



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

CLASSE 10 INGEGNERIA INDUSTRIALE

(DM 509/99)

STUDIO DELLA STRUTTURA E DELLE APPLICAZIONI
DI HONEYCOMBS ARAMIDICI

Relatore: Ing. Enrico Bernardo

Laureando: GIOVANNI FLORIO

1	Motivi massimizzazione momento di inerzia	4
2	Generalità sui pannelli sandwich	7
3	Riassunto dell'analisi della lamina ortotropa e della Teoria Classica dei Laminati	11
	3.1 Legge di Hooke	12
	3.2 Relazioni tra le costanti elastiche ed i termini delle matrici di elasticità diretta e inversa	13
	3.3 Teoria Classica dei Laminati	15
4	Adesivo	16
5	Core, funzione strutturale e compito del core	17
6	Balsa	19
7	Schiume	21
8	Generalità e meccanica degli honeycomb	27
	8.1 Introduzione	27
	8.2 Breve compendio delle forme	28
	8.3 Studio della meccanica degli honeycomb	30
	8.3.1 Introduzione e sinapsi	30
	8.3.2 Meccanismi deformativi negli honeycomb	30
	8.3.2.1 Deformazione nel piano	31
	8.3.2.2 Deformazione fuori dal piano	32
	8.3.3 Proprietà nel piano degli honeycomb: carico monoassiale	32
	8.3.3.1 Deformazione lineare elastica	33
	8.3.3.2 Instabilità elastica	36
	8.3.3.3 Collasso plastico	37
	8.3.3.5 Frattura fragile	38
	8.3.3.6 Deformazione visco-elastica	41
	8.3.3.7 Creep ed instabilità al creep	42
	8.3.3.8 Variazione strutture delle celle	45
	8.3.3.9 Difetti negli honeycomb	46
	8.3.4 Proprietà nel piano degli honeycomb: carico biassiale	47
	8.3.4.1 Risposta lineare elastica alle sollecitazioni biassiali	48
	8.3.4.2 Instabilità elastica sotto carico biassiale	48
	8.3.4.3 Collasso plastico e superficie di curvatura	50
	8.3.4.4 Frattura fragile e frattura di superficie	52
	8.3.5 Proprietà fuori dal piano	53

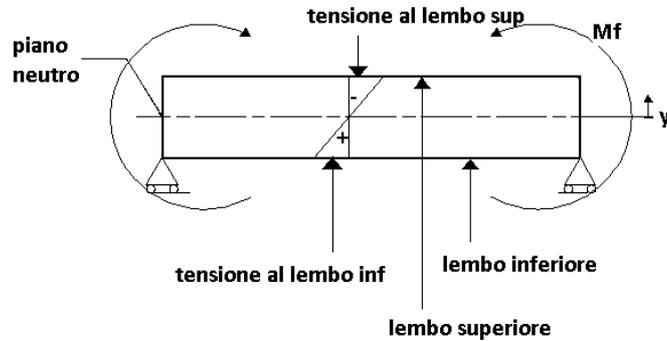
	8.3.5.1	Deformazione lineare elastica	53
	8.3.5.2	Elasticità non lineare e instabilità elastica	54
	8.3.5.3	Collasso plastico	55
	8.3.5.4	Frattura fragile	55
	8.3.6	Conclusioni sulla meccanica degli honeycomb	56
9		Produzione degli honeycomb	57
	9.1	Metodo di fabbricazione degli honeycomb termoplastici per espansione	58
	9.2	Produzione degli honeycomb termoplastici per corrugamento	63
10		Materiali e confronti	69
	10.1	Honeycomb in alluminio	69
	10.2	Honeycomb in fibra	71
	10.2.1	Breve compendio sulle fibre	71
	10.2.2	Fibre di vetro	74
	10.2.3	Fibre aramidiche-analisi molecolare	79
11		Analisi strutturale del Nomex	82
	11.1	Generalità	82
	11.2	Tipologia di Nomex	82
	11.3	Proprietà del Nomex	83
	11.3.1	Proprietà fisiche e proprietà termiche	83
	11.3.2	Effetti del calore secco	84
	11.3.3	Effetti dell'umidità	85
	11.3.4	Assorbimento dell'umidità e stabilità dimensionale	85
	11.3.5	Infiammabilità, fumo e gas generati	86
	11.3.6	Resistenza alla degradazione per abrasione	86
	11.3.7	Resistenza all'aggressione chimica	87
	11.3.8	Resistenza all'aggressione del vapore	88
	11.3.9	Resistenza all'esposizione ai raggi UV	88
	11.3.10	Resistenza alle radiazioni	89
	11.4	Caratteristiche essenziali per la resistenza termica	89
	11.5	Applicazioni del Nomex	90
12		Carta di nomex	91
13		Resina- matrice	92
	13.1	Funzione della resina	92
	13.2	Generalità delle resine	92
	13.3	Resine fenoliche	94

14	Produzione degli honeycomb in fibra aramidica	98
15	Proprietà e metodi per i test	115
16	Caratteristiche meccaniche degli honeycomb in Nomex	119
17	Proprietà termiche honeycomb in Nomex	135
18	Calcolo sollecitazioni meccaniche e termiche sopportabili da un honeycomb in fibra meta-aramidica	137
19	Modalità di deformazione-cedimento di un pannello sandwich	143
20	Progettazione di un pannello sadwich con core in honeycomb , linee guida	145
21	Esempio applicativo	146
22	Conclusioni	162
23	Bibliografia	163
24	Ringraziamenti	164

1 MOTIVI DELLA MASSIMIZZAZIONE DEL MOMENTO DI INERZIA

I pannelli sandwich sono un naturale sviluppo del concetto trave, o per meglio dire, sono una conseguenza dell'utilizzo ragionato di particolari atti a sostenere sollecitazioni di tipo flessionale. Con tale analisi è possibile attribuire a tali oggetti caratteristiche accessorie aggiuntive, non inerenti alla sola resistenza strutturale.

Dallo studio delle sollecitazioni è noto che un particolare soggetto a momento flettente è soggetto a tensioni nel punto che crescono in modo lineare con la distanza del punto considerato dal piano medio, anzi, dal piano neutro, secondo la legge di Navier:



$$\sigma_f = M_f J_{xx}^{-1} y \quad \text{dove:}$$

- M_f = momento flettente;
- J_{xx} = momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse x ;
- y = distanza del punto dal piano neutro;

quindi il materiale presente nei piani più vicini al piano medio è sollecitato in modo molto inferiore rispetto al materiale nei piani più esterni.

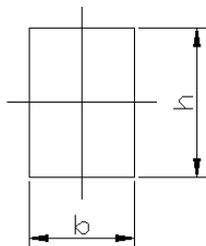
Poiché anche il peso stesso della trave è una sollecitazione, che può raggiungere valori molto notevoli rispetto ai carichi secondari che sulla trave andranno ad esercitarsi (vedi soletta di un tetto) la presenza di materiale che partecipa poco al sostenimento delle sollecitazioni è una cosa dannosa, oltre che economicamente svantaggiosa.

Quindi:

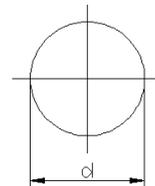
Le strutture sandwich hanno lo scopo principale di massimizzare il momento di inerzia della sezione minimizzandone il peso ed attribuendo alla sezione proprietà che un blocco massivo non è in grado di assegnare.

Geometria Intelligente

Il momento di inerzia di una sezione è più che proporzionale alla dimensione-distanza dall'asse baricentrico della sezione.

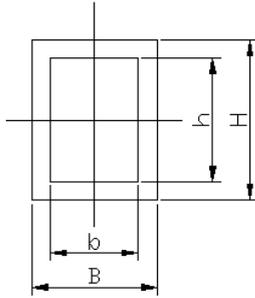


$$j_{xx} = 112bh^3$$

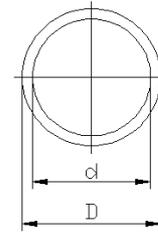


$$j_{xx} = \pi 64d^4$$

Per massimizzare il momento di inerzia è opportuno quindi creare sezioni che presentino materiale distribuito distante dall'asse baricentrico.



$$j_{xx} = 112(BH^3 - bh^3)$$



$$j_{xx} = \pi 64(D^4 - d^4)$$

Concentrando le masse in periferia della sezione si riesce ad aumentare l'inerzia riducendo di peso, essendo anch'esso una sollecitazione per la struttura:

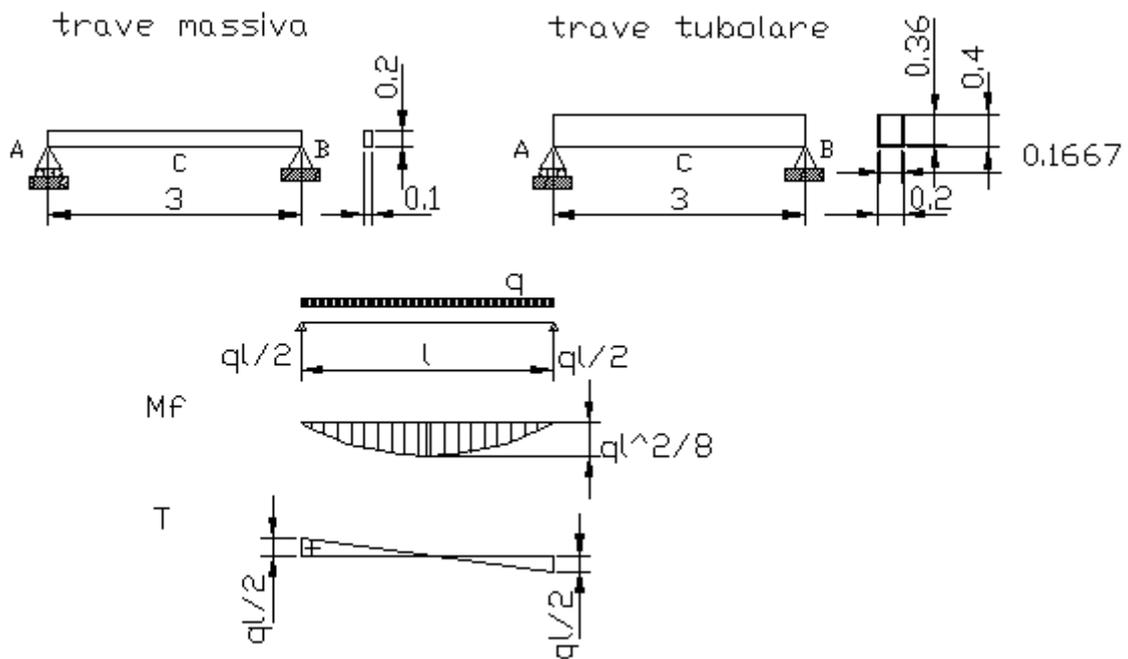
- nel caso statico è possibile considerare il peso della struttura come un carico distribuito agente sulla trave stessa;
- nel caso dinamico il peso ha pure effetti inerziali;

la massimizzazione del momento di inerzia ha come scopo quello di minimizzare le tensioni presenti nella struttura.

