dell'azione-reazione dei vincoli interni e dei carichi esterni applicati sul pannello, rendendo il quest'ultimo una componente omogeneo. Il core inoltre subisce la maggior parte delle tensioni agenti in direzione perpendicolare. Solo se si garantisce una totale adesione tra core e pelli, si genereranno tensioni tangenziali con un innalzamento del momento d'inerzia; solitamente attraverso un film adesivo si assicura l'incollaggio tra pelli e core nel caso non si raggiungano sufficienti livelli di adesione della pelle. Il core aumentando lo spessore del pannello causerà un innalzamento del momento d'inerzia, il quale misura l'inerzia del corpo al variare della sua velocità angolare. Il riempitivo ricorda l'anima di una trave a T famoso esempio accademico.

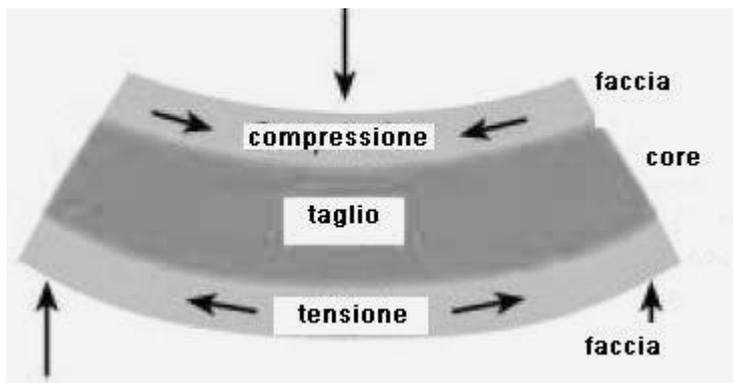


Figura 8 Andamento delle tensione

L'aumento del momento d'inerzia è proporzionale al cubo della distanza tra le lamine e ciò accade solo se garantita una buona resistenza agli sforzi di taglio che nascono all'interfaccia, altrimenti le lamine sottoposte a sollecitazione si comporterebbero come due lamine indipendenti invece di lavorare come se fossero solidali. Perciò lo strato adesivo assolve la fondamentale funzione di resistere alle sollecitazioni tangenziali, senza subire alcun scorrimento, e sopportare gli sforzi normali che possono svilupparsi a causa di un carico esterno, per non avere il distacco del core dalle pelli.

Le strutture che compongono il core sono di tre tipologie fondamentali:

- Balsa : primo materiale a essere usato come core.
- Schiume: richieste dalle esigenze applicative in campo nautico.
- Honeycomb: odierne strutture a nido d'ape.

### *-Criteri di utilizzo*

Oltre all'instabilità globale e ai modi locali di cedimento, per le strutture sandwich il dimensionamento deve essere anche a trazione o compressione e taglio delle pelli, all'azione sinergica delle tensioni nel piano e fuori, a rottura per taglio o trazione-compressione nel piano del riempitivo e dell'adesivo causata da forze normali.

Tali regole possono essere così raccolte:

- spessore adatto delle pelli per resistere al carico limite applicato al sandwich;
- il riempitivo di opportuno spessore e rigidità con resistenza a taglio tale da evitare l'instabilità;
- il riempitivo deve possedere un modulo elastico adeguato e una resistenza a trazione e a compressione nel piano sufficienti sotto carico limite applicato al sandwich;
- il riempitivo deve avere adeguata resistenza a compressione per resistere allo schiacciamento causati dai carichi limite applicati normalmente alle pelli o tensioni di compressione generate da componenti flessionali;

Riassumendo, i passaggi progettuali consistono in:

- analisi dei carichi
- analisi dei vincoli
- scelta della deviazione massima ammissibile.
- scelta del materiale delle pelli
- calcolo dello spessore del sandwich
- scelta dello spessore delle pelli

- scelta del riempitivo
- verifica della deviazione effettiva
- verifica del crimping, wrinkling e dimpling
- verifica caratteristiche in ambiente esterno

Materiali, metodi di assemblaggio del sandwich e caratteristiche progettuali devono essere in accordo con l'ambiente di utilizzo dove il sandwich sarà in esercizio. Definito l'ambiente si aggiungeranno le interazioni con la fatica, scorrimento viscoso, la temperatura, acqua o umidità, particolari fluidi o atmosfere corrosive, e ogni altra condizione che possa influire sulle proprietà dei materiali. Altre caratteristiche supplementari, come conduttività termica, resistenza all'abrasione, permeabilità e proprietà elettriche sono non per ultime considerate al fine di un progetto soddisfacente per adempiere i requisiti funzionali.

Tipiche applicazioni delle strutture sandwich sono:

❖ in campo aeronautico

- pannelli da pavimento e da soffitto
- pannelli da rivestimento per interni
- pannelli per cambuse
- pannelli di cappelliere
- rivestimenti per gondole
- aereofreni
- inversori di spinta
- pale di rotore
- portelloni
- spoilers
- radome cioè una struttura usata per proteggere le antenne radar dalle condizioni meteo sfavorevoli

❖ nell'industria aerospaziale

- strutture di satelliti

- pannelli per capsule
- scudi per i conici a prua
- contenitori e protezioni per l'elettronica

I riempitivi a struttura nido d'ape sono inoltre usati come dispositivi di assorbimento di energia, come protezione contro radiazioni ad alta frequenza, e anche per convogliare flussi aerodinamici e isolamento acustico. Infine i sandwich sono ampiamente scelti nella costruzione dei container, come negli shelter, per gli scafi e negli interni di navi e barche, in parti di abitacolo della gran parte dei veicoli su gomma, ma anche per equipaggiamenti sportivi e costruzioni civili (pareti, porte, divisori).

### - *Costituenti*

Un pannello sandwich è composto a prescindere da tre elementi, ognuno dei quali svolge un compito fondamentale:

-pelli (skin): in base al tipo di applicazione le pelli, a prescindere, opporranno la maggior parte dei carichi applicati. Infatti rigidità, forma, stabilità e la resistenza del sandwich sono assegnate alla pelli, sebbene stabilizzate dal riempitivo. Per svolgere queste funzioni, le pelli devono essere opportunamente solidali e affini ad un riempitivo di qualità.

Qualche volta le pelli svolgono anche altre funzioni come quella di dotare il sandwich di un profilo a bassa resistenza aerodinamica  $c_x$  oppure una superficie rugosa per avere un attrito maggiore oppure di rivestimento forte e duraturo resistente all'abrasione. Al fine di rispettare a tali funzioni, una pelle può essere creata con un particolare spessore o con una modalità produttiva dedicata. Infatti per pannelli usati negli scafi delle imbarcazioni da competizione e offshore, capita che solo la pelle esterna venga rafforzata con un tessuto ibridizzato con fibre polimeriche aggiungendo così tenacità e resistenza all'impatto dovuto ai carichi ciclici d'onda. Poiché meno rigide delle fibre di carbonio, si ovvia a questa carenza con un spessore della pelle di poco maggiorato. Qualunque lamiera o laminato sottile è candidabile ad essere usato come pelle di un sandwich: la scelta più ponderata si basa anche valutando le proprietà meno scontate, tenacità o fragilità, casistica di cedimento, resistenza all'invecchiamento ambientale; ma anche comportamento alla massima temperatura di esercizio dove in base a tale parametro, le strutture sandwich (pelli+riempitivo) sono raggruppate in 4 categorie (max 82°C, max 121°C, max 232°C, max 288°C fino ad alcuni manufatti particolarmente sofisticati che sopportano per brevi periodi temperature di 427°C), ma anche resistenza alla fiamma viva (ignifughi, autoestinguenti, infiammabili), isolamento termico e acustico, assorbimento di umidità, affinità con gli elementi adesivi e di tutte le qualità che possano più o

meno marcare sull'efficienza del manufatto, e le prestazioni strutturali. L'adozione di questi criteri ha, di fatto, provocato il subentro di pelli in composito vetro/epossidica a discapito di quelle in alluminio e di riempitivi aramidico-fenolici rispetto quelli in vetro-resina nella stragrande maggioranza delle pannellature interne degli aeromobili civili. Ad esempio anche Boeing ha ricorso all'adozione di pelli rinforzate con tessuti ibridi carbonio/aramidica nei suoi pannelli.

**-riempitivo:** esso svolge la funzione di stabilizzare le pelli e di sopportazione della gran parte della sollecitazione di taglio trasversale; affinché venga svolto il tutto in maniera efficace, il riempitivo deve essere il più rigido e leggero possibile e deve garantire qualità uniformi ovunque e costanti nel tempo, in correlazione all'ambiente di utilizzo. Di seguito vengono esaminate la principali tipologie di riempitivo:

**-legno:** è il più vecchio materiale riempitivo, adottato ancora oggi negli scafi di natanti (fino a 15m), o nelle pavimentazioni dei velivoli passeggeri e cargo. Tuttavia il tipico vantaggio del basso costo si è ridotto, al contrario della difficoltà di approvvigionamento. Eppure, il suo utilizzo è aumentato, dovuto alla facilità d'uso, come pure all'eccellente durabilità e all'ottima resistenza/rigidezza a compressione.

È solito usare il legno di balsa, mentre abete, mogano e pioppo vengono adottati solo per inserti e finiture. La balsa consente una superiore incollabilità, buon comportamento all'urto ed alla fatica, elevata resistenza specifica e bassa densità.

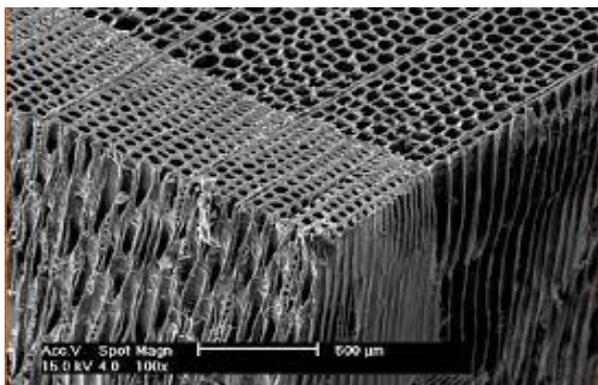


Figura 9 Immagine al microscopio elettronico a scansione del legno di balsa

Questa peculiarità deriva dalla particolare struttura costituita da celle chiuse, allungate e orientate simili ai favi. Siccome le fibre di cellulosa sono posizionate parallelamente all'asse delle cellule, le massime performance meccaniche del legno di balsa sono ottenute disponendo il riempitivo con le fibre disposte in direzione perpendicolare alla superficie del pannello sandwich. Ovviamente le prestazioni meccaniche saranno inversamente proporzionali alla densità della balsa.

-*schiuma*: per sopperire ai principali handicap dei riempitivi naturali, soprattutto quanto concerne l'incostanza delle caratteristiche e la difficoltà di approvvigionamento, sono stati sviluppati riempitivi sintetici con caratteristiche più che soddisfacenti, sia di origine polimerica che metallica.

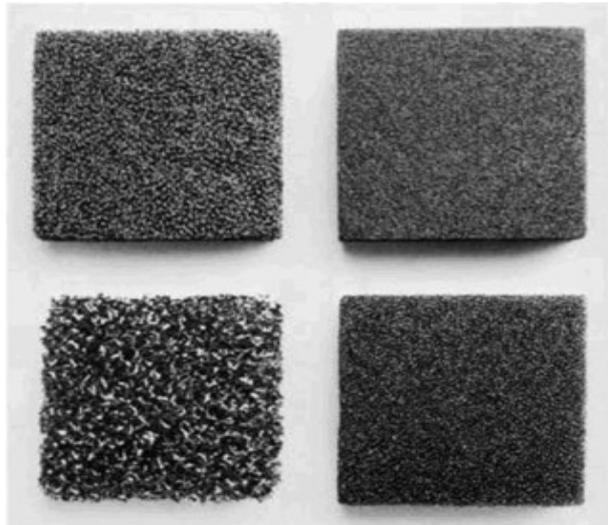


Figura 10 Esempi di schiume a diversa densità

Nello specifico, i polimeri sono trasformati in schiume o lavorati espansi, con processi atti a ridurre la densità. Al contrario, le schiume riempitive metalliche si ottengono miscelando tipicamente leghe di alluminio o di titanio con additivi schiumogeni per poi raffreddare il composto ottenendo un solido poroso. Sono in produzione anche schiume di vetro e di grafite che trovano utilizzo per impieghi a temperature particolarmente alte. Le molteplici tipologie disponibili hanno permesso alle schiume di essere usate massicciamente come riempitivo strutturale fino ad oggi, con una ulteriore diffusione grazie alle moderne tecnologie di iniezione delle schiume.

La più innovativa di tali tecniche consiste nell'uso di uno stampo cavo freddo, nel quale è immessa pressione la schiuma in un singolo passo tecnologico (foamin-place).

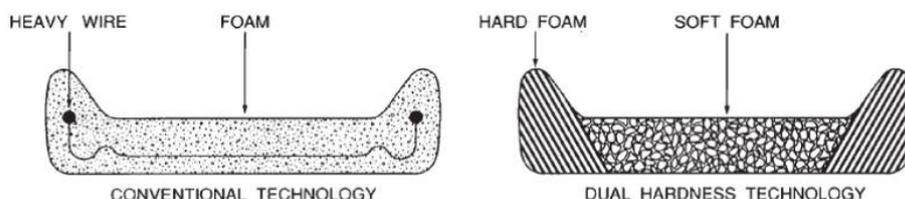


Figura 11 Esempio di schiuma convenzionale e prodotta in FOAMING-PLACE

Solo con una attenta reticolazione e all'effetto della reazione endotermica prodotta dallo stampo, si crea un sandwich, dove le pelli sono costituite da uno spessore a più elevata densità dello stesso polimero costituente il riempitivo. La semplicità ed il basso costo del processo produttivo hanno consentito a una grande applicazione nell'industria dell'automotive. Un'altra tecnologia davvero valida prevede il posizionamento nello stampo chiuso di pelli e eventuali inserti: la schiuma entrando spinta dalla pressione di iniezione sarà dopo la

salificazione sia da riempitivo sia da adesivo per le pelli. Le schiume inoltre conferiscono al pannello sandwich ulteriori proprietà, come l'isolamento termo-acustico o la non interferenza alle onde radio.

Le schiume di polistirene PS sono quelle a minor costo, ormai largamente sostituite da quelle poliuretaniche nei pannelli di coibentazione. Le schiume di polivinilcloruro (PVC) erano largamente usate come riempitivi di pavimentazioni leggere, ma col tempo sono state rimpiazzate dai nidi d'ape aramidici.