Per poter meglio spiegare i motivi dello sviluppo di tale prodotto, ho ritenuto più opportuno sviluppare un esempio che vede la deformazione di una trave soggetta al proprio peso prima di geometria massiva, poi con una geometria tubolare

Esempio esplicativo uso intelligente del materiale

Per fare un esempio si considera la flessione di due travi, sottoposte al proprio peso, aventi sezione del materiale uguale, una di tipo massivo e l'altra di tipo tubolare

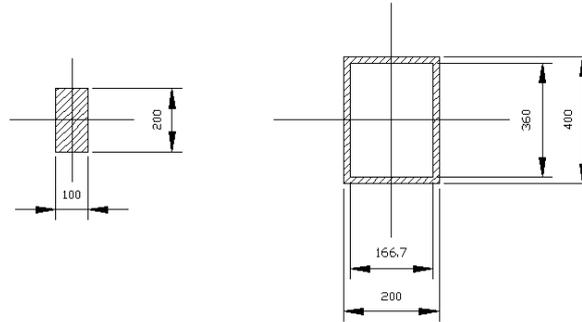


La trave è caratterizzata da dimensioni particolari diverse da quelle commercializzate . Esse sono state ricavate ponendo come condizione la conservazione della quantità di materiale in modo da poter fare un confronto evidente e logico .

Le quote sono in metri.

L'ipotesi in studio è di una trave in acciaio comune di lunghezza 3000mm semplicemente appoggiata, sottoposta al proprio peso, rappresentato nello schema delle sollecitazioni come un carico distribuito.

Vi sono due sezioni, una di tipo massivo e l'altra di tipo tubolare, avente la medesima sezione di materiale.



Le quote sono ora in millimetri

Calcolo delle sollecitazioni agenti

$$q = A \cdot \rho = 1 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 7.85 = 1538.6 \text{ N/m}$$

$$M_{fc} = 18ql^2 = 18 \cdot 1538.6 \cdot 3^2 = 1730.9 \text{ Nm}$$

$$TA = 12q \cdot l = 0.5 \cdot 1538.6 \cdot 3 = 2307 \text{ N}$$

Calcolo delle tensioni

Sez1 massiva

$$j_{xx} = 112 \cdot B \cdot H^3 = 112 \cdot 100 \cdot 200^3 = 6.67 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{fmax} = M_{fc} \cdot y / j_{xx} = 1730.9 \cdot 100 / 6.67 \cdot 10^7 = 2.58 \text{ MPa}$$

$$\eta_c = 5384 \cdot q \cdot l^4 / 4E \cdot j_{xx} = 5384 \cdot 1538.6 \cdot 3^4 / 4 \cdot 100000 \cdot 6667 = 0.0116 \text{ cm} = 0.116 \text{ mm}$$

Sez 2 tubolare

$$j_{xx} = 112 \cdot B \cdot H^3 - bh^3 = 112 \cdot 200 \cdot 400^3 - 166.7 \cdot 360^3 = 4.18667 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{fmax} = M_{fc} \cdot y / j_{xx} = 1730.9 \cdot 100 / 4.18667 \cdot 10^8 = 0.827 \text{ MPa}$$

$$\eta_c = 5384 \cdot q \cdot l^4 / 4E \cdot j_{xx} = 5384 \cdot 1538.6 \cdot 3^4 / 4 \cdot 100000 \cdot 41866.7 = 0.001864 \text{ cm} = 0.01864 \text{ mm}$$

Dal confronto dei risultati si vede che con il solo cambio di sezione, mantenendo la quantità di materiale:

$$- \sigma_{fmax1} / \sigma_{fmax2} = 3.11 \quad \text{la tensione si riduce di 3 volte!}$$

$$- \eta_{c1} / \eta_{c2} = 6.22 \quad \text{la freccia si riduce di 6 volte!}$$

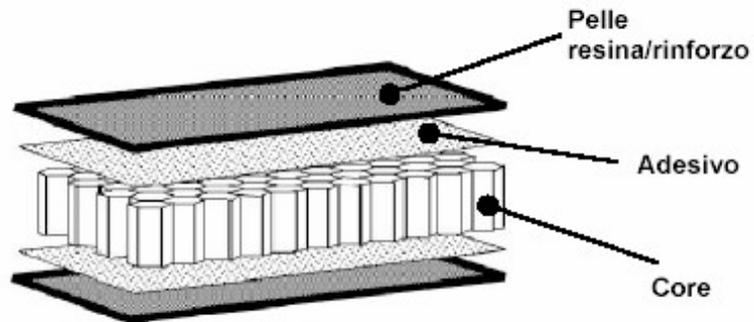
È quindi conveniente massimizzare l'utilizzo intelligente del materiale, in modo da avere vantaggi ingegneristici ed economici.

2 GENERALITÀ SUI PANNELLI SANDWICH

I pannelli sandwich sono composti di tre parti:

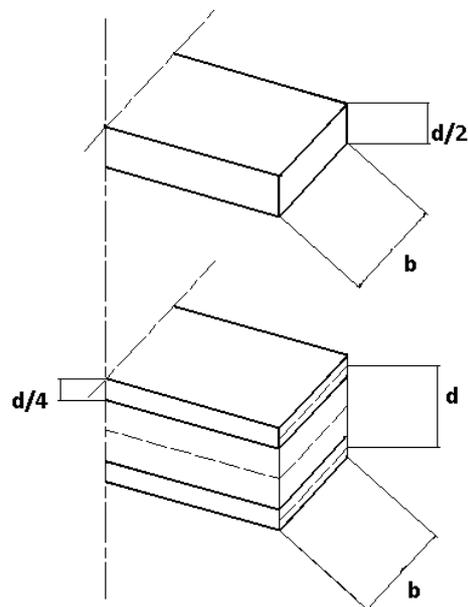
- Le pelli o lamine superficiali, che hanno la funzione strutturale di resistere alle sollecitazioni di flessione;

- Il Core, o Anima, che ha la funzione di collegamento tra le due lamine;
- Lo strato adesivo, che ha l'importantissimo compito di resistere alle sollecitazioni tangenziali che vanno a verificarsi tra core e lamine.



Le due lamine sono per l'appunto distanziate tra di loro, in piani paralleli al piano neutro, in modo da accrescere il momento di inerzia ed attribuire quindi alla struttura rigidità flessionale.

Ecco un esempio semplice che dimostra la maggior rigidità di un pannello sandwich rispetto ad una struttura massiva, senza tener conto della rigidità flessionale propria del core (comunque trascurabile in molti casi):



Caso 1

Momento di inerzia $J_{xx1} = 16d^3 \cdot b$

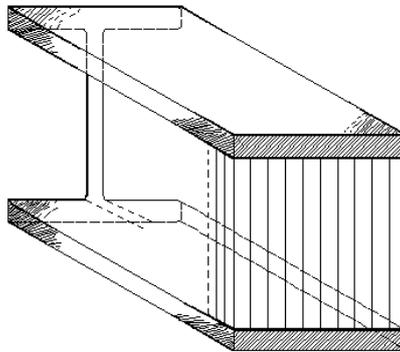
Caso 1

Momento di inerzia $I = 2 \cdot 16d^3 \cdot b + b \cdot d^4 \cdot d^2$

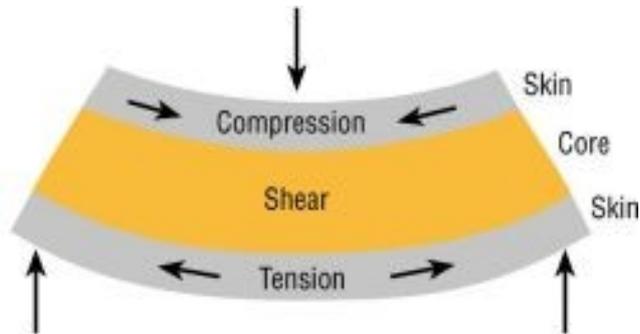
$$J_{xx1}/J_{xx2} = 6,25$$

la struttura 2 è 6,25 volte più resistente della struttura 1

Si può quindi comparare la logica di un pannello sandwich alla logica di una trave ad I.



Senza l'azione del core che mantiene il collegamento tra le due lamine superficiali la trave si deformerebbe come due lamine staccate tra loro sottoposte a momento, quindi con una diminuzione della rigidità di 8 volte!



Lo strato adesivo è fondamentale per mantenere l'unione tra lamine e core, senza di esso le tensioni tangenziali non avrebbero luogo e la trave si deformerebbe come detto sopra.

Tenendo conto del momento di inerzia proprio del core il momento di inerzia del pannello completo diviene quindi (usando la teoria standard di Navier):

$$J_{xx} = 16bt^3 + 2 \cdot 16d^3 \cdot b + b \cdot d^4 \cdot d^2$$

Dove t = spessore del core

La rigidità diviene quindi

$$R = E_c \cdot 16bt^3 + E_l \cdot 2 \cdot 16d^3 \cdot b + b \cdot d^4 \cdot d^2$$

Dove

- E_l = modulo elasticità longitudinale delle lamine;
- E_c = modulo elasticità longitudinale del pannello.

Le tensioni a cui sono sottoposte lamine e core valgono quindi:

$$\sigma_l = MfR \cdot E_l$$

$$\sigma_c = MfR \cdot E_f$$

Le tensioni di taglio che si hanno sul pannello si possono calcolare con la teoria standard

Vantaggio principale della struttura Sandwich

Oltre alle ragioni prettamente strutturali lo studio del pannello permette di attribuire al pannello stesso caratteristiche peculiari che strutture massive non sono in grado di esercitare, ad esempio quelle dell'isolamento termico ed elettrico. Tali caratteristiche magari non sono studiate per essere impiegate nell'uso comune del pannello ma per avere una sicurezza nel caso di incidenti o eventi non prevedibili.

Per l'appunto nella seguente tesi sono sviluppati gli honeycomb in Nomex, che data la caratteristica di alta resistenza coniugata con alta tolleranza alle alte temperature e tossicità molto bassa consente l'uso di pannelli sandwich in situazioni di potenziale pericolo.

RIASSUNTO DELL'ANALISI DELLA LAMINA ORTOTROPA E DELLA TEORIA CLASSICA DEI LAMINATI

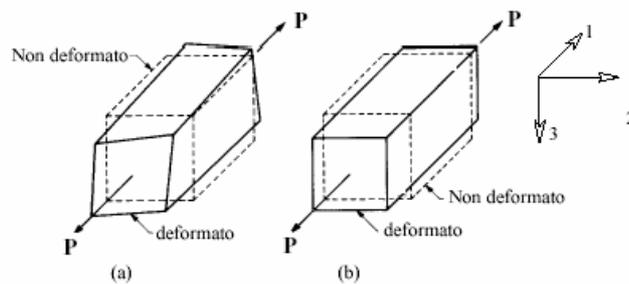
(dagli appunti preparati dall'ing. PHD Rosario Pecora)

L'analisi di un laminato presuppone la conoscenza del comportamento meccanico della singola lamina, ovvero delle sue equazioni costruttive.

La lamina di composito è un meccanismo microscopicamente eterogeneo essendo la sua composizione variabile in modo puntuale.

Dal punto di vista macroscopico però essa può considerarsi omogenea ed esibisce un comportamento anisotropo in particolare ortotropo.

Quindi l'analisi effettuata di seguito è valida sia per lamine di fibre sia per lamine di materiali omogenei quali le lamine di alluminio.



Un materiale si dice anisotropo quando le sue caratteristiche variano continuamente con la direzione considerata, se il materiale ammette tre piani di simmetria mutuamente ortogonali esso si dice ortotropo ed i piani di simmetria si dicono piani di ortotropia, tali piani sono individuati dal piano medio della lamina e dai piani ad esso ortogonali paralleli alle direzioni principali (nel caso di fibre unidirezionali direzione delle fibre e direzione ortogonali alle fibre, nel caso di rinforzi bidirezionali direzioni delle fibre).

Fig.1 deformazione tipica di un materiale anisotropo (a) ed ortotropo (b) soggetto a sforzo normale secondo la direzione principale longitudinale.

L'applicazione di un carico di trazione ad un elemento di forma prismatica di materiale anisotropo provoca scorrimenti lungo tutti i lati dell'elemento, indipendentemente dalla direzione di applicazione del carico. Se il materiale anisotropo è specificatamente ortotropo, allora esistono tre direzioni mutuamente ortogonali tali che l'applicazione del carico in tali direzioni produce, come per un materiale isotropo, una deformazione costante senza distorsioni nei piani da queste individuate.

Tali tre direzioni sono le direzioni principali del materiale o direzioni di simmetria o assi naturali del materiale.

Considerando una lamina composita si ha che se la direzione di applicazione del carico coincide con una direzione principale, allora ad uno sforzo normale semplice corrisponde uno stato di deformazione uniforme senza scorrimenti (Fig.2a), mentre se la direzione di applicazione del carico discosta da una direzione principale il carico produce anche scorrimenti nel piano (fig.2b).

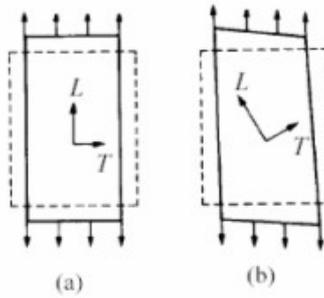


Fig 2. Deformazione di una lamina ortotropa secondo una direzione principale (a) ed una direzione deviata (b).

di seguito vi sono le relazioni costitutive di una lamina ortotropa nell'ipotesi di comportamento elastico con piccoli spostamenti.

3.1 LEGGE DI HOOKE

Dalla teoria dell'elasticità lo stato di deformazione presente nel materiale è univocamente descritto da 9 componenti di deformazione ξ_{kl} ($k,l=1,2,3$); lo stesso per lo stato di tensione σ_{ij} ($i,j=1,2,3$).

In seguito, mediante l'applicazione dell'ipotesi di comportamento elastico lineare è possibile giungere alla dichiarazione della legge di Hooke generalizzata:

$$\sigma_{ij} = k_l E_{ijkl} \xi_{kl} \quad (1)$$

Poiché i tensori σ_{ij} e ξ_{kl} sono simmetrici solo 6 componenti sono indipendenti e quindi le costanti elastiche che descrivono il comportamento di un materiale elastico anisotropo sono $6 \times 6 = 36$

Il legame di Hooke esprime una relazione di tipo definito e positivo perché esso esprime, o sottintende, un concetto di lavoro e non può produrre lavoro negativo applicando una forza: se applico una forza ad un corpo il punto di applicazione si sposta nella direzione di una componente della forza.

Mediante lo studio del potenziale elastico unitario è possibile ridurre tali 36 costanti elastiche a sole 21.

Ricordo infatti che detto Φ il potenziale elastico si ha che:

$$d\Phi = \sigma_{ij} d\xi_{ij} = \sigma_{ij} k_l E_{ijkl} d\xi_{kl} \quad (2)$$

Derivando questa rispetto alla generica componente di deformazione ξ_{kl} e invertendo l'ordine di derivazione (att: il potenziale elastico è continuo rispetto alle componenti di deformazione) si ottiene quindi il teorema di Schwarz:

$$E_{kijl} = E_{jkil} \quad (3)$$

Proprio il teorema di Swartz quindi consente di ridurre le costanti da 36 a 21.

Se il materiale in questione è anisotropo ed in particolare ortotropo (ovvero se la terna principale delle tensioni coincide con la terna principale delle deformazioni) si possono ridurre ulteriormente le costanti elastiche da 21 a 9, di cui solo 6 sono indipendenti

$$\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} = E_{1111}E_{1122}E_{1133}E_{2211}E_{2222}E_{2233}E_{3311}E_{3322}E_{3333} \cdot \xi_{11}\xi_{22}\xi_{33} \quad (4)$$

Finora il sistema è stato descritto rispetto alla terna principale di tensioni e di deformazioni. Portandosi su una terna di riferimento generico si ha l'insorgenza delle tensioni tangenziali e quindi la matrice sopra diviene una matrice 6x6. Solitamente nel sistema di riferimento generico si mettono gli indicatori delle direzioni x,y,z , in tal caso per minor complessità nella matrice sono stati mantenuti gli indicatori numerici.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} & E_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ E_{1122} & E_{2222} & E_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ E_{1133} & E_{2233} & E_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}$$

(5)

Portandosi in uno stato piano di tensione ($\sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$) è possibile infine ridurre le 6 costanti a sole 4:

$$\sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{12} = E_{11} E_{12} E_{21} E_{22} 0 0 E_{33} * \xi_{11} \xi_{22} \xi_{12} \quad (6)$$

Ed essendo $\sigma_{12} = \tau_{12}$ e $\xi_{12} = \gamma_{12}$

$$\sigma_{11} \sigma_{22} \tau_{12} = E_{11} E_{12} E_{21} E_{22} 0 0 E_{33} * \xi_{11} \xi_{22} \gamma_{12} \quad (7)$$

Invertendo la matrice sopra si ottiene la matrice che relaziona le deformazioni alle tensioni:

$$\xi_{11} \xi_{22} \gamma_{12} = S * \sigma_{11} \sigma_{22} \tau_{12} = S_{11} S_{12} S_{21} S_{22} 0 0 S_{33} * \sigma_{11} \sigma_{22} \tau_{12} \quad (8)$$

La matrice S è la matrice di elasticità inversa.

3.2 RELAZIONI TRA LE COSTANTI ELASTICHE ED I TERMINI DELLE MATRICI DI ELASTICITÀ DIRETTA E INVERSA

Nel caso di stato di tensione biassiale il comportamento meccanico di una lamina ortotropa è definito univocamente dalle 4 costanti: $E_L, E_T, G_{LT}, \nu_{LT}$.

E_L = modulo di elasticità longitudinale;

E_T = modulo di elasticità trasversale;

G_{LT} = modulo di scorrimento

ν_{LT} = rapporto di Poisson

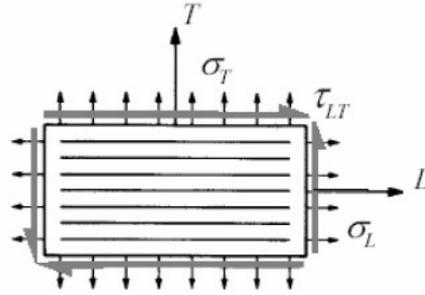


Fig.3: Schema lamina ortotropa caricata nel piano

Per una tensione monoassiale lungo la direzione longitudinale si ha:

$$\sigma_L = E_{11}\varepsilon_L + E_{12}\varepsilon_T \quad (9)$$

$$\sigma_T = E_{12}\varepsilon_L + E_{22}\varepsilon_T \quad (10)$$

Da cui:

$$\varepsilon_L = \frac{E_{22}E_{11} - E_{12}^2}{E_{22}(E_{11}E_{22} - E_{12}^2)} \sigma_L \quad (11)$$

$$\varepsilon_T = -\frac{E_{12}}{E_{22}} \varepsilon_L \quad (12)$$

E quindi:

$$E_L = \sigma_L \varepsilon_L = \frac{E_{11}E_{22} - E_{12}^2}{E_{22}} \quad (13)$$

$$\nu_{LT} = -\varepsilon_T \varepsilon_L = \frac{E_{12}}{E_{22}} \quad (14)$$

Considerando una tensione monoassiale in direzione trasversale si ottiene invece:

$$E_T = \sigma_T \varepsilon_T = \frac{E_{11}E_{22} - E_{12}^2}{E_{11}} \quad (15)$$

$$\nu_{TL} = -\varepsilon_L \varepsilon_T = \frac{E_{12}}{E_{11}} \quad (16)$$

Considerando il taglio puro:

$$\tau_{LT} = E_{33} \gamma_{LT} \quad (17)$$

$$G_{LT} = \tau_{LT} \gamma_{LT} = E_{33} \quad (18)$$

Si ricava allora:

$$E_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{TL} \nu_{LT}} \quad (19)$$

$$E_{22} = \frac{E_T}{1 - \nu_{TL} \nu_{LT}} \quad (20)$$

$$E_{12} = \frac{\nu_{LT} E_T E_T - \nu_{TL} \nu_{LT} E_L E_L}{1 - \nu_{TL} \nu_{LT}} = \frac{\nu_{TL} E_L E_L - \nu_{LT} E_T E_T}{1 - \nu_{TL} \nu_{LT}} \quad (21)$$

$$E_{33} = G_{LT} \quad (22)$$

Ricordo: $\nu_{LT} \nu_{TL} = \frac{E_L}{E_T}$ (23)