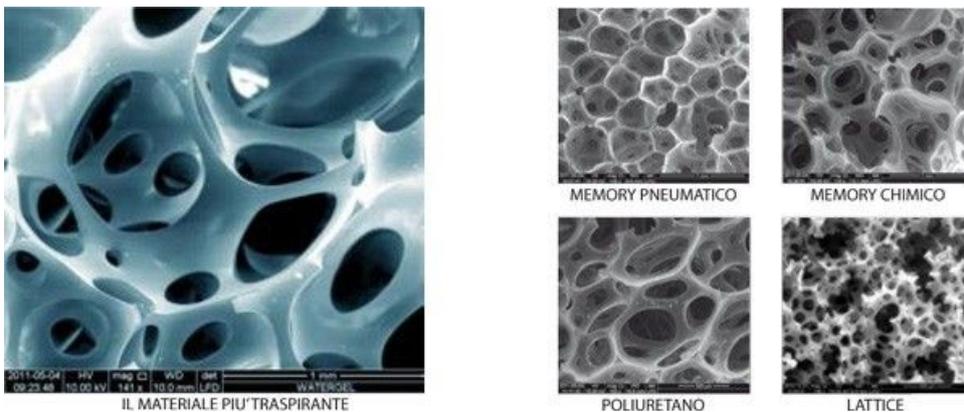


Figura 12 Porosità differenti in base all'origine del materiale

Poiché tecnologia del foam-in-place comporta persistenti problemi di standardizzazione per quanto riguarda l'adesione tra riempitivo e pelli, l'industria con alte esigenze specifiche, specialmente quella aerospaziale, adotta schiume polimeriche date sottoforma di lastre pre-reticolate a spessore, che sono facilmente lavorabili alle macchine utensili, tagliate a filo caldo, e se costituite da un polimero termo-plastico infine termoformate.

Altra peculiarità importante delle schiume è nella struttura delle celle; la possibilità che esse siano aperte o chiuse determina in le proprietà funzionali quali:

- assorbimento di umidità;
- coefficiente di conducibilità termica;
- isolamento acustico;
- capacità di lavorare in ambienti con alte depressioni come lo spazio;

Si evince quindi che a parità di materiale, le qualità meccaniche sono dipendenti dalla densità della schiuma. Ciò va tenuto in conto nel momento in cui si vogliono creare pannelli sandwich mediante formatura in autoclave o con presse riscaldate: infatti alcune schiume polimeriche a minore densità non resistono ad elevate pressioni di formatura e/o di incollaggio.

Per quanto riguarda le schiume di natura metallica tipicamente leghe di alluminio o titanio possono essere a struttura trabecolare, detta così poiché paragonata alla struttura ossea.

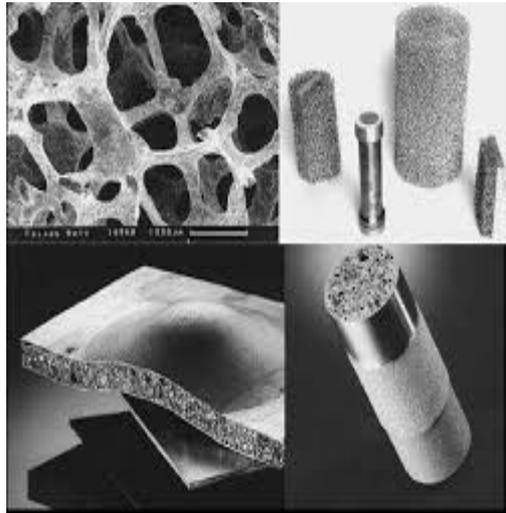


Figura 13 Schiume metalliche

Queste sono utilizzate nei processi come catalizzatori o come mezzi capaci di ridurre i fenomeni di sloshing (movimento di liquidi all'interno dei serbatoi, comunemente carburanti e liquidi alimentari)

Esistono anche a cella chiusa, infatti vengono adoperate per creare sistemi di assorbimento di energia, dove si dimostrano apprezzate per duttilità ed isotropia consentendo di creare apparati ad assorbimento non preferenziale, o come riempitivi delle strutture sandwich.

*-nido d'ape:* è realizzato in carta impregnata di resina, o con carta aramidica, nonché in tessuti in fibre di vetro o grafite anch'essi imbevuti, costituiti da diversi tipi di polimero o di leghe d'alluminio. Raramente vengono impiegate leghe di titanio o acciai inox. La gran parte dei favi viene creata incollando assieme dopo attenta selezione sottili fogli (o lamiere) di materiale, che in seguito subiranno il processo di espansione. Se è richiesto un nido d'ape metallico, a partire da lamierini poco più spessi, questi ultimi vengono prima lievemente increspatis e poi appoggiati tramite incollaggio, brasatura o saldatura LASER o a fascio di elettroni, metodi che garantiscono giunti estremamente resistenti con una deformazione minima.

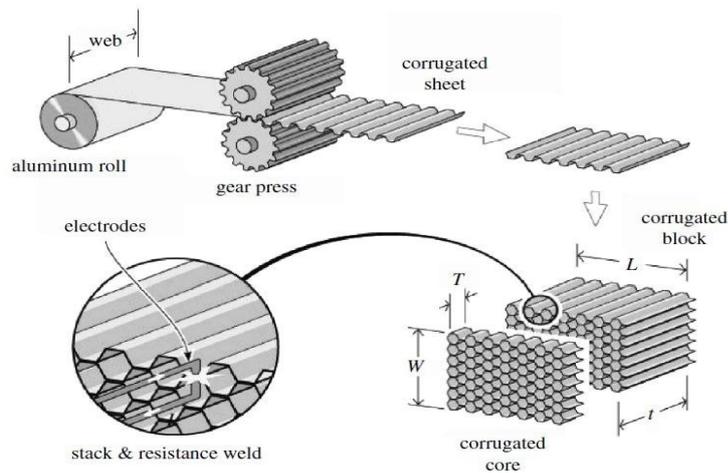


Figura 14 Corrugazione del laminato ed elettrosaldatura nella creazione di nidi d'ape metallici

Le proprietà fisiche e meccaniche del nido d'ape sono altamente influenzate dalle caratteristiche del materiale di fabbricazione. Anche la geometria del nido d'ape influenza qualità come:

- densità: tutte le caratteristiche meccaniche migliorano ad un aumento della densità;
- forma della cella: poiché i nidi d'ape sono ortotropi le prestazioni che si avranno dal materiale sono in base alla direzione di applicazione del carico. È noto anche che alcune forme sono più facilmente formabili rispetto ad altre. Dunque queste sono quindi più idonee alla realizzazione manufatti curvi con spessore importante. Una variazioni nella forma della cella può essere richieste espressamente dal fornitore oppure involontariamente causate dall'utilizzatore, ma in entrambi i casi può alterare fino al 30% sia la densità che il grado di ortotropia del corpo;

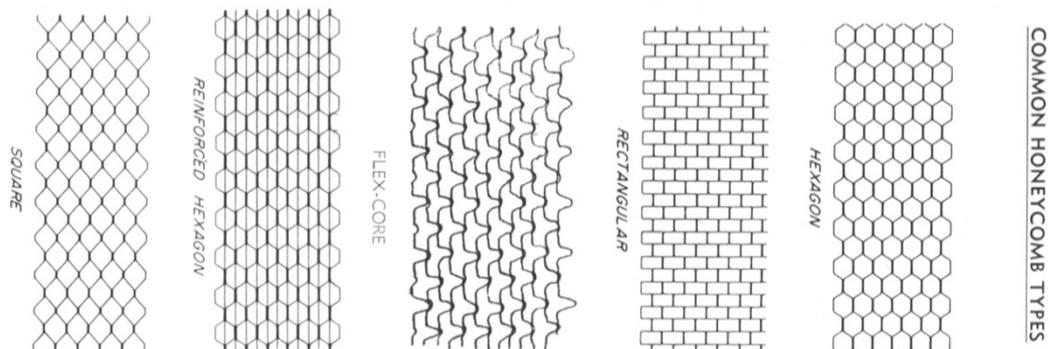


Figura 15 Tipologie di nido d'ape più performanti

- dimensione della cella: sebbene influenzi debolmente le proprietà meccaniche del core, essa è necessaria per definire la propensione all'incollaggio delle pelli al riempitivo e per determinare il livello di tensione limite di taglio;
- spessore: lo spessore dei laminati in fogli da dove è ricavato nido d'ape influenza apertamente la densità, le qualità meccaniche del riempitivo e i valori critici del forme di instabilità locale;

$X_1$ ↑ $X_2$ →	Relative density $r = \rho^* / \rho_s$	$E_1^* / E_s$ or $E_2^* / E_s$	$G_{12}^* / E_s$	$\sigma_{pl}^* / \sigma_{ys}$	$\tau_{pl}^* / \sigma_{ys}$	$(\sigma_{pl}^*)_3 / \sigma_{ys}$
Square Cell 	$2 t/l$	$0.5 r$	$0.0625 r^3$	$0.5 r$	$0.125 r^2$	$r$
Hexagonal Cell 	$(2/\sqrt{3}) t/l$	$1.50 r^3$	$0.375 r^3$	$0.5 r^2$	$0.217 r^2$	$r$
Triangular Cell 	$2\sqrt{3} t/l$	$0.333 r$	$0.125 r$	$0.5 r$ $0.333 r$	$0.289 r$	$r$
Kagome Cell 	$\sqrt{3} t/l$	$0.333 r$	$0.125 r$	$0.5 r$ $0.333 r$	$0.289 r$	$r$
Diamond Cell 	$(5/\sqrt{3}) t/l$	$0.4 r$ $0.2 r$	$0.15 r$	$0.6 r$ $0.2 r$	$0.346 r$	$r$
Rectangular Cell 	$\frac{at_2 + bt_1}{ab}$	$t_1/a$ $t_2/b$	$\frac{t_1^3 t_2^3}{ab(at_1^3 + bt_2^3)}$	$t_1/a$ $t_2/b$	$\frac{1}{2} \frac{t_2^2}{ab}$	$r$

Figura 16 Rapporti di tensione in base alla geometrie degli honeycombs

Il nido d'ape di semplice carta, per primo fu usato dai cinesi 2000 anni or sono ma non offre caratteristiche meccaniche abbastanza soddisfacenti . Al contrario, quello polimerico rafforzato con fibre di vetro è molto usato nei componenti elettrici come schermatura, oppure nel caso sia necessario contrastare la dispersione termica.

Ma il nido d'ape più adoperato è ancora oggi quello in alluminio, poiché è il più polivalente e con a favore un rapporto qualità/prezzo conveniente.

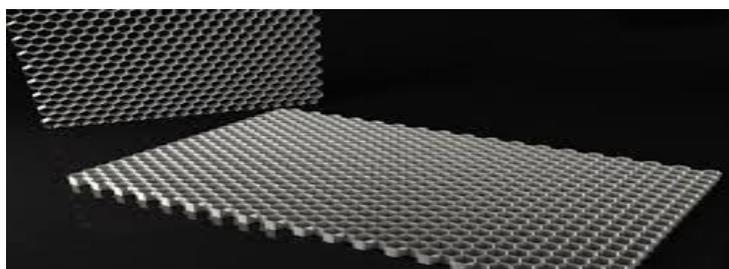


Figura 17 Nido d'ape metallico

Per quanto riguarda quello in carta aramidica è composto da un materiale del tutto sintetico, assai tenace e resistente all'urto, brevettato dalla società DuPont con il nome comune di Nomex.

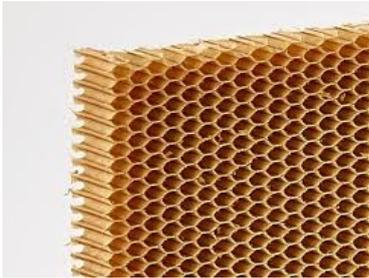


Figura 18 Nido d'ape aramidico

Esso viene realizzato da fibre aramidiche discontinue, ma sempre espanso come per il core metallico, e successivamente intriso per immersione in resina fenolica. Si riscontrano proprietà meccaniche più basse il modulo a quelle ad un nido in alluminio e solo una parziale avversione alla combustione. Però al contrario, sopporterà sovraccarichi in aree localizzate, senza rovinarsi in modo permanente. La fibra aramidica, per l'innata tenacità e resistenza conferisce al riempitivo leggerezza ( $16-48kg/m^3$ ) quindi una predisposizione ad applicazioni prestanti e di nicchia come pannellature interne per pareti o soffitti di aerei di linea, anche in unione a pelli molto sottili (0.25mm) di composito vetro/resina epossidica. Tuttavia nelle massime competizioni automobilistiche della Formula 1, il nido d'ape metallico per via della sua duttilità e tenacità, rimane lo standard a cui gli ingegneri telaisti si affidano, unendolo a pelli in fibra di carbonio.



Figura 19 Esempio applicativo di sandwich con core a nido d'ape metallico per musetto anteriore monoposto F1

Si ricorda però che pelli e riempitivo devono obbligatoriamente essere scelti al fine da evitare l'incompatibilità termo-elastica ed elettro-chimica. Di fatti l'unione di pelli di carbonio/riempitivo metallico viola tale regola, ma è fatta eccezione valutato l'ambiente di utilizzo, come per i veicoli spaziali che operano in luoghi senza atmosfera quindi senza umidità, o nel caso di vita utile

del manufatto sufficientemente breve da non creare problemi di corrosione galvanica come nel caso delle monoposto a ruote scoperte.

*-corrugato*: il riempitivo corrugato è creato per mezzo di uno stampaggio partendo da una lamiera metallica o tramite formatura di un composito pre-impregnato, modalità finalizzate alla realizzazione di increspature sinusoidali sulla superficie. Nei sandwich a singola e doppia linea di corrugazioni, queste si sviluppano lungo una linea parallela alle pelli, contrariamente agli honeycomb che hanno una disposizione perpendicolare alla pelle. I riempitivi corrugati possono essere formati per pannelli curvi a patto che comporti una sola curvatura.

Particolare corrugazione da ricordare, è quella derivante dall'uso delle lamiere a cialda, ottenute mediante stampaggio da lamiere metalliche o per formatura di pre-impregnati in composito, così da raggiungere una trama di imbuture a forma quadrata, ma anche rettangolare e triangolare.



Figura 20 Pressa a cialda

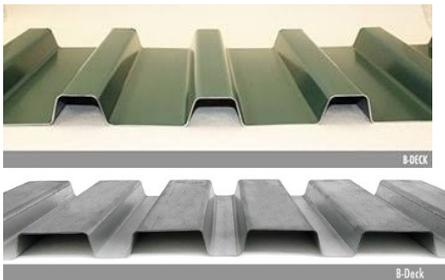


Figura 21 Rispettivamente corrugato quadrato, rettangolare e triangolare

*-adesivo*: l'ultimo elemento costitutivo di un sandwich ma non meno importante, è l'adesivo, differente dai comuni in commercio poiché in queste applicazioni durante la reticolazione c'è il rischio che si vengano a liberare composti gassosi capaci d'innescare potenziali conseguenze pericolose come la separazione della pelle dal riempitivo, la dislocazione o la corrosione. Gli adesivi per sandwich posseggono maggior tenacità intesa come resistenza all'avanzamento della cricca all'interfaccia d'incollaggio, adattabilità grazie alla capacità di riempire possibili imperfezioni dimensionali o errori di accostamento, capacità di creare giunzione tra la pelle ed il margine della cella,

resistenza allo squeezing. Le tipologie di resine in grado di rispettare queste richieste sono:

- fenoliche (neoprene-fenoliche, nitrile-fenoliche, poli-vinil-fenoliche);
- epossidiche (epossidico-fenoliche, epossidiche poliammidiche, epossidiche a bassa temperatura)
- poli-aromatiche ( polimidiche, copolimidiche amidiche);
- uretaniche
- inorganiche (ceramiche).

Tra tutte, la scelta opportuna si effettua in base del ciclo di reticolazione, alla massima temperatura di esercizio, al coefficiente di espansione termico, ai risultati meccanici richiesti da progetto, ma anche alla tipologia di pelli e riempitivo da incollare. Altro aspetto di rilevante importanza da tener conto è nella forma con cui l'adesivo viene reso disponibile, cioè:

- fluido viscoso
- pasta o stucco
- schiuma sintattica
- film supportato con tessuto di vetro o nylon
- film non supportato
- film auto-adesivo

### *-Fabbricazione*

Per fabbricare una struttura sandwich bisogna affrontare e risolvere le problematiche come:

- preparazione del riempitivo
- preparazione delle pelli
- preparazione dell'adesivo
- unione di pelli e riempitivo

Queste problematiche saranno affrontate dettagliatamente in questo paragrafo, mentre i problemi legati alle giunzioni, gli inserti ed i dettagli di progettazione in generale affrontati nel paragrafo seguente.

*-preparazione del riempitivo:* per il produttore della struttura sandwich, il riempitivo è considerato un materiale grezzo che deve essere tagliato, contornato, formato e giuntato, operazioni che devono rispettare la natura del core stesso. I riempitivi a nido d'ape sono tagliati con seghe a nastro a denti fini e velocità di taglio di 400-3500 m/min con precisioni di decimi di millimetro. A causa della loro inconsistenza allo stato espanso, prima di qualsiasi lavorazione con macchine utensili è necessario procedere con la loro stabilizzazione che consiste nel riempire le celle con acqua, la quale è successivamente congelata, oppure con polietilene glicole (PEG) usato come consolidante, o con un'altra di schiuma polimerica sempre solubile in acqua. Ad esempio in contornatura con opportune frese si raggiungono velocità di taglio tra i 1150 e i 31000 giri/minuto. I nidi d'ape possono anche essere termoformati o sottoposti a calandratatura (nel caso in cui si adoperino celle di forma a priori formabili che non inducono forme a sella). Le classiche giunzioni tra porzioni di nido d'ape consistono nel sovrapporre i lembi troncati all'estremità della cella o nel sovrapporre due lati degli honeycombs da congiungere, in modo da assicurare migliori performance strutturali.

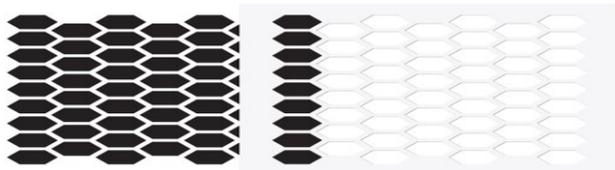


Figura 22 Modalità sovrapposizione degli honeycombs

Per quanto riguarda i riempitivi generati per schiumatura "sul posto", derivano dalla reazione esotermica di resine con produzione di  $CO_2$ . Per essere adeguata, la miscela versata nello stampo, si espande alla temperatura di 10 – 90 °C, prima reticolare a temperature poco più alte.

*-preparazione delle pelli:* affinché sia assicurata una buona adesione riempitivo/pelli metalliche, queste ultime devono essere dapprima sgrassate accuratamente con acetone, alcool isopropilico o solventi come diluente nitro, da impurità oleose o ossidi. Per alcuni metalli è di norma procedere con un attacco chimico; con altri, suscettibili alla corrosione, si preferisce per l'applicazione di speciali rivestimenti protettivi. Comunque sia, una volta effettuata l'operazione, si controlla con metodi non distruttivi CND, ad esempio il water-film test, prima di proseguire con l'incollaggio, entro un tempo limite di 8 ore.

Ogni metallo ha la sua procedura di preparazione:

- alluminio: pulizia con solvente (acetone/toluene); sgrassaggio con vapore di tricloroetilene; attacco chimico in soluzione acquosa di bi-cromato di sodio e acido solforico a 70 °C;
- magnesio: passaggio con bi-cromato di sodio; anodizzazione; protezione con primer al cromato di zinco;
- acciaio inox: sabbiatura a vapore seguito da attacco chimico in soluzione acquosa di bi-cromato di sodio e acido solforico;
- titanio: pulizia con solvente esente da Cloro, immersione in soluzione alcalina calda; sabbiatura; attacco chimico in soluzione acquosa di acido idrofluoridrico e acido nitrico.

*-preparazione dell'adesivo:* dopo la preparazione di riempitivo e pelli, si applica l'adesivo, procedendo in base alla forma in cui esso viene fornito: a spruzzo per le formulazioni liquide, a pennello o rullo per le più viscosi. Le applicazioni particolari richiedono solitamente adesivi in film, i quali devono solamente essere posizionati. La quantità di adesivo da usare dipende da differenti fattori, quali la sua natura, la tipologia di superfici da attaccare, la velocità con cui stendere durante l'incollaggio.

Al termine della procedura bisogna assicurare uno spessore ottimale di 0.05-0.10 mm per stesure a spruzzo e pennello oppure 0.1-0.70 mm per il film adesivo, il che corrisponde a circa 80-900 g/m<sup>2</sup>.

Gli spessori maggiori sono utilizzati per riempitivi a nido d'ape per garantire una totale copertura ai lati della cella.

Nell'eventualità di adesivi fluidi per incollare pelli e nido d'ape, essi si devono applicare al riempitivo anziché alla pelle.

Il tempo di assemblaggio, che intercorre tra la stesura dell'adesivo e l'attivazione della reticolazione alla giusta pressione e temperatura, deve essere accuratamente controllato, affinché si disperdano i solventi volatili, fuoriuscendo dal film, e si inneschi un primo consolidamento. Questo però non deve prolungarsi a lungo per non abbassare troppo la scorrevolezza e la bagnabilità dell'adesivo durante la fase finale dell'incollaggio. Il consolidamento è ammesso sia ad assemblaggio aperto oppure con le interfacce aderenti in posizione. Solitamente per pannelli in materiale sandwich si adotta la prima soluzione.

Il tempo di assemblaggio può variare da 30 minuti, per adesivi liquidi e tempi di reticolazione rapidi, a 8-24 ore per adesivi polimerizzabili ad elevata temperatura. Solitamente si velocizza la stabilizzazione dell'adesivo con un ciclo pre-reticolazione in forno da 30 minuti a 2 ore, a temperatura tra 80-110°C. I valori dei parametri del ciclo di reticolazione reali però dipendono dalla formulazione del collante, dalla forma di giunzione e dalle sue condizioni operative: di norma si impostano temperature nella fascia 160-180 °C per una durata da 30 minuti a 120 minuti.

Contemporaneamente si applica una adeguata pressione con lo scopo di:

- ottenere uniformità di spessore nell' adesivo;
- vincere la viscosità dell'adesivo;
- vincere la pressione interna creata dai solventi;
- rimediare alle imperfezioni di superficie delle pelli;

La pressione sarà la stessa per tutti gli adesivi e per tutti gli incollaggi; contrariamente, essa deriva dal tener conto delle dimensioni delle parti da incollare, dalla precisione da garantire, dalla viscosità dell'adesivo e dalla pressione generata dai solventi. Di norma, si applica la massima pressione sopportabile dal riempitivo genericamente da 1 a 14 bar, sempre sotto il continuo controllo affinché si eviti lo schiacciamento.

Infine si rammenta che, nelle strutture sandwich metalliche per applicazioni ad alta temperatura, il riempitivo e le pelli vengono uniti per saldatura o brasatura. Dopo la pulitura superficiale e attacco acido, si effettua la giunzione in vuoto o in atmosfera controllata per scongiurare casi di corrosione; i metalli d'apporto di brasatura sono costituiti da leghe di nichel o di argento. Nel caso in cui riempitivo consta in lamiere corrugate, esse vengono solidarizzate alle pelli tramite una saldatura per punti.

*-unione di pelli e riempitivo:* i componenti sandwich derivano da infinite combinazioni di pelli e riempitivo e possono assumere le configurazioni più disparate: piane, a semplice e doppia curvatura.

Dunque, si adotta una tecnica di fabbricazione perfettamente adattabile alla particolare combinazione dei componenti, alla forma e alle dimensioni. Le modalità di fabbricazione possono essere divise in classi in base all'entità della curvatura, alla tipologia di pelli e di riempitivo, al tipo di macchinario utilizzato o del metodo di applicazione della pressione; secondo questo ultimo criterio si può avere:

- pressione esercitata per mezzo di fluido: è una modalità riconducibile ai processi di formatura dei materiali compositi. Essa consta nel collocamento di pelli e riempitivo su uno stampo avente la forma desiderata e per il loro incollaggio si fornisce calore e pressione grazie ad un fluido contenuto in un sacco. Sono ammessi sia aria, che vapore, o una loro miscela ma anche un gas inerte. Tale tecnica è ristretta ai soli casi in cui non sono usufruibili altri metodi come la presenza di curvature doppie, curve accentuate, di spessori variabili, dimensioni così grandi da dissuadere dall'uso di stampi e controstampi o per produzioni su commissione.
- pressione applicata da stampi rigidi: la forza viene applicata per mezzo di una pressa idraulica dotata di semistampi riscaldati o da meccanismi a vite senza fine, facendo attenzione nel prevedere dei fine-

corsa affinché si scongiuri lo schiacciamento del core. Per questa tipologia di fabbricazione le tolleranze dimensionali del riempitivo e la pressione di incollaggio, sono parametri di estrema importanza per la buona riuscita del manufatto finale. Nel caso di laminati, per evitare disomogeneità di pressione, i piani della pressa devono essere stati progettati con grande accuratezza, mentre le tolleranze di spessore del sandwich saranno obbligatoriamente molto strette. Tali premesse però sono di solito difficili da rispettare, perciò capita che si adottano attrezzature extra, in grado di applicare una pressione idraulica aggiuntiva ad un lato del sandwich. Tipicamente si fa ricorso a sottili cuscini in gomma riempite di un fluido non comprimibile, come quella mostrata in Figura.

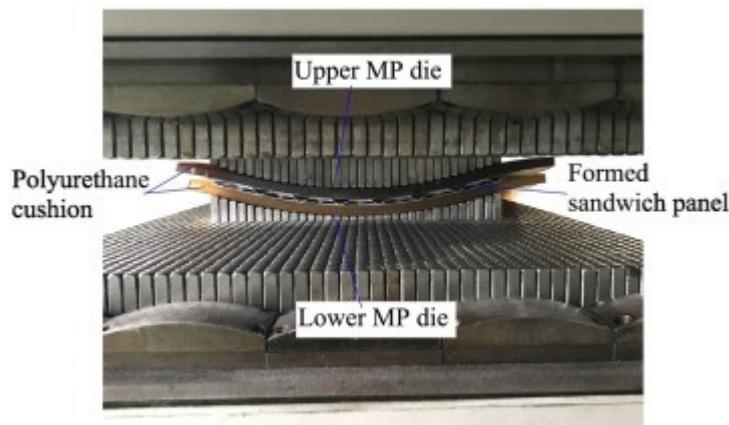


Figura 23 Pressa con cuscino d'aria

L'acquisto di stampi rigidi per la creazione di sandwich a semplice o doppia curvatura è oneroso, si ripagherebbe solo per produzioni numerose. Per questi casi, affinché si ottimizzi il ciclo produttivo, gli stampi sono dotati di sistema di riscaldamento grazie alla circolazione di olio, vapore surriscaldato o l'inserzione di resistenze elettriche. Malgrado ciò, l'esatto valore di pressione applicata localmente in un sandwich da una coppia di stampi rigidi, di rado può essere conosciuto a causa di molteplici fattori (grado di curvatura, precisione di forma e dimensioni, rigidità del sandwich e degli stampi); per questa ragione l'adozione di questo tipo di fabbricazione è sconsigliabile per la produzione di parti strutturali.

- pressione applicata da stampi semirigidi: alle volte, per ricreare l'azione esercitata da un fluido, vengono adottati piani o stampi la cui superficie è costituita da un materiale deformabile come ad esempio di tessuto, feltro o gomma. Tale espediente assicura una migliore distribuzione della pressione rispetto ad uno stampo rigido, a patto che le sue caratteristiche siano conciliabili con quelle del sandwich da produrre. L'uso di un unico stampo semirigido permette la creazione di

una superficie liscia (quella formata dallo stampo rigido) ed una corrugata (quella derivante dallo stampo semirigido). Con l'adozione di due stampi semirigidi si avrà un sandwich con entrambe le superfici irregolari.

- pressione applicata dal riempitivo espandibile: in questo caso la pressione deriva dal riempitivo stesso quando viene creato con la tecnica di schiumatura sul posto. Non c'è necessità di fornire una pressione esterna, ma solamente usare uno stampo esterno di contenimento, che fornisca il calore necessario all'espansione e reticolazione del riempitivo. La tecnica di fabbricazione prevede l'iniziale allestimento delle pelli ed il loro posizionamento nello stampo chiuso, cui seguirà l'iniezione del polimero liquido non reticolato, che espandendo ed in seguito reticolando, assicurerà l'adesione tra riempitivo e pelli. Per garantire la buona riuscita dell'operazione bisogna decontaminare le superfici delle pelli tramite sabbiatura.