Dalle equazioni precedenti si arriva ad ottenere le relazioni tra i termini della matrice di elasticità inversa e le costanti elastiche:

$$S_{11} = \frac{1}{E_L} \quad (24)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_T} \quad (25)$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{TL} E_L}{E_T E_L} = -\frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad (26)$$

$$S_{33} = 1GLT \quad (27)$$

In definitiva le matrici di elasticità assumono la forma:

$$\text{matrice di elasticità diretta} \quad [E] = \begin{bmatrix} EL & -\nu_L T & \nu_L TL & \nu_L TET & 1 & -\nu_L T & \nu_L TL & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_L T & ET & -\nu_L TL & \nu_L TET & 1 & -\nu_L T & \nu_L TL & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L TL & -\nu_L TL & ET & \nu_L TET & 1 & -\nu_L T & \nu_L TL & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L TET & \nu_L TET & \nu_L TET & ET & 1 & -\nu_L T & \nu_L TL & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\nu_L T & \nu_L TL & -\nu_L T & -\nu_L T & ET & -\nu_L TL & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_L T & -\nu_L TL & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L TL & ET & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\text{matrice di elasticità inversa} \quad [S] = \begin{bmatrix} 1/EL & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L/ET & 1/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L/ET & \nu_L/ET & 1/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 1/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 1/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 1/ET & \nu_L/ET & 0 & 0 & 0 \\ \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & \nu_L/ET & 1/ET & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{bmatrix} \quad (29)$$

concludendo per una lamina ortotropa nel caso tridimensionale le costanti elastiche indipendenti non sono 9, bensì 5:

E_L = modulo di elasticità longitudinale;

E_T = modulo di elasticità trasversale;

G_{LT} = modulo di resistenza allo scorrimento;

ν_{LT} ; ν_{TL} = rapporti di Poisson principali.

E quindi l'analisi della lamina isotropa necessita della conoscenza di 5 costanti elastiche indipendenti.

3.3 TEORIA CLASSICA DEI LAMINATI

Per la progettazione di un laminato composito è necessario conoscere le relazioni che intercorrono tra le caratteristiche meccaniche delle singole lamine e quelle del laminato ottenuto dall'unione di queste ultime.

Sotto ipotesi semplificative tali relazioni sono individuate dalla Teoria Classica di Laminati.

Formulazione Teoria Classica dei Laminati

Ipotesi semplificative:

1. Lamine costituenti il laminato sono perfettamente incollate in modo da impedire scorrimenti reciproci anche sotto l'azione di carichi esterni;
2. Conservazione della sezione piana anche a deformazione avvenuta;
3. Deformazione ξ_z trascurabile;
4. Spessore del laminato piccolo rispetto alle altre dimensioni.

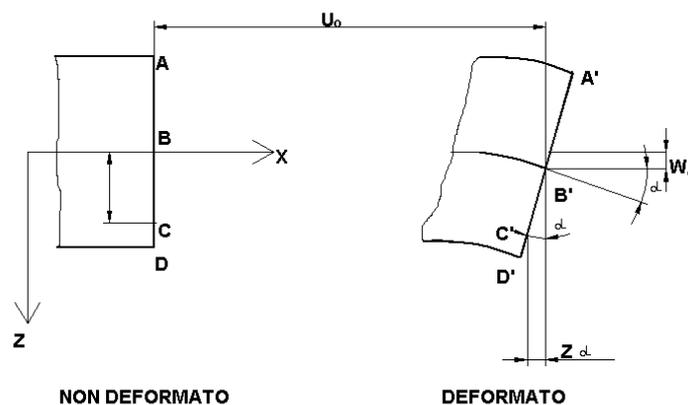


Fig.4: sezione non deformata e deformata di un laminato di piccola spessore

Sotto le ipotesi poste sopra considerando un generico segmento rettilineo ortogonale al piano medio ed indicando con u_0, v_0 e w_0 le componenti dello spostamento secondo x, y, z lo spostamento u lungo x subito dal generico punto C del segmento distante z dal piano medio vale:

$$uz = u_0 - \alpha z \quad (\text{data l'ipotesi di piccoli spostamenti } \sin \alpha = \alpha) \quad (30)$$

$$\alpha z = dw/dx = dw_0/dx \quad (\text{data l'ipotesi di piccoli spostamenti } \tan \alpha = \alpha = dw/dx) \quad (31)$$

$$uz = u_0 - z \cdot dw_0/dx \quad (32)$$

se si considera anche la deformazione in direzione y:

$$vz = v_0 - z \cdot dw_0/dy \quad (33)$$

Utilizzando le equazioni di congruenza:

$$\epsilon_x = du/dx = du_0/dx - z \cdot d^2w/dx^2 \quad \kappa_x = \epsilon_x + z \cdot \kappa_x \quad (34)$$

$$\epsilon_y = dv/dy = dv_0/dy - z \cdot d^2w/dy^2 \quad \kappa_y = \epsilon_y + z \cdot \kappa_y \quad (35)$$

$$\gamma_{xy} = du/dy + dv/dx = du_0/dy + dv_0/dx - 2z \cdot d^2w/dx dy \quad \kappa_{xy} = \gamma_{xy} + z \cdot \kappa_{xy} \quad (36)$$

Indicando con κ_x , κ_y , κ_{xy} le curvature del piano medio del laminato nel piano x-z, y-z e x-y.

In forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Dall'ultima matrice si evidenzia che le componenti di deformazione significative variano linearmente nello spessore z del laminato.

L'andamento delle tensioni invece non è lineare, ma è legato alle deformazioni dalle relazioni tensioni-deformazioni relative alle matrici di elasticità in un riferimento cartesiano arbitrario.

In linea di massima si può dire che le deformazioni hanno un andamento lineare uniforme in tutto lo spessore mentre le tensioni hanno un andamento lineare, ma solo all'interno di ciascuna lamina, tra una lamina e l'altra sono presenti discontinuità sotto forma di salti.

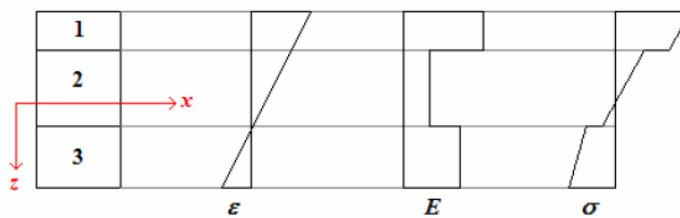


Fig.5: Andamento tipico di deformazioni e tensioni in un laminato composito

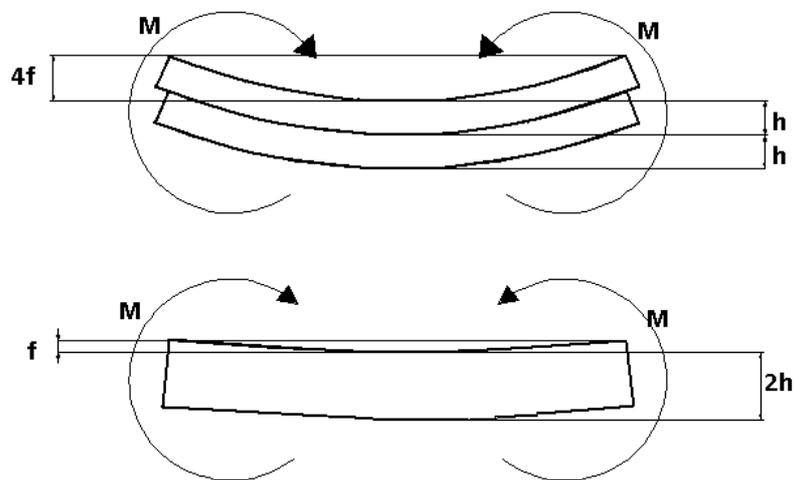
4 ADESIVO

Lo strato adesivo che garantisce la solidità dell'unione tra anima del pannello e lamine superficiali svolge un ruolo determinante, anche se erroneamente sottovalutato.

È proprio lo strato adesivo che permette l'incremento del momento di inerzia del pannello, e quindi la rigidità del pannello stesso.

Per fare un esempio basti pensare a due travi sovrapposte: se la trave superiore è semplicemente appoggiata sulla trave inferiore il complessivo se sottoposto a momento flettente si comporta come un sistema composto da due travi.

Se invece le due travi sono rese solidali mediante adesivo, il sistema si comporta come una trave alta il doppio, ed essendo che il J_{xx} (momento di inerzia, rigidità) della trave è proporzionale al cubo della trave, essa è 8 volte più rigida della trave singola e 4 volte più rigida delle due travi non solidali.



$$J_{xx} = 112bh^3$$

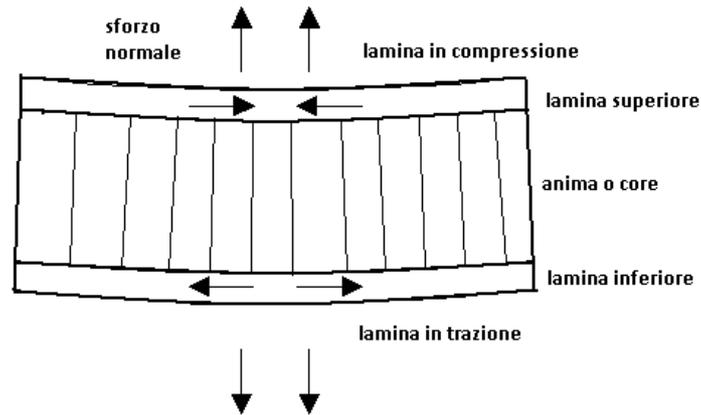
$$J_{xx1} = 2J_{xx} = 16bh^3$$

$$J_{xx2} = 112b(2h)^3 = 23bh^3$$

$$J_{xx2} / J_{xx1} = 4$$

L'aumento dell'inerzia quindi è da imputarsi alla resistenza alle sollecitazioni di taglio che si sviluppano all'interfaccia della trave.