### *Problematica della curvatura*

Componenti contrassegnati da una unica piccola curvatura possono essere fabbricati adattando il riempitivo e le pelli in uno stampo concavo e successivamente imprimendo pressione con uno controstampo aggiuntivo o con un sacco da vuoto. Nel caso di marcata curvatura, diventa difficoltoso adattare il sandwich allo stampo e tenerlo unito ad esso. Inoltre, la curvatura anticlastica, che la maggior parte dei riempitivi tende a assumere quando viene flessa, provoca delle difficoltà anche a curvature moderate. Ciò trova riscontro nel caso dei nidi d'ape: la gravità dei problemi dovuti alla curvatura anticlastica cambia in base allo spessore. Esso assume un ruolo importante anche per quanto concerne il raggio di curvatura imprimitibile senza provocare cedimenti. Se si necessita di raggi di curvatura più piccoli, si ricorre a modalità differenti come acquistare riempitivi già formati da termo-formare se in polimero termoplastico o impregnare in seguito se in polimero termoindurente. È consentito anche adottare una formatura a vapore, tipica per il legno.



Figura 24 Metodo di curvatura tratto dalla falegnameria

Essa consiste nell'incollaggio del core ad una sola pelle, che si uniscono su uno stampo convesso; l'altra pelle verrà incollata sulla superficie concava a posteriori. Il riempitivo da incurvare è bloccato da dei punzoni applicati ai fogli in lamiera e curvato su di un apposito stampo, affinché il metallo subisca la sola trazione ed il riempitivo si deformi per compressione.

Per determinare una doppia curvatura in un sandwich si è vincolati dai materiali costituenti. In genere, la realizzazione di più curve implica sempre difficoltà di realizzazione tecnologica.

Parti con una semplice doppia curvatura possono essere realizzate in un passo, come parti piane o a singola curvatura: nel caso sia possibile, il riempitivo in un pezzo unico viene deposto tra le pelli, altrimenti rigidità e spessore permettendo, esso viene segmentato in pezzi minori e poi ricomposto.

Per doppie curvature molto rilevanti invece, si può ricorrere tecniche da uno a tre passi:

- one move: per pelli e nido d'ape in composito e matrice termoindurente o termoplastica;
- two move: formatura di pelli e schiumatura sul posto del riempitivo;
- three step: formatura delle pelli metalliche, preformatura del riempitivo in balsa, incollaggio.

Per concludere, va menzionato che le tecniche che prevedono il contatto tra le pelli del sandwich e gli stampi bisogna usare lubrificanti e distaccanti, per evitare l'adesione e l'alterazione indesiderata del manufatto durante la sformatura. Tra i distaccanti più comuni possiamo annoverare:

- cere liquide o solide
- resine siliconiche
- lecitina vegetale
- metil-cellulosa
- alcool polivinilico
- sali come stearato di alluminio o di zinco
- polivinilfluoruro

Nell'eventualità in cui le pelli dovranno essere in un secondo tempo incollate o verniciate, ogni traccia del distaccante dovrà essere rimossa, solitamente tramite sabbiatura.

## *Accorgimenti*

In definitiva è buona norma elencare pochi accortezze da mettere in atto affinché si garantisca una buona qualità produttiva dei manufatti in sandwich:

1. Controllare che il riempitivo abbia riempito totalmente il volume che gli è riservato, al fine di scongiurare vuoti e eccessi indesiderati di adesivo;
2. Per riempitivo in nido d'ape, con presenza di inserti solidi, si rammenta che lo spessore di adesivo reticolato in prossimità del core risulterà maggiore di quello in corrispondenza degli inserti. Dunque lo spessore del riempitivo dovrà essere maggiore di un paio di decimi di millimetro rispetto a quello degli inserti;
3. Temperatura di incollaggio accuratamente controllata in corrispondenza dell'adesivo, anche per mezzo di sensori lasciati in funzione per la tutta durata dell'operazione;
4. Occorre controllare la distribuzione dei gradienti termici poiché le strutture sandwich leggere possono torcere durante il raffreddamento. Gli inserti di grande massa o pelli di differente spessore/materiale, che hanno conducibilità differenti, concorrono anche loro a questo problema;
5. Oculata previsione per quanto concerne il drenaggio dell'aria e dei gas, affinché non rimangano intrappolati entro il sandwich l'incollaggio;
6. Garantire il valore ottimale dello spessore di adesivo, e quindi la massima resistenza meccanica strette tolleranze dimensionali e di forma per i singoli elementi costituenti il sandwich, come per bordi e inserti.

## *Dettagli, inserti e giunzioni*

I fini principali che la progettazione delle strutture sandwich si predispone sono la riduzione di peso, l'aumento di rigidità o il contenimento nell'uso di onerosi materiali delle pelli. In certe circostanze si mira alla riduzione dei costi di produzione, al miglioramento della finitura superficiale, isolamento acustico e abbassamento del rumore.

Sebbene, la progettazione deve porre rimedio a come sopportare e trasferire carichi, collegare elementi strutturali, proteggere il sandwich

dall'ambiente esterno, si può affermare che il lavoro dell'ingegnere consta nel realizzare efficientemente le particolarità richieste, rispettando vincoli di deformazione, peso, costo.

Di seguito elencate importanti disposizioni:

- *ottimizzare i passaggi di fabbricazione*: il costo per un manufatto in sandwich viene stimato all'atto del progetto, ma la scelta della modalità produttiva può incidere pesantemente tanto da far apportare variazioni progettuali, fatta eccezione solo nel caso di esplicite esigenze del committente o di design.

- *usare il giusto tipo di riempitivo*: è buona regola usare riempitivi con diversa densità in un singolo pannello quando soggetto a sollecitazioni differenti. Si interverrà localmente con l'opportuno materiale in base al carico che solleciterà la zona in questione. Per ultimo i due tipi di riempitivo dovranno essere giunti con un adesivo ad espansione .

- *usare diverse tecniche di giunzione nella stessa parte*: gli inserti incorporati nella struttura sandwich possono essere creati per forgiatura, saldatura, rivettatura o per incollaggio grazie ad adesivi con cui è possibile realizzare incollaggi secondari a temperature tra 15-180 °C senza declassare alcuna proprietà meccanica;

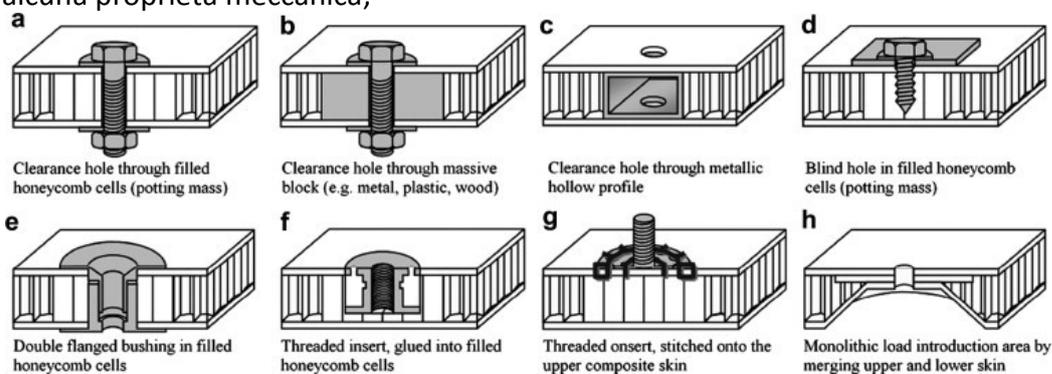


Figura 25 Tipologie di inserto

- *usare bulloni e rivetti per sopportare i carichi*: nei velivoli quando lo spazio non consente di usare doublers o grandi coprigiunture da incollare, l'adozione di bulloni o rivetti rappresenta l'unica soluzione, a discapito dell'aumento di peso e della vita a fatica.

- *usare doublers localizzati anziché spessori delle pelli maggiorati*: l'adozione di doublers, benché aumenti i costi di produzione migliora la qualità del prodotto finale; il loro utilizzo è semplice da adottare per di pelli costituite da laminati compositi;

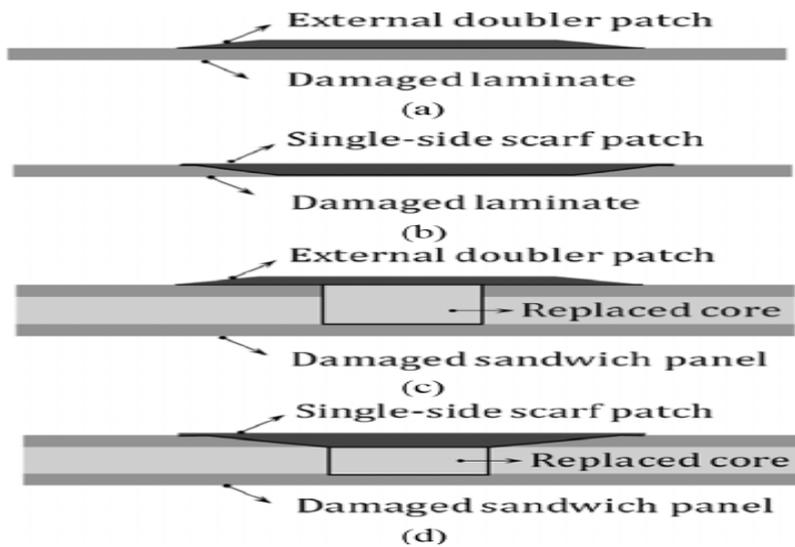


Figura 26 Esempi di doublers di giunzione

- cura nell'organizzazione dei bordi e nelle modalità di diffusione dei carichi: poiché i componenti sandwich sono collegati tra di loro e/o a una struttura di supporto, vanno organizzati mezzi atti a trasferire le sollecitazioni subite. In generale le strutture sandwich sono vincolate lungo la bordatura: è buona norma quindi predisporre una costruzione perimetrale per agevolare lo spostamento dei carichi. Sono adoperabili differenti soluzioni, da prediligere in base all'entità dei carichi, al tipo di pelli e riempitivo, alle funzionalità. Inoltre, il progettista di un manufatto in sandwich deve assicurarsi che le tensioni possano essere trasferite dai bordi in punti di scarico concentrati. Dunque possono essere disposti degli inserti a strisce oppure di tasselli localizzati. Inoltre se la dimensione del pannello sandwich è superiore a quella dei formati di pelli disponibili sul mercato, vanno studiati adeguati metodi di giunzione tra queste ultime. Questa operazione non è difficoltosa se le pelli sono in laminato composito; al contrario pelli in lamiera devono venir con giunzioni o brasatura.

# Analisi sperimentale: proprietà meccaniche e formabilità

Lo studio mira ad analizzare il comportamento a deformazione di un composito sandwich a tre strati ottenuto assemblando uno strato polimerico di core tra due sottili lamine di copertura in acciaio libero interstiziale ad alta resistenza. Al fine di studiare l'influenza dell'orientamento delle fibre sulla resistenza e sulla duttilità del sandwich composito MPM, si eseguono prove di trazione monoassiale su campioni con diversi orientamenti angolari rispetto alla direzione di laminazione (*rolling direction RD*) delle lamiere. I valori di anisotropia normale e planare sono stati calcolati anche eseguendo prove di trazione interrotte nel campo della deformazione uniforme. La formabilità del sandwich metallo-polimero-metallo, sia in termini di altezza limite della cupola che di curve limite di formabilità, in funzione della RD, è stata valutata mediante prove di punzonatura emisferica. L'atteggiamento di assottigliamento dei pannelli MPM è stato anche studiato misurando lo spessore di ogni strato costitutivo lungo la sezione trasversale radiale del campione a forma di disco per diversi avanzamenti del punzone. Infine, il comportamento a deformazione del sandwich è stato correlato alla modalità di rottura dalla frattografia effettuata in un microscopio elettronico a scansione (SEM).

## Forming-limit Diagrams (FLD)

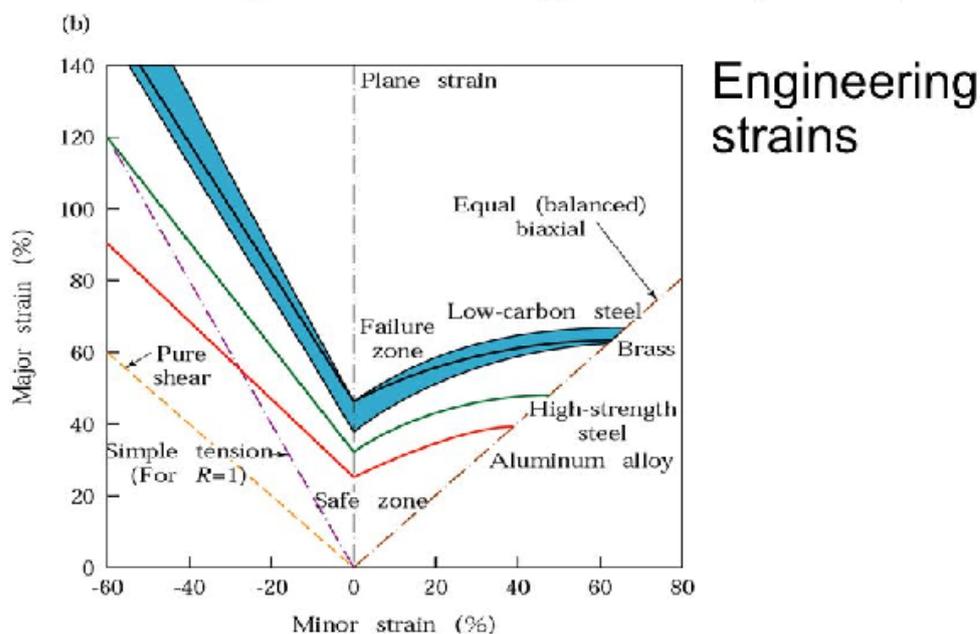


Figura 27 Diagramma di formabilità

## *Procedure materiali e sperimentali*

-*Prova a trazione* monoassiale: il composito sandwich MPM a tre strati è stato ottenuto dall'incollaggio di riempitivo in resina di polipropilene-polietilene (PP-PE), dello spessore di 0,4 mm, con due fogli di copertura in acciaio libero interstiziale ad alta resistenza per la formatura a freddo (HX220Y), ciascuno dello spessore di 0,2 mm. Il processo di fabbricazione consiste in un processo di incollaggio a due stadi in laminazione. Nella prima fase, uno strato adesivo dello spessore di 10  $\mu\text{m}$ , è stato applicato sulla lamiera d'acciaio e indurito a 260 °C per la sua attivazione. Poi, il core polimerico è stato riscaldato a 120 °C e incollato alla pelle in d'acciaio. Nella seconda fase, il manufatto acciaio-polimero è stato accoppiato alla seconda lamiera d'acciaio pretrattata per ottenere l'intero sandwich.

La resistenza e la duttilità del composito sandwich MPM sono state valutate per mezzo di prove di trazione monoassiali eseguite secondo le norme ASTM E8/E8M e BS EN 895, su una macchina servo-idraulica (MTS 810<sup>®</sup>) equipaggiata con una cella di carico da 250 kN.



Figura 28 Macchina per prova a trazione

Una velocità costante della testata di 0,1 mm/s è stata imposta durante le prove effettuate a temperatura ambiente. La deformazione istantanea lungo la direzione del carico è stata misurata usando un estensimetro bloccato sul campione.



Figura 29 Modalità di applicazione dell'estensimetro

I campioni sono ottenuti con il taglio a getto d'acqua (waterjet cutting) con l'asse di orientazione a 0°, 45° e 90° rispetto alla direzione di laminazione delle pelli d'acciaio. Inoltre, anche le proprietà meccaniche delle pelli di copertura in HX220Y, dello spessore di 0,2 mm, sono state analizzate a 0°, 45° e 90° rispetto alla RD.

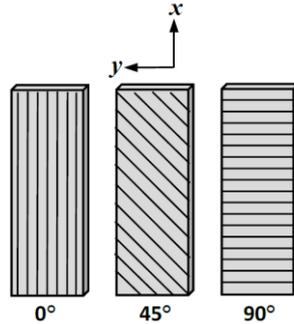


Figura 30 Orientamento ei grano rispetto RD

I risultati sperimentali sono stati rappresentati come tensione nominale  $s$  rispetto alla deformazione nominale  $e$ . Il modulo elastico  $E$ , il carico di snervamento  $YS$ , il carico di rottura  $UTS$ , l'allungamento totale uniforme  $e_u$  e l'allungamento a rottura in percentuale  $e_t$  sono stati ricavati dalle curve tensione-deformazione. I valori della sollecitazione vera  $\sigma$  e della deformazione vera  $\varepsilon$ , nella regione della deformazione plastica uniforme, vengono calcolati grazie dati di tensione-deformazione nominali ed elaborati per individuare l'esponente di incrudimento  $n$  dell'equazione  $\sigma = K\varepsilon^n$ . Infine, l'anisotropia è stata valutata interrompendo le prove di trazione ad un valore di allungamento del 15% in modo che la deformazione plastica fosse nel campo della deformazione uniforme.

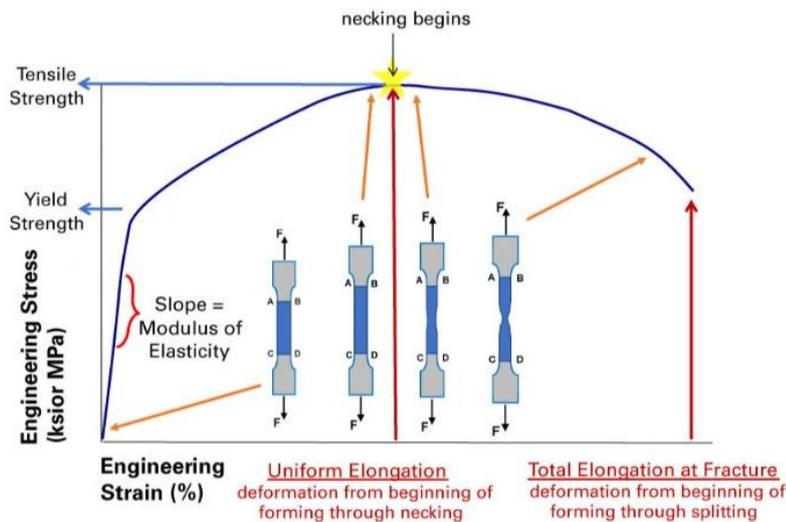


Figura 31 Zona del campo di deformazione uniforme

L'anisotropia normale  $R$  è stata calcolata come rapporto fra la deformazione vera in direzione della larghezza  $\varepsilon_w$  e quella nel singolo spessore  $\varepsilon_t$  del campione:  $R = \varepsilon_w / \varepsilon_t$ . Si definiscono di seguito anche il grado di anisotropia normale media  $\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4}$  e l'anisotropia planare

$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4}$ , dove i pedici 0, 45 e 90 si riferiscono all'anisotropia normale ottenuta su provini a trazione secondo un'angolo di 0°, 45° e 90° rispetto alla direzione di laminazione. La ripetibilità dei risultati è stata garantita eseguendo almeno tre prove di trazione in ogni condizione.

-*Punch test*: la formabilità del composito sandwich MPM è stata valutata mediante le prove di punzonatura semisferica, a temperatura ambiente, con velocità della testata costante pari a 0,1 mm/s, utilizzando ancora la macchina MTS 810. L'attrezzatura, consta in una matrice, un coperchio con viti di serraggio, un porta-lamiera con bordini e un punzone emisferico dal diametro di 18 mm.

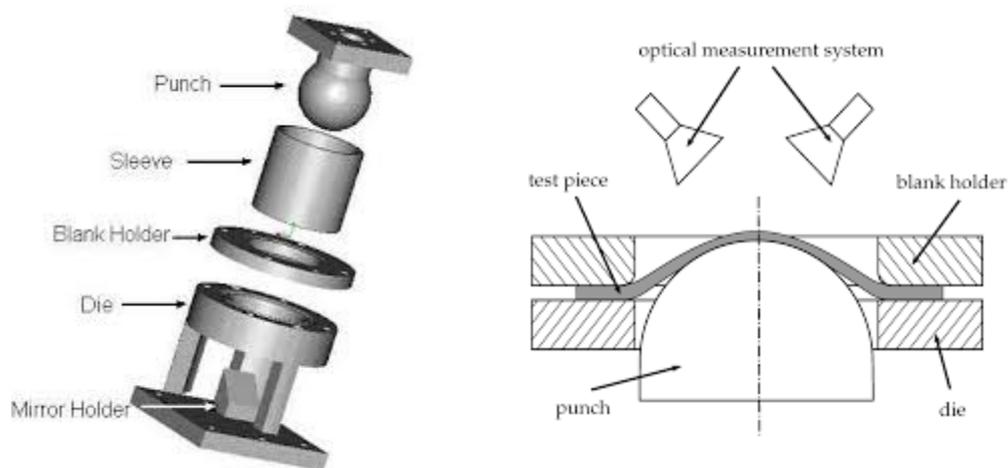


Figura 32 Componenti in gioco nell Punch test

Per ridurre l'attrito è stato lubrificato il punzone, con fogli in politetrafluoroetilene di diametro inferiore a quello del punzone per evitare che la lamina si raggrinzasse. I test sono stati effettuati fino all'inizio del cedimento.

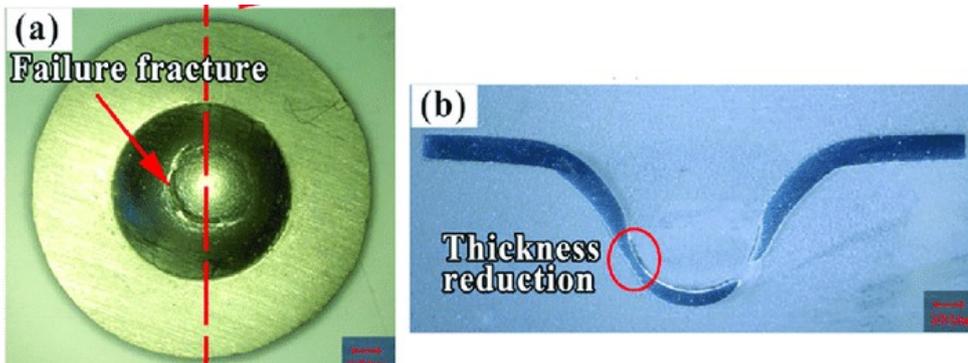


Figura 33 Cedimento del campione con assottigliamento

I risultati del test sono stati l'altezza limite della cupola (LDH) e la curva limite di formabilità (FLC).

L'altezza limite della cupola è stata definita come l'abbassamento al valore massimo di carico applicato rispetto della corsa del punzone ottenuta con un campione a forma di disco, con un diametro pari a 50 mm, i cui bordi sono stati rigidamente serrati in modo da impedire il loro movimento verso l'interno durante la prova. È stato misurato inoltre anche il valore massimo dell'altezza della cupola per le lamiere di copertura in acciaio HX220Y.

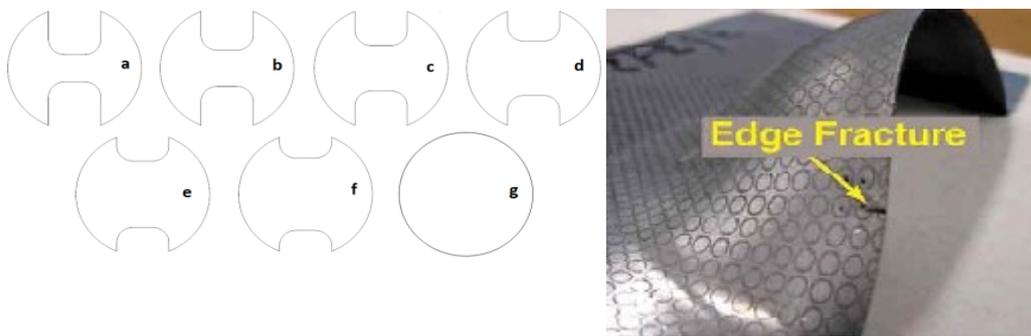
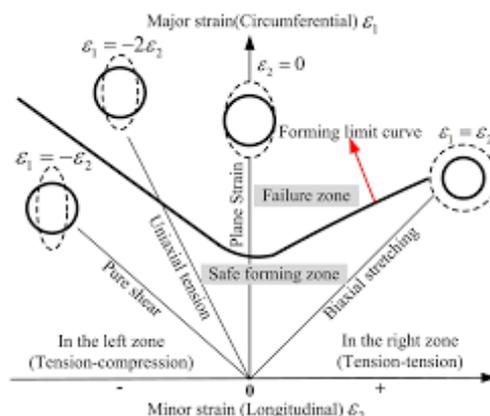


Figura 34 Provini con differenti geometrie usati vari rapporti diametro/larghezza. Accanto la misura della massima altezza della cupola a fine prova

La curva limite di formabilità fornisce una rappresentazione grafica del comportamento a deformazione della lamiera all'inizio della rottura nel piano delle deformazioni principali  $\epsilon_1$   $\epsilon_2$ : uno stato deformativo che cade al di sopra della FLC comporta una frattura locale nel pezzo durante la lavorazione, mentre una condizione di sicurezza si verifica quando  $\epsilon_1$  ed  $\epsilon_2$  sono valori al di sotto della curva limite.



L'FLC è stato ottenuto mediante la prova di punzonatura emisferica utilizzando diverse geometrie del campione, caratterizzate da un disco dal diametro  $D$  di 50 mm, e da diversi valori di larghezza del campione  $W$ , al fine di ottenere rapporti  $D/W$  variabili da 1 a 4, secondo normativa EN ISO 12004- 2 . Per valutare l'orientamento dei grani sulla FLC del composito sandwich MPM, i provini sono stati ottenuti con taglio ad acqua a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , e  $90^\circ$  rispetto alla direzione di laminazione, per poi avere impressa una matrice quadrata regolare, con un lato pari a 2 mm sulla superficie e acquisita prima di essere testata da un paio di macchine fotografiche digitali.

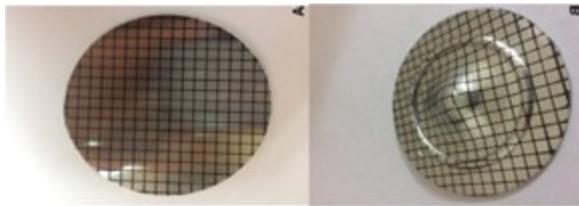


Figura 35 Griglia prima e dopo la prova

Tale sistema è stato utilizzato anche per acquisire la griglia deformata dopo i test. Un accurato sistema a griglia ottica è stato usato per misurare la deformazioni maggiori  $\varepsilon_1$  e la minore  $\varepsilon_2$  mediante la differenziazione tra le coordinate 3D calcolate degli angoli della griglia dopo il test e quelle non deformate prima della prova.

Infine i test di punzonatura sono stati differenti, in base a valori di corsa pari a 5, 5.5 e 6 mm, al fine di studiare l'effetto dell'abbassamento del punzone sulla variazione di spessore per ogni strato del sandwich prima dell'inizio della strizione. Per ogni condizione di prova citata sono state condotte almeno tre prove. In seguito i provini sono stati tagliati radialmente a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  rispetto la direzione di laminazione per essere preparati all'analisi metallo-grafica con il microscopio ottico. Si misurano gli spessori di ogni strato e la variazione  $\Delta t$  ottenuta è definita come la differenza tra lo spessore misurato e quello iniziale. Per avere immagini ad alto ingrandimento degli effetti della frattura sulla superficie grazie al microscopio elettronico a scansione si è dovuto operare con un processo di metallizzazione per rendere conduttivo riempitivo polimerico.

## Risultati e considerazioni

Dal grafico tensione nominale-deformazione nominale, in campo elastico vi è un andamento lineare con un modulo di Young medio pari a 79,2 GPa; successivamente la tensione aumenta non linearmente fino ad un valore massimo corrispondente all'inizio della strizione. La tensione maggiore in direzione longitudinale e trasversale (0° e 90°) si ottiene per livelli di deformazione simili, mentre, per il campione ricavato a 45° rispetto la RD, il picco viene raggiunto ad una deformazione più elevata. Dopo il necking, la tensione a 0° e 90° non mostra una diminuzione apprezzabile per un ulteriore aumento della deformazione fino al cedimento, diversamente alla direzione di 45° alla quale avviene un declino di tensione prima della rottura.