Lo strato adesivo oltre alle sollecitazioni tangenziali che si instaurano nell'interfaccia deve poter resistere alle sollecitazioni normali che possono svilupparsi nel caso in cui una faccia sia sottoposta a sforzo normale, onde non si abbia il distacco dell'interfaccia dall'anima.



Gli adesivi usati nei pannelli sandwich, oltre alle caratteristiche di resistenza meccanica devono essere anche di densità limitata, per non appesantire il pannello stesso.

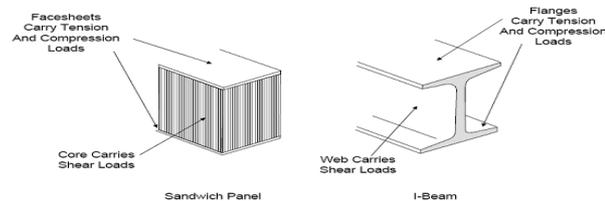
5 CORE

5.1 FUNZIONE STRUTTURALE E COMPITO DEL CORE:

la funzione principale del core è quella di aumentare il momento di inerzia del materiale, permettendo alle due lamine di distanziarsi e mantenendole in contatto. Opportune scelte del core permettono di attribuire al pannello ulteriori caratteristiche aggiuntive.

Obiettivo

Il materiale del core ha lo scopo di incrementare il momento di inerzia del pannello incrementandone lo spessore . Esso funziona come l'anima di una trave ad I, distribuendo il carico tra le due skin, o lamine.



L'aumento del momento di inerzia viene ottenuto semplicemente aumentando, come spiegato precedentemente , la distanza tra le lamine stesse. La leggerezza del core è importante per il pannello stesso, poiché diminuisce il peso generale e quindi permette utilizzi ove il peso è un fattore determinante nella scelta del materiale: vedasi aerospaziale.

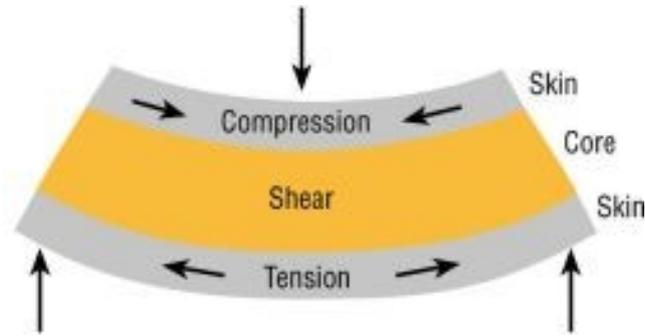
Funzionamento del core

Lo scopo del core è quello di massimizzare il momento di inerzia del pannello stesso, portando distante le due lamine, facendo le veci di collegamento tra le due lamine e attribuendo al pannello stesso eventuali proprietà derivate dalla composizione e struttura del core stesso.

Compito primario del core

Prendiamo in considerazione un pannello sandwich sottoposto a momento flettente . E' possibile vedere in figura come il core sia sollecitato sia a taglio sia compressione. A taglio sia per l'azione dei due pannelli superficiali, detti lamine, che tendono a variare la loro lunghezza, contraendosi se lamina superiore e estendendosi se lamina inferiore, sia per l'azione reazione dei vincoli applicati al pannello stesso, sia per le azioni o carichi agenti sul pannello stesso. Se la resistenza al taglio fosse molto bassa non si avrebbe aumento del momento d'inerzia, bensì si avrebbero due lamine che sottoposte a sollecitazione si comporterebbero proprio come due lamine separate. Se invece il core resiste alle sollecitazioni di taglio di tali due lamine le due lamine lavorano proprio come

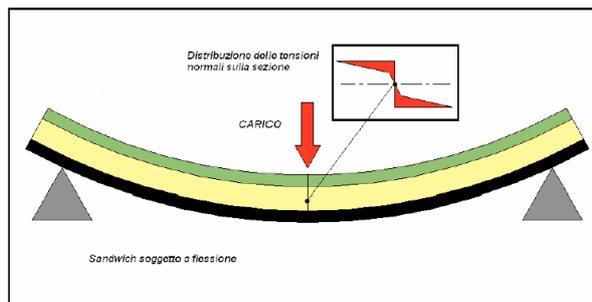
se fossero solidali, ovvero si ha un aumento del momento di inerzia più che proporzionale alla distanza tra le due lamine e quindi la rigidità della trave così formata aumenta in modo esponenziale (in tale esposizione considero che lo strato adesivo non subisca alcun scorrimento).



Per fare un esempio banale basti pensare ad una risma di fogli: se i fogli sono sciolti la risma ha rigidità flessionale molto scarsa, anzi, si piega sotto il suo stesso peso; se invece i fogli sono solidali uno all'altro la risma manifesta una resistenza flessionale molto elevata.

Quindi la resistenza flessionale della trave-pannello-ecc.. è strettamente dipendente dalla capacità di resistere alle sollecitazioni di taglio che agiscono nella trave stessa, se non entra in campo il taglio la rigidità della trave è estremamente limitata.

Il core è pure sollecitato a compressione per due motivi. Il primo sono banalmente le azioni esercitate dai carichi esterni, che tendono a schiacciare il pannello stesso, il secondo per il fatto che le lamine del pannello sottoposto a momento flettente tendono ad andare verso il piano con minor sollecitazione, ovvero verso il piano medio, in modo da scaricarsi.



Da figura si vede come le tensioni sulle lamine siano proporzionali alla distanza dal piano medio:

$$\sigma_f = M_f j_{xx} \cdot y$$

- σ_f = tensione normale sulle lamine;
- M_f = momento flettente agente sulla trave;
- J_{xx} = momento di inerzia della trave rispetto l'asse xx;
- y = distanza del punto dal piano medio

Il materiale che compone il core può essere di diverse categorie, comunque inquadrate in tre tipologie principali:

- 1) Balsa: storicamente il primo core, tuttora utilizzato nell'industria, anche se tecnologicamente avanzato in molti aspetti;
- 2) Schiume: sviluppate sotto espressa richiesta del campo nautico, per la produzione di pannelli sandwich delle forme più disparate;
- 3) Honeycomb: oggetto di questa tesi.

Per le prime due categorie in seguito vi sono sviluppati gli aspetti principali, i prodotti e alcuni confronti interni, mentre per la terza categoria vi è uno sviluppo completo.

6 BALSA



La balsa è stato il primo materiale ad essere usato come core.

L'innovazione che ha portato al suo utilizzo come materiale strutturale nel core è stata la conversione del taglio della configurazione "grano piatto" alla configurazione "grano fine", cioè si è modificato il taglio della balsa in modo da avere sempre le fibre del legno parallele tra loro e perpendicolari alla superficie.

In tal modo si ottiene una struttura del grano della balsa orientata perpendicolarmente allo skin. La fibre della balsa sono quindi orientate come le strutture honeycomb, con un notevole incremento della resistenza alla compressione e al taglio, nonché alla trazione.

Di seguito vi sono i dati tecnici del core in balsa di tre costruttori diversi:

Produttore: NIDA CORE®

Due diverse densità

	BL 6.5 R	BL 9.5 R
Resistenza compressione [MPa]	6.75	13
modulo compressione [MPa]	2239	4065
Densità [kg/m³]	96-120	128-176
Resistenza al taglio [MPa]	1.84	2.97
Modulo di taglio [MPa]	107.5	159.16
Contenuto medio di umidità %	9.66	9.66
Resistenza a trazione [MPa]	6.89	13

Produttore : DuraComposites®

Caratteristica	Normativa di riferimento	Valore standard
Resistenza compressione [MPa]	ASTM C 365	13.00
Modulo compressione [MPa]	ASTM C 365	4080
Densità [Kg/m³]	ASTM C 271	152
Resistenza al taglio [MPa]	ASTM C 273	4.30
Modulo di taglio [MPa]	ASTM C 273	162
Resistenza a trazione [MPa]	ASTM C 273	13.4
Conducibilità termica [W/m^{°C}]		0.063
Contenuto medio di umidità [%]		12

Produttore : ICORE COMPOSITIES LLC™

	Normativa di riferimento	EGBALSA LITE	EGBALSA GRADE	EGBALSA ULTRA
Resistenza compressione [MPa]	ASTM C 365	8	13.31	23.80
Modulo compressione [MPa]	ASTM C 365	2510	4127	7433
Densità [Kg/m³]	ASTM C 271	112	160	240
Resistenza al taglio [MPa]	ASTM C 273	2.16	3.13	4.90
Modulo di taglio [MPa]	ASTM C 273	123	164	258
Resistenza a trazione [MPa]	ASTM C 273	9.02	13.78	22.39
Conducibilità termica [W/m^{°C}]		0.055	0.071	0.098

Contenuto medio di umidità [%]	12	12	12
--------------------------------	----	----	----

Note comuni a tutti i produttori:

- Alta resistenza allo schiacciamento;
- Grande resistenza al taglio;
- Tendenza all'assorbimento continuo della resina con grande incremento di peso;
- Essendo un materiale ligneo le sue proprietà possono decadere se non sottoposto a manutenzione;
- Se posto in ambienti umidi la sua resistenza allo schiacciamento ed al taglio possono decadere del 20% circa, restando comunque notevolmente superiori rispetto alle caratteristiche di altri materiali;
- Buone caratteristiche isolamento termico ed acustico;

CONFRONTO DATI DIVERSI PRODUTTORI:

a parità di densità o per densità molto simili:

- Resistenza alla compressione e modulo di compressione uguali;
- Resistenza al taglio e modulo di taglio :

DuraComposites® > ICORE COMPOSITIES LLC™ > NIDA CORE®

- Resistenza alla trazione molto simili se non uguali;
- Conducibilità termica simile;
- Contenuto medio di umidità uguale.