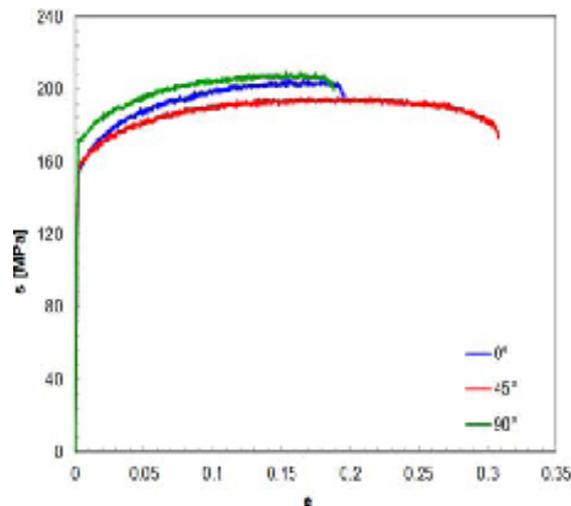


Figura 36 Grafico tensione nominale- deformazione nominale dei provini analizzati

I valori più alti di carico a snervamento e di resistenza a rottura si verificano nella direzione trasversale 90° mentre la direzione longitudinale 0° mostra valori simili a quelli ottenuti lungo la direzione a 45°. I valori di allungamento uniforme e di rottura sono molto simili per i provini ricavati trasversalmente e longitudinalmente, al contrario di quelli a 45° dove si mostra un valore  $e_t$  più alto, con una deformazione dopo strizione pari a circa il 35,3% dell'allungamento a rottura. Invece nelle direzioni di 0° e 90° la deformazione dopo il necking è di circa un 10,4 e 17,1%.

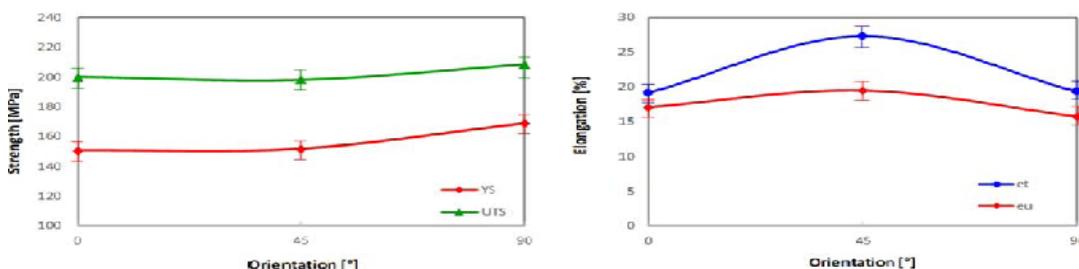


Figura 37 Rispettivamente i valori della tensione nominale e deformazione rispetto l'orientazione

Tracciando le curve  $\sigma$ - $\epsilon$  in scala logaritmica, si calcolano i valori dell'esponente di indurimento  $n$ . Il valore  $n$  aumenta all'aumentare dell'angolo da  $0^\circ$  fino a  $45^\circ$  per poi tornare a scendere fino a  $90^\circ$ .

Per bassi valori di  $n$  una iniziale forte avversione alla deformazione che poi diminuirà rapidamente con l'aumentare della stessa. In questo caso il materiale subisce tranquillamente la strizione in quanto sono presenti disomogeneità geometriche o microstrutturali. D'altra parte, con valori elevati di  $n$ , l'avversione iniziale alla deformazione è meno repentina ma persiste ad alte deformazioni; di conseguenza, le aree prossime alla strizione si induriscono, impedendo così un ulteriore restringimento ed estendono il comportamento a deformazione uniforme a valori di più elevati.

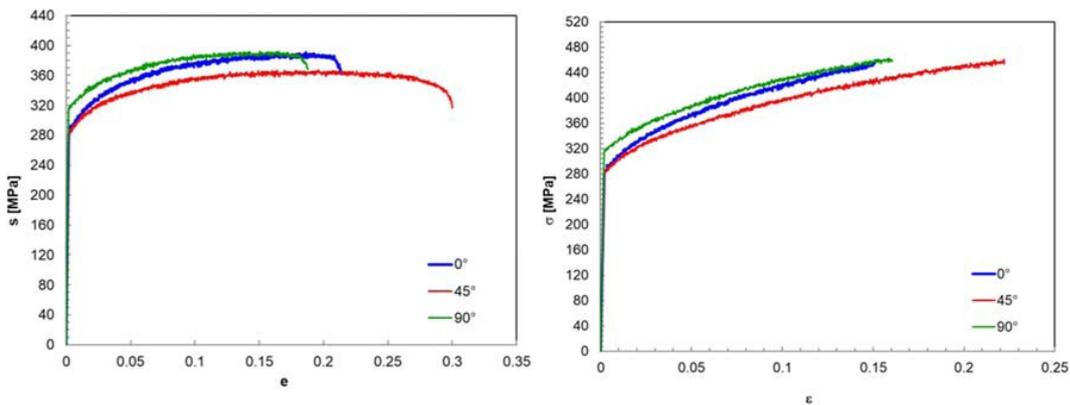


Figura 38 Andamenti delle curve tensione nominale-deformazione nominale e tensione reale-deformazione reale

Per quanto riguarda il comportamento a trazione delle lamiere d'acciaio, indipendentemente dagli orientamenti angolari rispetto alla RD, il comportamento meccanico è molto simile a quello mostrato dal composito sandwich MPM, anche se l'acciaio di copertura è caratterizzato da livelli di sollecitazione a trazione più elevati e, di conseguenza, da valori più alti tensione di snervamento e rottura e rispetto a quelli misurati su MPM. Non si riscontrano variazioni significative nell'allungamento uniforme nell'allungamento a rottura; tale risultato dimostra che il comportamento a trazione del sandwich composito MPM è influenzato principalmente dalle pelli di copertura ed è in sintonia con altre prove sperimentali su sandwich MPM per diversi spessori di lamiere e anime in polimero.

Inoltre, l'esponente di incrudimento dell'acciaio  $n_{HX220Y}$  è superiore al valore  $n$  del composito MPM ( $n_{HX220Y}$ ), ma entrambi hanno andamento simile. Tale conseguenza può essere attribuita al riempimento in polimero morbido che influenza negativamente l'andamento di consolidamento dei compositi sandwich.

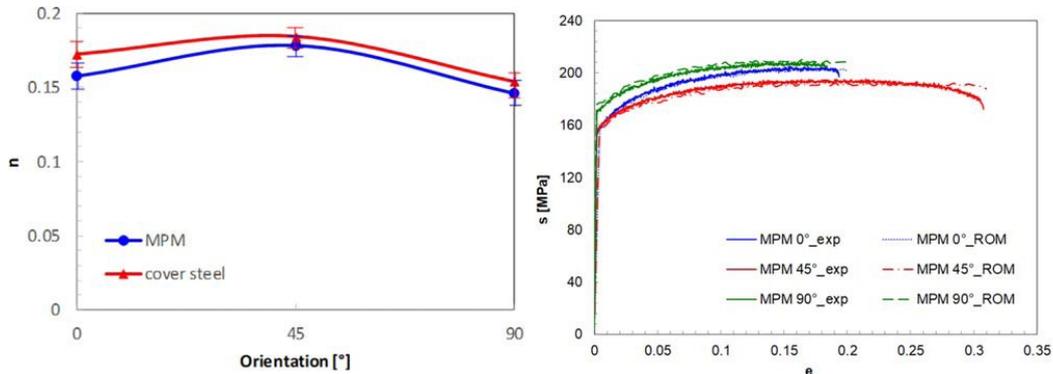


Figura 39 Comparativa dei coefficienti  $n$  rispetto il diversi orientamenti. A destra grafico tensione nominale-deformazione nominale di sandwich MPM con differenti orientazioni

I risultati sperimentali delle proprietà meccaniche sono in accordo con la *rule of mixture* per i materiali compositi, che mette in relazione le proprietà del composito sandwich MPM con quelle dei materiali costituenti:

$$X_{MPM}f_{MPM} = X_{pelle}f_{pelle} + X_{riempitivo}f_{riempitivo}$$

dove  $X$  rappresenta una proprietà specifica, come la resistenza a snervamento o rottura, rispettivamente del sandwich MPM, acciaio di copertura e anima polimerica, mentre  $f$  si riferisce alle frazioni di volume del composito sandwich e dei suoi materiali costitutivi. Dai i dati disponibili in letteratura sul polimero polipropilene-polietilene PP-PE, i valori previsti di tensione a snervamento e a rottura del sandwich composito dell'equazione differiscono in media dell'1,9% e del 2,1%, rispettivamente, in relazione a quelli ottenuti sperimentalmente, quindi in totale accordo con la legge riportata.

Al fine di valutare l'anisotropia sono stati analizzati i risultati sperimentali dati da prove di trazione interrotte nel campo della deformazione uniforme. I valori di anisotropia normale in funzione dell'angolo dell'asse del campione rispetto alla direzione di laminazione  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ , l'anisotropia normale media  $\bar{R}$  e quella planare  $\Delta R$ , vengono riportati di seguito:

	$R$			$\Delta R$	$\bar{R}$
	$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$		
Sandwich MPM	1.45	1.76	1.55	-0.12	1.64
Copertura acciaio HX220Y	1.50	1.79	1.58	-0.13	1.67

I valori di  $R$ , indipendentemente dall'orientamento angolare, superiori a 1, indicando che sia il composito sandwich che le pelli di copertura presentano una normale anisotropia, una ridotta attitudine all'assottigliamento, e

un'anisotropia planare molto bassa. Inoltre, si può osservare che i valori di anisotropia dei compositi MPM sono leggermente minori rispetto quelli ottenuti sull'acciaio costituente, atteggiamento che può essere dovuto alla maggiore deformazione nello spessore del composito MPM, causata dal contributo del riempitivo in polimero, rispetto alla deformazione in direzione della larghezza con valore  $R = \varepsilon_w / \varepsilon_t$ .

Il comportamento meccanico è coerente ai meccanismi di frattura mostrati dai campioni sottoposti a prove di trazione. Al microscopio elettronico a scansione le lamiere di acciaio presentano una frattura duttile con nucleazione, accrescimento e coalescenza dei microvuoti; essi si uniscono e aumentano fino all'area in prossimità della superficie quando avviene la rottura a taglio. Inoltre, l'interfaccia tra la pelle in acciaio ed il riempitivo si rompe a causa del verificarsi dello scollamento nelle regioni a maggiore concentrazione di deformazione. Tale comportamento è simile a quello mostrato dalle superfici fratturate con grani orientati a  $90^\circ$  rispetto la direzione di laminazione.

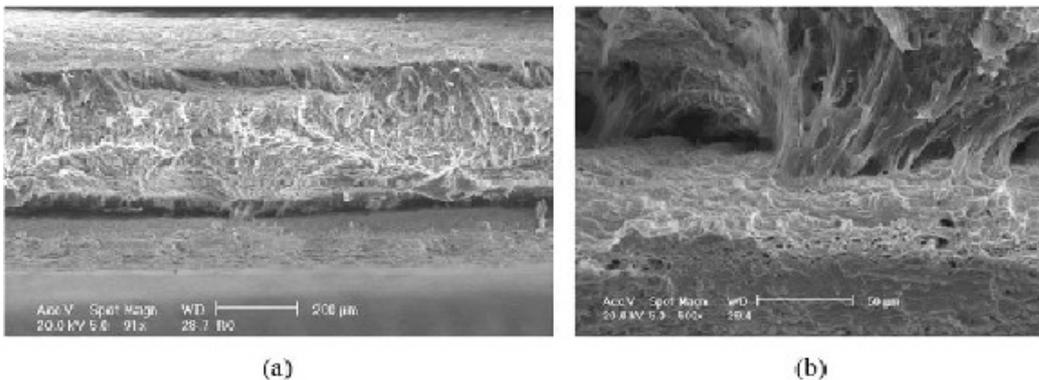


Figura 40 Immagini al microscopio elettronico a scansione: a sinistra la superficie di frattura per i tre strati di materiale. A destra un ingrandimento dell'interfaccia metallo-polimero.

Per quanto riguarda i campioni con orientamento  $45^\circ$  si riscontra ancora una rottura duttile negli strati di metallo mentre lo scollamento all'interfaccia è meno evidente rispetto a quello notato nelle direzioni  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

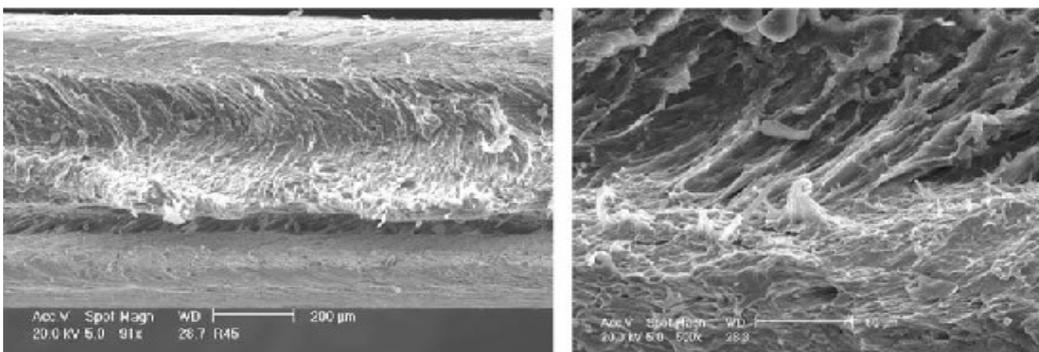


Figura 41 Immagini al microscopio elettronico a scansione: a sinistra la superficie di frattura per i tre strati di materiale. A destra un ingrandimento dell'interfaccia metallo-polimero.

## Formabilità

La caratteristica in questione è stata valutata sia in termini di altezza limite della cupola che di curve limite di formabilità. Analizzando il carico del punzone rispetto alla sua corsa, durante il punch test su campione a forma circolare con diametro 50mm, l'LDH (*limiting dome height*) è stato misurato come la corsa massima al valore di picco del carico del punzone. Le curve di carico-corsa ottenute testando diversi campioni sono quasi coincidenti, a dimostrazione dell'eccellente ripetibilità delle prove; inoltre, l'alto LDH ottenuto, il cui valore medio è pari a circa 6,3 mm, indica l'ottima formabilità del sandwich MPM. Il confronto tra le curve carico-corsa tra campioni in MPM e campioni in acciaio HX220Y mostra un'altezza limite della cupola più alta  $LDH_{HX220Y} = 6,7$  mm, rispetto a quella raggiunta dal campione MPM  $LDH_{MPM} = 6,3$  mm. Il rottura per cricatura si verifica immediatamente dopo il picco delle curve, in corrispondenza dell'arrotondamento del punzone nelle vicinanze della sommità della cupola. Nel provino in metallo, la cricca si propaga dalla superficie esterna a quella interna. Al contrario, il sandwich presenta una frattura superficiale che avviene nella pelle esterna poiché l'anima in polimero morbido in PP-PE contribuisce ad evitare un'ulteriore propagazione della cricca nella acciaio interno.