7 SCHIUME

L'evoluzione delle schiume nel core è dovuta ad una richiesta dell'industria nautica, la quale richiedeva un core in struttura molecolare tale che permettesse la fabbricazione di parti di forma complessa.

Le schiume si suddividono a seconda del componente di cui sono composte. Di seguito sono elencate e descritte le schiume più diffuse nel mercato:

- A) PoliVinilCloruro o PVC
- B) Polietilene o PET
- C) StireneAcriiloNitrile o SAN

PVC



POLIVINILCLORURO

Prima schiuma core introdotta nell'industria nautica .

Dati forniti dal fornitore (CEL COMPONENTS®)

Proprietà della schiuma PVC							
Tipo	MC30	MC40	MC55	MC75	MC90	MC130	MC200
Densità	33	40	55	80	100	130	200
Temp.Max utilizzo[°C]	75						
Calore specifico	0.26						
Comportamento al fuoco	Autoestinguento M2						
Resistenza alla compressione [MPa] DIN53421	3	4.2	8.5	16	20	30	50
Resistenza trazione [MPa] DIN 53571	alla 6	8.5	16	20	24	40	60
Resistenza flessione [MPa] DIN 53423	alla 4.5	6	14	21	25	30	35

Dati rielaborati da varie fonti

Caratteristiche tecniche

Assorbimento energia di deformazione	Alta tolleranza al danneggiamento, deformazione notevole senza cedimento, allungamento a rottura 70%. Alta capacità di sopportare impatti senza cedere
Grado assorbimento resina	
Grado assorbimento umidità	Molto basso
Friabilità del core	
Temperatura min di utilizzo [°C]	-50
Stabilità chimica	
Tossicità ed infiammabilità	
Proprietà termiche ed acustiche	

Note: - bassa stabilità termica

Impiego: - nautico

PET

POLIETILENE TEREFALATO



Il polietilene tereftalato è uno tra i più comuni polimeri diffusi in campo industriale

In seguito ad estrusione ed espansione esso risulta una schiuma bianca e riciclabile.

Dati forniti dal fornitore (ARMACELL®)

Direzione di rilevazione caratteristiche W

		Norma di riferimento	AC80	AC100	AC115	AC135	AC150
Densità [Kg/m ³]			80	100	115	135	150
Temp. max utilizzo [°C]							
Calore specifico							
Comportamento	al		Classe B2				
fuoco							
Resistenza	a	ISO 884	1.0	1.5	1.8	2.3	2.6
compressione							
[MPa]							
Modulo	di	ISO 884	60	70	80	90	105
compressione							
[MPa]							
Resistenza	alla	ASTM C 297	1.4	1.6	1.8	2.5	2.8
trazione							
[MPa]							
Modulo di trazione		ASTM C 297	75	105	120	150	190
[MPa]							
Resistenza	alla						
flessione							
[MPa]							
Resistenza	al taglio	ISO 1922	0.6	0.9	1.0	1.3	1.4
[MPa]							
Modulo di taglio [MPa]		ASTM C 297	20	25	30	35	45
Deformazione	di	ISO 1922	35	30	20	15	10
taglio[%]							
Conducibilità	termica	Astm c 518	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
[W/mk]							

Dati rielaborati da varie fonti

Caratteristiche tecniche

Assorbimento energia di deformazione	
Grado assorbimento resina	
Grado assorbimento umidità	
Friabilità del core	Bassa
Temperatura min di utilizzo	

[°C]	
Stabilità chimica	
Tossicità ed infiammabilità	B2 (ottima)
Proprietà termiche ed acustiche	Eccellente stabilità termica

Note: - proprietà paragonabili con quelle del PVC

SAN

STIRENE ACRILONITRILE

Il SAN come materiale del core è stato introdotto a metà degli anni 90 nell'industria nautica

Dati forniti dal costruttore (ARMACELL®)

CLASSE S

	Norma di riferimento	S800	S1200	S1800
Densità [Kg/m ³]		150	210	315
Temp. max utilizzo [°C]				
Calore specifico				
Comportamento al fuoco				
Resistenza a compressione [MPa]	ASTM D1621	2.79	4.71	9.17
Modulo di compressione [MPa]	ASTM D1621	224	359	634
Resistenza alla trazione [MPa]	ASTM C 297			
Modulo di trazione [MPa]	ASTM C 297			
Resistenza alla flessione [MPa]				
Resistenza al taglio [MPa]	ISO 1922	1.85	2.91	5.21
Modulo di taglio [MPa]	ASTM C 297	64.8	98.4	157
Deformazione di taglio[%]	ISO 1922	16	13	7
Conducibilità termica [W/mk]	Astm c 518	0.04	0.05	0.06

Dati accessori del costruttore

Caratteristiche tecniche

Tolleranza al danneggiamento	Alta
Grado assorbimento resina	Bassa grazie alle piccole dimensioni delle celle, celle configurazione chiusa
Grado assorbimento umidità	Nulla,impiego in profondità marine
Friabilità del core	Bassa
Temperatura min di utilizzo	

[°C]	
Stabilità chimica	No problemi di outgassing
Tossicità ed infiammabilità	
Proprietà termiche ed acustiche	

Impiego : opera a profondità marine elevate, può essere anche impiegata al posto di compensati marini.

CLASSE P

	Norma di riferimento	P600	P800	P1200
Densità [Kg/m ³]		122	155	220
Temp. max utilizzo [°C]		85	85	85
Calore specifico				
Comportamento al fuoco				
Resistenza a compressione [MPa]	ASTM D1621	1.81	2.77	5.16
Modulo di compressione [MPa]	ASTM D1621	125	186	330
Resistenza alla trazione [MPa]	ASTM C 297			
Modulo di trazione [MPa]	ASTM C 297			
Resistenza alla flessione [MPa]				
Resistenza al taglio [MPa]	ISO 1922	1.43	1.89	2.83
Modulo di taglio [MPa]	ASTM C 297	56	77	121
Deformazione di taglio[%]	ISO 1922	67	59	60
Conducibilità termica [W/mK]	ASTM C 518	0.04	0.04	0.05

Dati accessori del costruttore

Caratteristiche tecniche	
Tolleranza al danneggiamento	Estrema
Grado assorbimento resina	Bassa
Grado assorbimento umidità	
Friabilità del core	Bassissima
Temperatura min di utilizzo	

[°C]	
Stabilità chimica	No tendenza all'outgassing
Tossicità ed infiammabilità	
Proprietà termiche ed acustiche	

Impieghi : resiste molto bene allo stress, usabile in strutture dinamiche

CLASSE A

	Norma di riferimento	A600	A800	A1200
Densità [Kg/m ³]		116.5	150	210
Temp. max utilizzo [°C]	DIN 53424	63	63	63
Calore specifico				
Comportamento al fuoco				
Resistenza compressione [MPa]	a ASTM D1621	1.4	2.1	3.9
Modulo compressione [MPa]	di ASTM D1621	83	227	217
Resistenza alla trazione [MPa]	ASTM C 297	1.8	2.5	3.9
Modulo di trazione [MPa]	ASTM C 297	120	183	321
Resistenza alla flessione [MPa]				
Resistenza al taglio [MPa]	ISO 1922	1.2	1.6	2.6
Modulo di taglio [MPa]	ASTM C 297	34	47	76
Deformazione di taglio[%]	ISO 1922	64	50	46
Conducibilità termica [W/mK]	Astm c 518	0.04	0.04	0.05

Dati accessori del costruttore

Caratteristiche tecniche

Tolleranza al danneggiamento	Alta
------------------------------	------

Grado assorbimento resina	Bassa grazie alle piccole dimensioni delle celle
Grado assorbimento umidità	
Friabilità del core	
Temperatura min di utilizzo [°C]	
Stabilità chimica	Alta
Tossicità ed infiammabilità	
Proprietà termiche ed acustiche	

Impieghi : impieghi marini

Note comuni ai materiali SAN: allungamento a rottura superiore al 65%

CONFRONTO TRA LA SCHIUME

Caratteristica in esame	Norma di riferimento	Tipologie materiali e classi					
		PVC MC130	PET AC135	SAN S800	SAN P600	SAN A600	
Densità [Kg/m ³]		130	135	150	122	116.5	
Temp. max utilizzo [°C]	DIN 53424	75			85	63	
T. minima		-50					
Calore specifico		0.26					
Comportamento fuoco	al	Autoest. M2	B2				
Resistenza compressione [MPa]	a	ASTM D1621	30	2.3	2.79	1.81	1.4
Modulo compressione [MPa]	di	ASTM D1621		90	405	125	83
Resistenza alla trazione [MPa]		ASTM C 297	40	2.5	1.85		1.8
Modulo di trazione [MPa]		ASTM C 297		150	268		120
Resistenza flessione [MPa]	alla		30				
Resistenza al taglio [MPa]		ISO 1922		1.3	1.85	1.46	1.6
Modulo di taglio [MPa]		ASTM C 297		35	64.5	56	47
Deformazione di taglio[%]	di	ISO 1922		15	16	67	64

Conducibilità termica [W/mK]	Astm c 518	0.037	0.04	0.04	0.004
Tolleranza al danneggiamento	Molto alta. Alto ass en.		Alto	Estrema	Alta
Grado assorbimento resina			Basso	Basso	Bassa
Grado assorbimento umidità		Basso	Nulla		
Friabilità del materiale			Basso	Bassissimo	
Stabilità chimica			No outgassing	No outgassing	No outgassing
Tossicità ed infiammabilità		Buona			
Proprietà termiche ed acustiche		Buona			

Conclusioni:

Le schiume hanno proprietà molto differenti tra di loro, ed è difficile confrontarle con i dati forniti dai costruttori perché essi forniscono dati parziali e spesso riferiti a normative differenti.