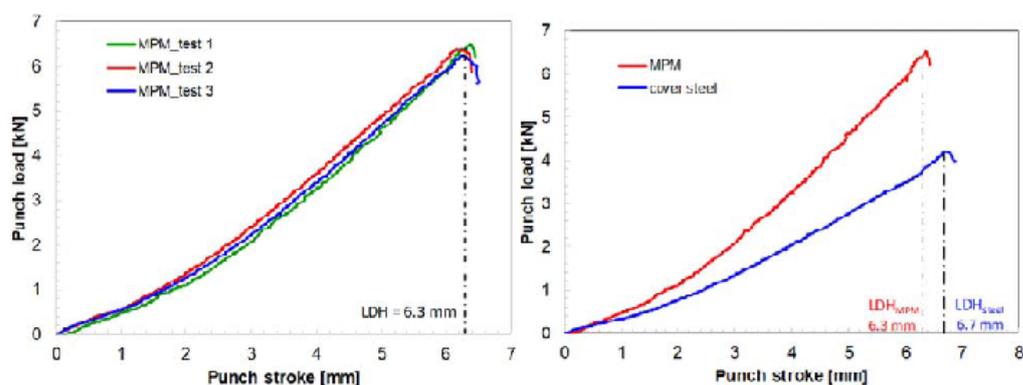


Figura 42 Grafico carico-corsa del punzone: a sinistra andamento dei dischi in MPM. A destra l'andamento del parametro LDH per il metallo di copertura e il provino in composito.

Gli spessori dei tre diversi strati sono stati misurati sulla sezione radiale dei dischi deformati: la vista a metà sezione trasversale evidenzia la deformazione non uniforme lungo l'asse radiale. Indipendentemente dalla corsa del punzone e dall'orientamento, nella zona della flangia, i diversi strati mostrano una variazione trascurabile o un leggero aumento dello spessore. Un marcato assottigliamento si denota dal bordo del conio alla sommità della cupola, come risultato dell'allungamento biassiale. Le pelli metalliche subiscono riduzioni di spessore simili anche se lo strato esterno soffre ad un assottigliamento leggero. Al contrario, il riempitivo in polimero è caratterizzato dalla massima riduzione di spessore.

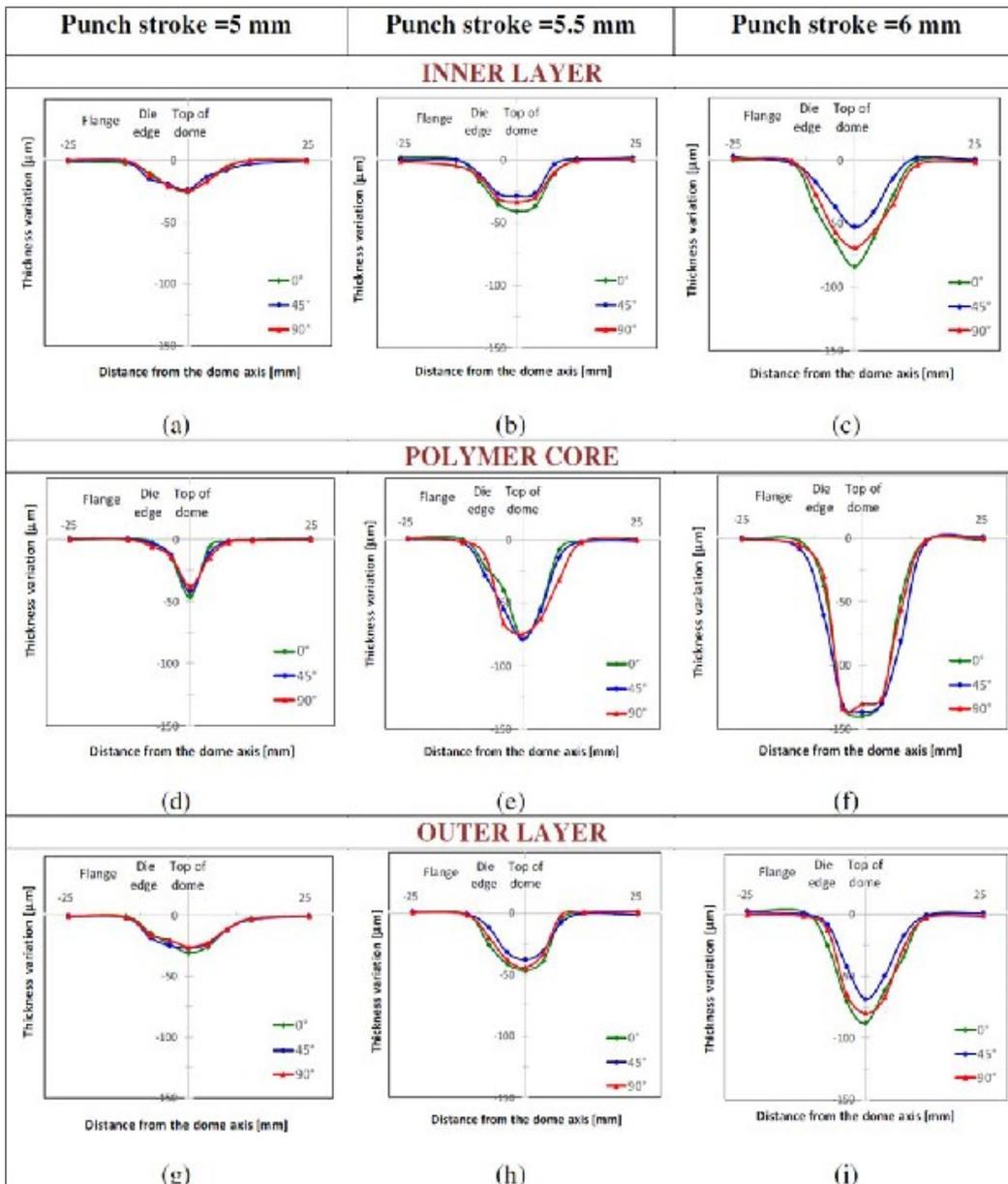


Figura 43 Effetto della corsa del punzone e della RD sulla variazioni degli spessori misurati in direzione radiale in zone diverse del provino durante la punzonatura

È mostrato anche l'effetto della corsa del punzone rispetto la variazione di spessore in funzione della distanza dall'asse della cupola.

Punch stroke = 5 mm								
Angular orientation	Zone of the sample	Distance from dome axis [mm]	Thickness [ $\mu\text{m}$ ]			Thickness variation [ $\mu\text{m}$ ]		
			inner layer	polymer core	outer layer	inner layer	polymer core	outer layer
<b>0°</b>	Flange	-2.5	198.97	400.10	199.94	-1.03	0.10	-0.06
		-1.3	197.51	400.30	199.64	-2.49	0.30	-0.36
	Die edge	-0.8	189.95	398.06	186.00	-10.05	-1.94	-14.00
		-0.4	179.66	385.20	176.90	-20.34	-14.80	-23.11
	Top of the dome	0	174.60	353.93	169.27	-25.40	-46.07	-30.73
	Die edge	0.4	182.66	394.06	174.35	-17.34	-5.94	-25.65
		0.8	192.95	398.41	188.35	-7.05	-1.59	-11.65
	Flange	1.3	199.85	399.74	197.65	-0.15	-0.26	-2.35
		2.5	200.20	400.59	199.67	0.20	0.59	-0.33
	<b>45°</b>	Flange	-2.5	199.65	400.16	199.48	-0.35	0.16
-1.3			199.03	400.12	198.25	-0.97	0.12	-1.75
Die edge		-0.8	185.30	396.41	182.12	-14.70	-3.59	-17.88
		-0.4	180.45	387.34	175.24	-19.55	-12.66	-24.76
Top of the dome		0	175.96	358.12	173.00	-24.04	-41.88	-27.00
Die edge		0.4	186.54	388.47	176.35	-13.46	-11.53	-23.65
		0.8	192.00	398.41	188.45	-8.00	-1.59	-11.55
Flange		1.3	197.00	398.99	196.57	-3.00	-1.01	-3.43
		2.5	199.86	400.12	199.86	-0.14	0.12	-0.14
<b>90°</b>		Flange	-2.5	200.06	400.18	199.67	0.06	0.18
	-1.3		199.64	399.68	198.59	-0.36	-0.32	-1.41
	Die edge	-0.8	188.62	394.18	184.25	-11.38	-5.82	-15.75
		-0.4	179.34	385.69	179.65	-20.66	-14.31	-20.35
	Top of the dome	0	175.29	362.14	174.25	-24.71	-37.86	-25.75
	Die edge	0.4	183.24	385.24	177.49	-16.76	-14.76	-22.51
		0.8	194.29	397.59	188.54	-5.71	-2.41	-11.46
	Flange	1.3	199.47	399.04	197.28	-0.53	-0.96	-2.72
		2.5	199.69	399.74	199.59	-0.31	-0.26	-0.41

Figura 44

Punch stroke = 5.5 mm								
Angular orientation	Zone of the sample	Distance from dome axis [mm]	Thickness [ $\mu\text{m}$ ]			Thickness variation [ $\mu\text{m}$ ]		
			inner layer	polymer core	outer layer	inner layer	polymer core	outer layer
<b>0°</b>	Flange	-2.5	201.93	401.46	200.59	1.93	1.46	0.59
		-1.3	200.10	400.26	199.58	0.10	0.26	-0.42
	Die edge	-0.8	182.49	378.21	174.20	-17.51	-21.79	-25.80
		-0.4	165.04	360.20	158.60	-34.96	-39.80	-41.40
	Top of the dome	0	159.14	321.00	153.43	-40.86	-79.00	-46.57
	Die edge	0.4	163.46	346.00	161.04	-36.54	-54.00	-38.96
		0.8	188.68	392.06	195.80	-11.32	-7.94	-4.20
	Flange	1.3	198.69	398.62	200.59	-1.31	-1.38	0.59
		2.5	201.93	399.68	201.59	1.93	-0.32	1.59
	<b>45°</b>	Flange	-2.5	199.91	401.06	201.29	-0.09	1.06
-1.3			199.51	397.89	199.34	-0.49	-2.11	-0.66
Die edge		-0.8	188.06	371.59	188.05	-11.94	-28.41	-11.95
		-0.4	173.04	345.18	168.00	-26.96	-54.82	-32.00
Top of the dome		0	171.08	321.27	162.13	-28.92	-78.73	-37.87
Die edge		0.4	173.50	344.07	169.06	-26.50	-55.94	-30.94
		0.8	196.12	386.08	192.02	-3.88	-13.92	-7.98
Flange		1.3	200.51	398.59	199.86	0.51	-1.41	-0.14
		2.5	200.96	399.27	198.69	0.96	-0.73	-1.31
<b>90°</b>		Flange	-2.5	198.69	401.32	200.65	-1.31	1.32
	-1.3		195.14	398.68	198.44	-4.86	-1.32	-1.56
	Die edge	-0.8	185.78	386.61	180.19	-14.22	-13.40	-19.82
		-0.4	169.01	334.23	162.21	-30.99	-65.77	-37.79
	Top of the dome	0	166.34	325.76	155.72	-33.66	-74.24	-44.28
	Die edge	0.4	170.40	337.85	167.23	-29.60	-62.15	-32.77
		0.8	190.06	368.36	198.17	-9.94	-31.64	-1.83
	Flange	1.3	199.14	398.32	200.65	-0.86	-1.68	0.65
		2.5	199.99	400.63	201.07	-0.01	0.63	1.07

Figura 45

Punch stroke = 6 mm								
Angular orientation	Zone of the sample	Distance from dome axis [mm]	Thickness [ $\mu\text{m}$ ]			Thickness variation [ $\mu\text{m}$ ]		
			inner layer	polymer core	outer layer	inner layer	polymer core	outer layer
0°	Flange	-2.5	199.99	398.84	202.16	-0.01	-1.16	2.16
		-1.3	198.51	397.53	201.78	-1.49	-2.47	1.78
	Die edge	-0.8	161.82	362.12	174.26	-38.18	-37.88	-25.74
		-0.4	136.07	266.58	129.32	-63.93	-133.42	-70.68
	Top of the dome	0	116.18	260.14	111.86	-83.82	-139.86	-88.14
	Die edge	0.4	138.63	270.58	138.08	-61.37	-129.42	-61.92
		0.8	172.17	353.12	165.24	-27.83	-46.88	-34.76
	Flange	1.3	199.47	397.56	198.62	-0.53	-2.44	-1.38
		2.5	199.86	398.64	201.08	-0.14	-1.36	1.08
	45°	Flange	-2.5	202.78	399.88	201.99	2.78	-0.12
-1.3			197.84	391.52	200.25	-2.16	-8.48	0.25
Die edge		-0.8	182.67	339.15	191.64	-17.33	-60.85	-8.36
		-0.4	162.86	267.85	157.37	-37.14	-132.15	-42.63
Top of the dome		0	147.04	263.14	131.01	-52.96	-136.86	-68.99
Die edge		0.4	158.86	269.85	149.37	-41.14	-130.15	-50.63
		0.8	185.67	319.15	181.64	-14.33	-80.85	-18.36
Flange		1.3	201.78	395.52	198.99	1.78	-4.48	-1.01
		2.5	200.37	400.83	201.27	0.37	0.83	1.27
90°		Flange	-2.5	201.04	399.64	200.12	1.04	-0.36
	-1.3		199.34	395.08	198.48	-0.66	-4.92	-1.52
	Die edge	-0.8	173.13	370.35	187.16	-26.87	-29.65	-12.85
		-0.4	143.57	266.07	135.42	-56.43	-133.93	-64.58
	Top of the dome	0	130.76	269.62	119.93	-69.24	-130.38	-80.07
	Die edge	0.4	143.57	274.07	132.20	-56.43	-125.93	-67.80
		0.8	165.53	344.02	172.16	-34.47	-55.98	-27.85
	Flange	1.3	196.04	397.64	197.12	-3.96	-2.36	-2.88
		2.5	198.62	399.75	198.76	-1.38	-0.25	-1.24

Figura 46 – 45 - 44 Valori degli spessori e loro variazione misurata lungo sezioni direzione radiale

Come previsto, l'assottigliamento aumenta con la corsa del punzone, specialmente vicino alla sommità della cupola.

Per quanto riguarda l'effetto dell'orientamento dei grani sulla variazione di spessore, con una corsa del punzone di 5 mm per un dato strato, non appaio significative variazioni; con corse del punzone di 5.5 e 6 mm, le pelli di acciaio presentano un assottigliamento in la sezione radiale a 0° e 90° più marcato rispetto quello osservato a 45°. La riduzione di spessore mostrata dal core in polimero non mostra essere significativamente influenzata dalla RD.