Si può affermare però che:

- Le caratteristiche meccaniche del PVC sovrapazano notevolmente quelle delle altre schiume;
- Le deformazioni al taglio sono notevoli per tutte le schiume;
- La conducibilità termica è bassa per tutte le schiume, cosa che attribuisce ad esse la proprietà di isolante termico;

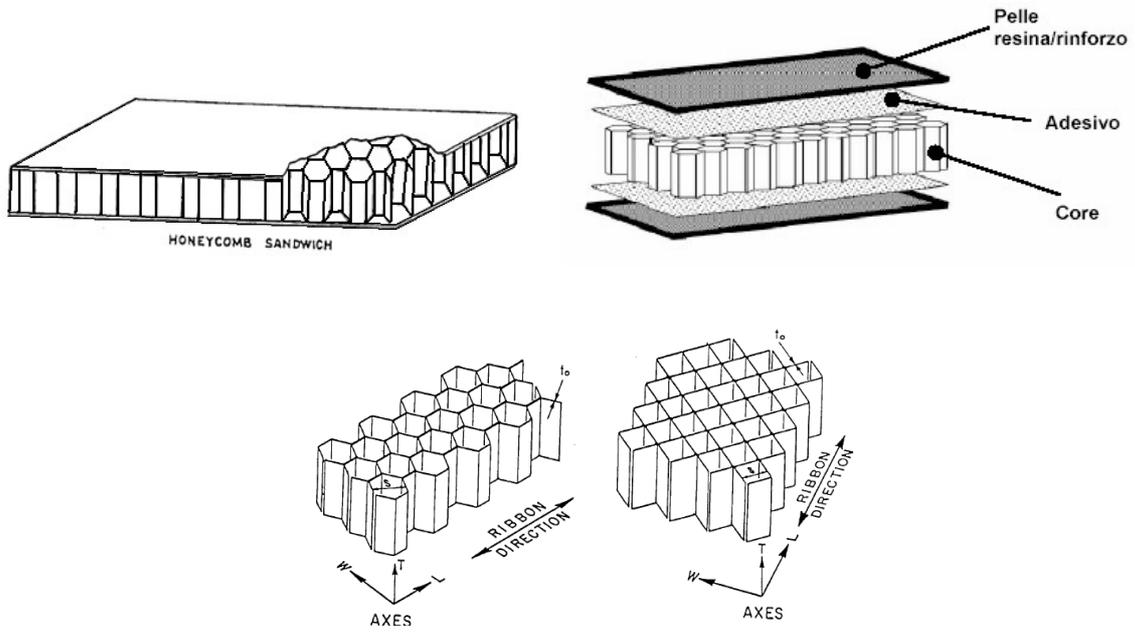
materiale	Conducibilità termica [W/mk]
Acciaio 0.1 C	50
Cotone tessuto	0.07
Lana di vetro	0.04
Sughero	0.04

- Alta tolleranza al danneggiamento per tutte le schiume, con assorbimento di energia all'impatto;
- Stabilità chimica buona, per ogni schiuma però bisogna conoscere gli ambienti di lavoro ed i fluidi con cui viene a contatto.

8 GENERALITA' E MECCANICA DEGLI HONEYCOMB

8.1 INTRODUZIONE

Al contrario dei Core in balsa o schiuma nel Core ad honeycomb il core non si presenta come un blocco massivo unico, bensì come una struttura a nido d'ape, da qui il nome, in grado di svolgere adeguatamente le funzioni atte al Core massimizzandone la leggerezza.



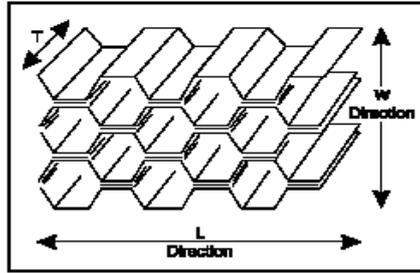
honeycomb a celle esagonali e celle quadrate

Le forme delle celle dell'honeycomb possono essere molteplici a seconda della specializzazione dell'honeycomb stesso.

Ogni produttore di honeycomb ha in catalogo prodotti con forme delle celle studiate per specifiche funzioni, ma le forme più diffuse sono le seguenti:

8.2 BREVE COMPENDIO SULLE FORME DELLE CELLE

1) *Forma esagonale*

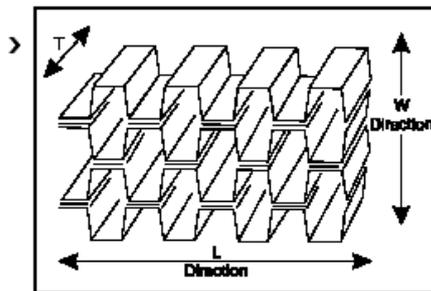


E' la forma più comune presente sul mercato, sia in materiali metallici che non metallici.

Ha lo svantaggio di una limitata formabilità ma è strutturalmente efficiente.

È la configurazione per cui sono stati sviluppati i brevetti di produzione allegati in questa tesi. Una sua evoluzione sta nella forma sovraespansa.

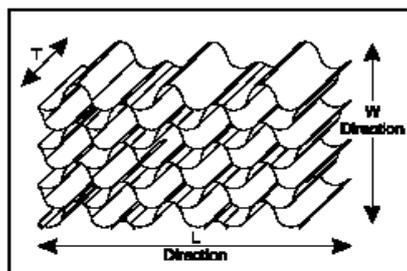
2) *Forma Sovra-Espansa (OX)*



La forma esagonale viene sovra-espansa nella direzione W, in modo tale da ottenere celle quasi rettangolari tali da facilitare la curvatura nella direzione L.

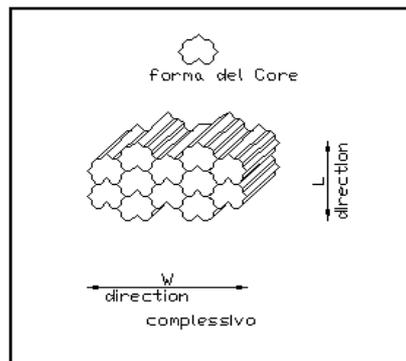
Tale configurazione aumenta la resistenza al taglio nella direzione W e la decrementa in direzione L rispetto alla resistenza dei pannelli a cella esagonale

3) *Flex-core*



Tale configurazione permette un eccezionale formabilità a piegamento dei pannelli. Forma raramente usata in pannelli di materiali metallici o carta aramidica.

4) *Double-Flex*



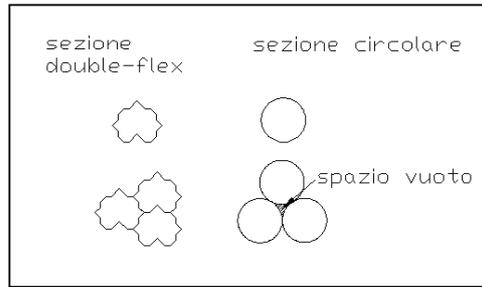
La double-flex è una cella, costituita unicamente da fogli di alluminio, avente un'eccellente formabilità ed un'alta resistenza specifica allo schiacciamento, grazie alla sua forma.

La sua forma permette di massimizzare il raggio di inerzia portando tutta la sezione del materiale in periferia.

Tale forma è stata studiata specificamente dalla HEXWEB® HONEYCOMB.

La forma della cella ha due caratteristiche che congiuntamente la rendono la più adatta a sopportare i carichi di schiacciamento:

- si ha la massimizzazione del raggio di inerzia;
- permette il perfetto accostamento delle celle: ovviamente in un honeycomb le pareti cellulari devono essere tutte congiunte, non si possono avere dei vuoti. Se si mettesse una sezione circolare (presupponendo l'esistenza di honeycomb di tale forma), la più indicata per sopportare carichi assiali (problema dell'instabilità all'equilibrio), essa lascerebbe dei vuoti. Tale forma invece annulla i vuoti. La contiguità delle pareti cellulari dà un contributo non indifferente di resistenza alla cella stessa.



Confronto tra sezione circolare e sezione double flex

Sono state sviluppate molte altre forme delle celle, che però sono meno diffuse o conseguenti a specifiche richieste. Nel caso di necessità è possibile intraprendere lo studio di una nuova forma di celle, compatibilmente con i processi produttivi esistenti per la loro produzione.

Per poter sviluppare la meccanica degli honeycomb si è deciso di sviluppare la forma esagonale regolare, poiché essa è storicamente la più nota e la più diffusa commercialmente.

8.3 STUDIO DELLA MECCANICA DEGLI HONEYCOMB

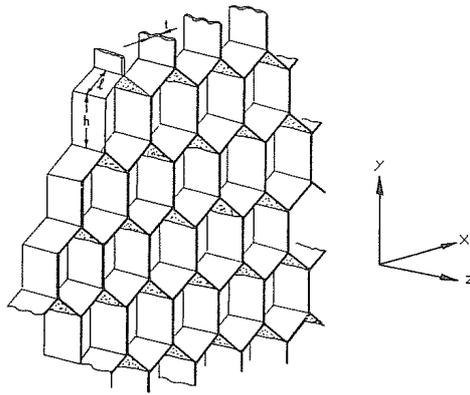
8.3.1 INTRODUZIONE E SINAPSI

Noi usiamo la parola honeycomb in senso lato per descrivere un insieme di celle prismatiche identiche, con pareti in comune, aventi lo scopo di aumentare il momento di inerzia, quindi rigidità, di pannelli strutturali.

Le celle possono essere di forma esagonale, proprio come il favo, o honeycomb, delle api ma possono essere anche di altre forme: triangolari, quadrate, romboidali o altro ancora.

8.3.2 MECCANISMI DEFORMATIVI NEGLI HONEYCOMB

Lo studio dei meccanismi deformativi viene fatto su celle esagonali, fra le più comuni in commercio.



In tale caso le celle vengono sollecitate nel loro piano, lungo gli assi X e Y

Fig.1: Un honeycomb avente celle esagonali. le proprietà nel piano son quelle relative al carico applicato nel piano XY

La rigidezza e le resistenze nel piano (in questo caso nel piano XY) sono quelle più basse poichè le sollecitazioni tendono a curvare le pareti cellulari.

Le rigidzze e la resistenza fuori dal piano (in direzione Z) sono molto maggiori perché loro richiedono un estensione o una compressione delle pareti cellulari.

Per questo bisogna distinguere tra **proprietà nel piano** e **proprietà fuori dal piano**.

Lo studio delle proprietà nel piano esplicita i meccanismi con cui il solido cellulare si deforma e giunge a rottura.

Lo studio delle proprietà fuori dal piano invece è necessario per la progettazione del core, o anima, dei pannelli sandwich.