Le curve limite di formabilità, che rappresentano le condizioni di deformazione al di sotto delle quali non si è ancora verificato il cedimento, sono state ottenute sottoponendo campioni con le geometrie mostrate precedentemente al test di punzonatura.

I risultati delle misurazioni di deformazione sulla superficie punzonata all'inizio del rottura del campione, in termini di mappe di deformazione, vengono acquisiti per mezzo di una griglia ottica.

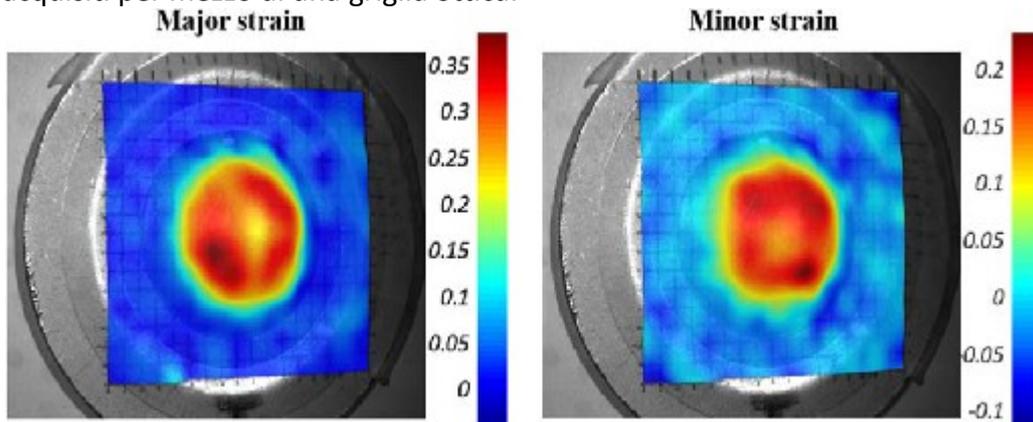


Figura 47 Distribuzione di deformazione

Le deformazioni maggiori e minori acquisite, sono state tracciate per ottenere le curve limite.

La FLC ottenuta usando campioni orientati a  $0^\circ$ , nel ramo sinistro, fra le condizioni di tensione monoassiale e di deformazione piana, mostra il tipico andamento dalle lamiere, con  $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1/2$  nella condizione di tensione monoassiale e  $\varepsilon_2 = 0$  nella condizione di deformazione piana.

Nel ramo destro del FLC, dalla condizione di deformazione piana a quella di allungamento biassiale bilanciato, l'andamento è leggermente diverso da quello tipico delle lamiere infatti il composito sandwich raggiunge valori di deformazione maggiori.

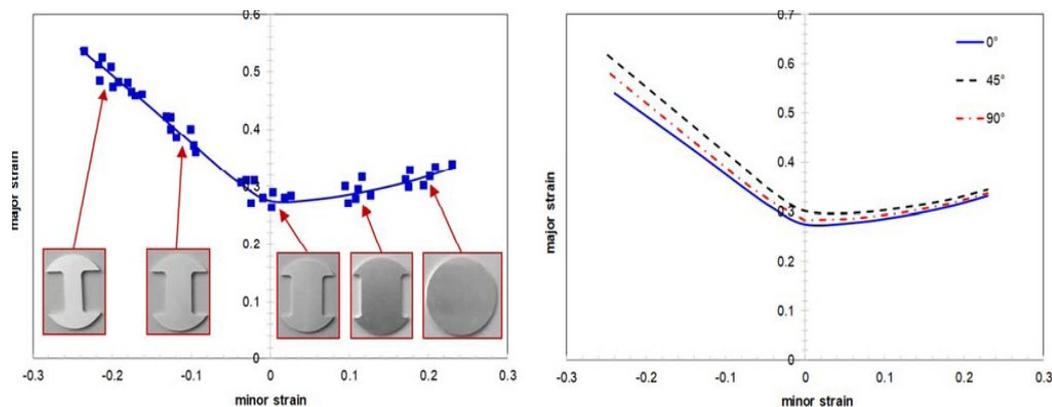


Figura 48 A sinistra FLC per MPM con RD  $0^\circ$ . A destra il grafico mostra l'influenza della RD sulle FLC

Non si osserva alcuna influenza apprezzabile dell'orientamento angolare sulla formabilità nella condizione di allungamento biassiale bilanciato, ma al contrario influisce nella deformazione piana e nelle zone di tiro. In particolare, data la deformazione minore, la deformazione maggiore misurata sui campioni a  $45^\circ$  è tipicamente più alta di quella a  $0^\circ$ . Per quanto riguarda i campioni a  $90^\circ$ , sembra che l'FLC nella regione di tiro si piazzasse tra le curve ottenute con campioni orientati a  $0$  e  $45^\circ$ . La posizione più alta della curva FLD, ottenuta dal

capione con orientamento a 45° rispetto RD, è contraddistinta dalla più alta formabilità. Ciò è coerente con i risultati forniti dalle prove di trazione sia in termini di allungamento uniforme che a rottura e può essere messo in relazione con la più bassa attitudine all'assottigliamento a causa della più spiccata anisotropia normale.

## *Conclusioni*

-La tensione nominale aumenta in modo monotono con la deformazione nominale, in un ampio campo di deformazione uniforme.

-Il massimo allungamento a rottura si ottiene per inclinazione a 45° della RD, con un'ampia deformazione dopo la strizione. I campioni a 90° sono caratterizzati dai più alti valori di carico di snervamento e di resistenza rottura.

-Il valore più alto di esponente di incrudimento è ottenuto per 45° della RD .

- Il sandwich composito MPM presenta un'anisotropia normale con ridotta attitudine all'assottigliamento e anisotropia planare molto bassa; il più alto valore di anisotropia normale si ottiene per 45° della RD.

- Si è conseguita un'ottima formabilità del sandwich composito MPM

- Le pelli metalliche subiscono un analogo assottigliamento benché lo strato esterno è sottoposto ad una riduzione di spessore leggermente più marcata rispetto quello interno. L'anima in polimero è soggetta alla massima riduzione di spessore.

- La riduzione dello spessore aumenta con la corsa del punzone, in particolare vicino alla sommità della cupola.

- All'inizio del cedimento, le pelli d'acciaio presentano un assottigliamento lungo la sezione, a 0° e 90° più marcato di quello osservato a 45°. L'assottigliamento nel riempitivo in polimero non è influenzato all'orientamento angolare.

- L'influenza dell'orientamento angolare sulla formabilità è trascurabile nella condizione di allungamento biassiale uniforme. La posizione più alta della curva FLD, ottenuta con l'orientamento per 45° della RD, indica che la formabilità in tale direzione è superiore coerentemente con il normale comportamento anisotropo.

## *Bibliografia e sitografia*

- Ramnath BV, Alagarraja K, Elanchezian C (2019) A review on sandwich composite and their applications. *Mater Today Proc* 16: 859–864. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.169>
- Alaluss K, Bürkner G(2018) Thermal joining of steel/polymer/steel composite materials using non-direct arcprocess technique. *J Manuf Process* 34:523–530. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.032>
- Carradò A, Faerber J, Niemeyer S, Ziegmann G, Palkowski H (2011) Metal / polymer / metal hybrid systems : towards potential formability applications. *Compos Struct* 93:715–721. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.07.016>
- Huang YM, Leu DK. Finite-element simulation of the bending process of steel/polymer/steel laminate sheets. *J Mater Process Technol* 1995;52:319–337. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01617-A](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01617-A)
- Tsai SN, Taylor AC (2019) Vibration behaviours of single/multidebonded curved composite sandwich structures. *Compos Struct* 226:111291. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111291>
- Xie J, Zhang R, Xie G, Manca O (2019) Thermal and thermomechanical performance of actively cooled pyramidal sandwich panels. *Int J Therm Sci* 139:118–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.002>
- Colombo C, Harhash M, Palkowski H, Vergani L (2018) Thermographic stepwise assessment of impact damage in sandwich panels. *Compos Struct* 184:279–287. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.001>
- Kim KJ, Kim D, Choi SH, Chung K, Shin KS, Barlat F et al (2003) Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. *J Mater Process Technol* 139:1–7. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00173-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00173-0)
- Ambrogio G, Bruni C, Bruschi S, Filice L, Ghiotti A, SimonciniM (2008) Characterisation of AZ31B magnesium alloy formability in warm forming conditions. *Int J Mater Form* 1:205–208. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0027-y>
- Forcellese A, Gabrielli F, Simoncini M (2011) Prediction of flow curves and forming limit curves of Mg alloy thin sheets using ANN-based models. *Comput Mater Sci* 50. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.05.048>
- Forcellese DA, El Mehtedi M, Simoncini M, Spigarelli S (2007) Formability and microstructure of AZ31 magnesium alloy sheets. 344. <https://doi.org/10.4028/0-87849-437-5.31>
- Mechanical properties and formability of metal–polymer–metal sandwich composites Archimede Forcellese & Michela Simoncini ISSN 0268-3768 *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-020-05245-6 Springer
- 17. Bruni C, Forcellese A, Gabrielli F, Simoncini M (2006) Modelling of the rheological behaviour of aluminium alloys in multistep hot deformation using the multiple regression analysis and artificial neural network techniques. *J Mater Process Technol* 177. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2006.06.001>

doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.230

-Hussaini SM, Krishna G, Gupta AK, Singh SK (2015) Development of experimental and theoretical forming limit diagrams for warm forming of austenitic stainless steel 316. *J Manuf Process* 18:151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.03.005>

- Darabi R, Azodi HD, Bagherzadeh S (2017) Investigation into the effect of material properties and arrangement of each layer on the formability of bimetallic sheets. *J Manuf Process* 29:133–148. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.022>

- Ruokolainen RB, Sigler DR (2008) The effect of adhesion and tensile properties on the formability of laminated steels. *J Mater Eng Perform* 17:330–339

- Stachowiak G, Batchelor AW (2014) *Engineering tribology*. Fourth Edi. Elsevier Inc. All. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07515-4>

- Kim L-K, Yu T-X (1997) Forming and failure behaviour of coated, laminated and sandwiched sheet metals: a review. *J Mater Process Technol* 63:33–42

- Wollmann T, Hahn M, Wiedemann S, Zeiser A, Jaschinski J, Modler N et al (2017) Thermoplastic fibre metal laminates : stiffness properties and forming behaviour by means of deep drawing. *Arch Civ Mech Eng* 18:442–450. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.09.001>

- Kalpakjian S, Schmid SR (2019) *Manufacturing engineering & technology*, 8th edn. Pearson

- International A (2016) ASTM E646–16, standard test method for tensile strain-hardening exponents (n -values) of metallic sheet materials. ASTM International, West Conshohocken

- Sasso M, Mancini E, Chiappini G, Simoncini M, Forcellese A (2018) Adapted Nakazima test to evaluate dynamic effect on strain distribution and dome height in balanced biaxial stretching condition. *Int J Mech Sci* 148:50–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.024>

28. ISO 12004-2:2008 Metallic materials — sheet and strip — determination of forming-limit curves — Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory 2008:27

- Considère M (1885) L'emploi du fer et de l'acier dans les constructions. *Ann Des Ponts Chaussées*:574–775

- Hortigón B, Gallardo JM, Nieto-garcía EJ, López JA (2019) Strain hardening exponent and strain at maximum stress : Steel rebar case;196:175–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.082>

- Keeler S, Brazier W (1977) Relationships between laboratory material characterization and press shop formability. *Int Symp High Strength Low Alloy Steels*:517–530

- Harhash M, Carradò A, Palkowski H (2017) Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel / polymer sandwich systems with local inlays – Part 2 : stretching and deep drawing. *Compos Struct* 160:1084–1094. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.111>

-[http://polismanettoni.altervista.org/alterpages/files/36Cap\\_libro.pdf](http://polismanettoni.altervista.org/alterpages/files/36Cap_libro.pdf)  
<https://netcomposites.com/guide/introduction/polymer-composites/>

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pola.20946>Hybrid Metal–Polymer Composites from Functional Block Copolymers  
 -<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822310002734> Metal/polymer/metal hybrid systems: Towards potential formability applications  
 -<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.48717> Manufacturing of polymer/metal composites by fused deposition modeling process with polyethylene  
 -<https://lib.dr.iastate.edu/etd/15384/>  
 -<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781118354179.auto163> sandwich materials  
 -<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/particulate-composite#:~:text=A%20particulate%20composite%20is%20characterized,any%20shape%2C%20size%20or%20configuration.>  
 -[https://it.wikipedia.org/wiki/Materiali\\_rinforzati\\_con\\_fibre\\_a\\_matrice\\_polimerica](https://it.wikipedia.org/wiki/Materiali_rinforzati_con_fibre_a_matrice_polimerica)  
 -[https://it.wikipedia.org/wiki/Polimeri\\_termoindurenti](https://it.wikipedia.org/wiki/Polimeri_termoindurenti)  
 -[https://it.wikipedia.org/wiki/Polimeri\\_termoplastici](https://it.wikipedia.org/wiki/Polimeri_termoplastici)  
 -<https://www.promozioneacciaio.it/>  
 -file:///C:/Users/Utente/Desktop/T/immagini/orientamento%20fibre%20compositi.htm  
 -file:///C:/Users/Utente/Desktop/T/immagini/prensa%20con%20cuscnino.htm  
 -file:///C:/Users/Utente/Desktop/T/immagini/transizione%20vetrosa.svg  
 -file:///C:/Users/Utente/Desktop/T/immagini/stress%20strain%20fibre.htm  
 -Reinforced metal/polymer/metal sandwich composites with improved properties Heinz Palkowski<sup>1</sup>, Olga Sokolova<sup>1</sup>, Adele Carradò<sup>2</sup><sup>1</sup>institute of Metallurgy (IMET), Metal Forming and Processing, Clausthal University of Technology (TUC), Robert-Koch-Str. 42, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany<sup>2</sup>Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, IPCMS, UMR 7504 UDSCNRS, 23 rue du Loess, BP 43, 67034 Strasbourg cedex 2, France  
 -Sandwich Materials Heinz Palkowski<sup>1</sup>, Olga A. Sokolova<sup>1,2</sup>, and Adele Carradò<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Clausthal University of Technology (TUC), Clausthal-Zellerfeld, Germany  
<sup>2</sup>Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, Strasbourg, France  
 -[https://www.researchgate.net/figure/Glass-transition-temperature-evolution-with-the-molecular-weight-on-PMMA\\_fig2\\_327208857](https://www.researchgate.net/figure/Glass-transition-temperature-evolution-with-the-molecular-weight-on-PMMA_fig2_327208857)