8.3.2.1 Deformazione Nel Piano

La **Fig.2** mostra curve di tensione-deformazione per sollecitazioni di trazione-compressione di un honeycomb elastomerico (una gomma), un honeycomb elasto-plastico (un metallo) e per un honeycomb elasto-fragile (un ceramico). Tali curve hanno sostanzialmente la stessa forma, ma per diverse ragioni. In

compressione tutti mostrano un regime lineare elastico seguito da un plateau di stress approssimativamente costante, che conduce in un regime avente un sensibile aumento di stress.

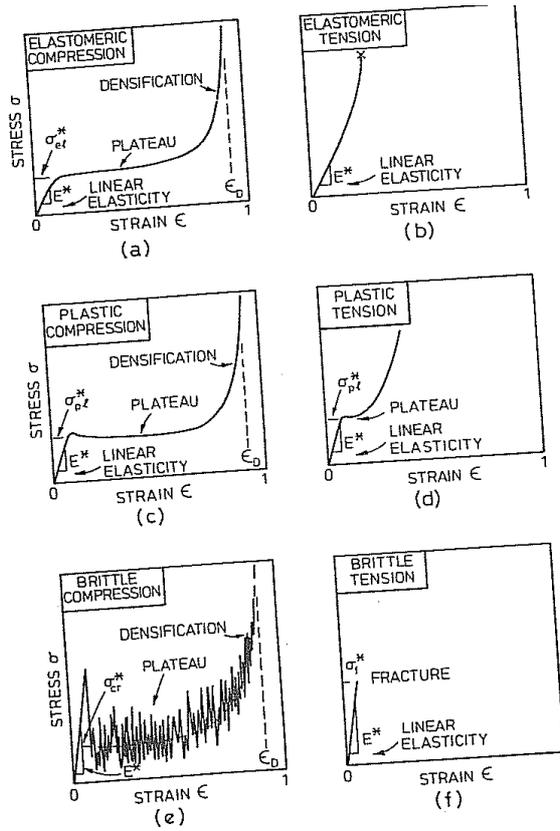


Fig.2: grafico test trazione-compressione / deformazione su honeycomb di tipo: (a) (b) elastomerici, (c) (d) elastoplastici, (e) (f) elastofragili.

Ogni regime è associato a meccanismi di deformazione che possono essere identificati mediante l'analisi delle foto dei modelli degli honeycomb (Fig.3)

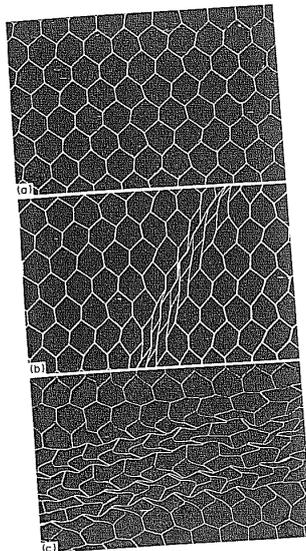


Fig.3: meccanismi deformativi nel piano di honeycomb elastoplastico: (a) honeycomb in alluminio indeformato, (b) cedimento plastico delle pareti cellulari caricate a compressione in direzione X, (c) cedimento plastico delle pareti cellulari caricate a compressione in direzione Y.

Una volta caricati le pareti cellulari si incurvano, in modo elastico lineare, naturalmente a condizione che le pareti cellulari siano esse stesse di materiale elasto-lineare. Ma quando le pareti cellulari giungono al carico critico esse cominciano a collassare: il collasso di materiali elastomerici avviene mediante deformazione elastica delle pareti cellulari, quindi esso è recuperabile, nei materiali avente limite di snervamento esso avviene mediante la formazione di cerniere plastiche nella sezione di massimo momento (e quindi massima tensione) nel membro; nei materiali fragili invece esso avviene mediante rottura fragile delle pareti cellulari (in tal caso ovviamente il collasso non è più recuperabile).

All'aumentare della densità relativa aumenta la rigidità relativa delle pareti cellulari. Quando la resistenza delle pareti cellulari decade e la cella collassa essa dà un alto modulo e nel grafico tensione-deformazione compare un plateau. Inizialmente le pareti cellulari si piegano con una deformazione elasto-lineare avente la stessa pendenza, e quindi lo stesso modulo, come nella sollecitazione di compressione. Ma in trazione gli honeycomb elastomerici non si deformano, essi invece sono soggetti alla rotazione delle pareti cellulari attorno all'asse della tensione, e la rigidità aumenta. Gli honeycomb plastici si comportano in modo simile a quando sono in compressione: si ha la formazione di cerniere plastiche, che permette una notevole deformazione e un quasi costante plateau di sforzo. Gli honeycomb fragili invece cedono improvvisamente, ad un carico elastico inferiore a quello teorico. Come in un solido la frattura, se sollecitata, si estende e la sua estensione può essere calcolata mediante la meccanica della frattura. L'incremento della densità ha un effetto simile a quello che ha in compressione: il modulo elastico, la cerniera plastica e lo sforzo della rottura fragile incrementano.

8.3.2.2 Deformazione Fuori Dal Piano

Gli honeycomb sono molto più rigidi se vengono caricati lungo l'asse di sviluppo del prisma delle celle, ovvero parallelamente a Z. la stessa cosa se vengono sollecitati nel piano di taglio (tipo quando i pannelli sono caricati in curvatura). In questi casi la deformazione lineare elastica iniziale coinvolge significative deformazioni assiali o di taglio delle celle stesse. In compressione il regime lineare elastico viene troncato dall'instabilità e la frattura finale avviene mediante strappo o schiacciamento.

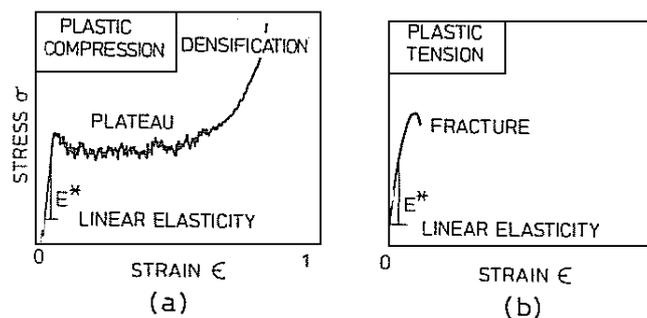


Fig.5: curve tensione-deformazione per un asse Z, sollecitato a compressione (a) e a trazione (b)

8.3.3 PROPRIETÀ NEL PIANO DEGLI HONEYCOMB: CARICO MONOASSIALE

Analizziamo l'effetto del carico nel piano X-Y. Se l'esagono è regolare e le pareti cellulari hanno medesimo spessore il piano è isotropico: le proprietà nel piano non dipendono dalla direzione. Tale struttura ha due moduli elastici indipendenti (modulo di elasticità longitudinale E e modulo di elasticità tangenziale G) ed un singolo valore del plateau di sforzo.

Se l'esagono è irregolare o se alcune pareti cellulari sono più spesse di altre allora l'honeycomb non è isotropico nel piano e per descrivere completamente le proprietà nel piano servono quattro moduli elastici indipendenti (E_1, E_2, G_{12} e V_{12} che è il rapporto di Poisson, nel caso di direzione 1 - 2, nel caso di direzioni x e y come da me deciso: E_x, E_y, G_{xy} e V_{xy}) e due diversi valutazioni del plateau di sforzo.

Gli honeycomb ottenuti mediante incollaggio di alcune pareti nella cella sono anisotropi, avendo pareti di spessore diverso se non l'angolazione degli angoli interni diversi da 120° .

Le proprietà dei materiali delle pareti cellulari sono spesso prese da manuali. Tali dati sono affidabili per entrambi i moduli di elasticità nel caso di materiali metallici, nel caso invece di materiali ceramici e polimerici tale riferimento da manuali non è affidabile. Gli honeycomb in materiali ceramici e polimerici hanno le pareti cellulari porose; quindi le loro proprietà sono da rilevare proprio sulle pareti cellulari.

Il modulo di Young è possibile rilevarlo mediante misurazione della frequenza di vibrazione dell'honeycomb stesso sottoposto a vibrazione, mediante l'uso di un microfono collegato ad un analizzatore di spettri. Il modulo di flessione può essere ricavato poi dal calcolo avendo come dati la frequenza di oscillazione ed il peso (Hunt 1993). Il carico di rottura infine può essere ottenuto rilevando la deformazione della diagonale di una cella quadrata sottoposta a carico.

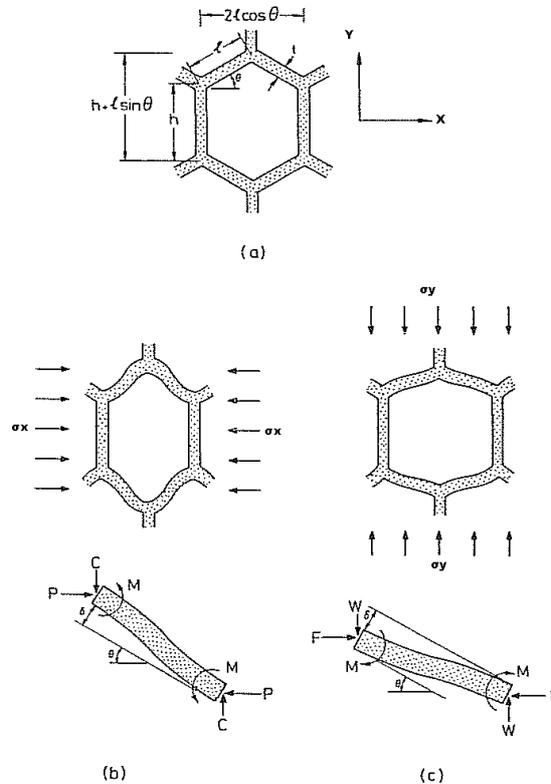


Fig.6: deformazione delle celle mediante curvatura delle pareti cellulari

a) cella indeformata,
lungo X

b) cella deformata da carico
c) cella deformata da carico lungo Y

8.3.3.1 Deformazione Lineare-Elastica

Quando un honeycomb, caricato in direzione X o Y si deforma in modo lineare le pareti cellulari si incurvano. La reazione può essere descritta da 5 moduli: 2 moduli di Young E_x^* , E_y^* , un modulo elasticità longitudinale G_{xy}^* e due rapporti di poisson ν_{xy}^* e ν_{yx}^* . Non sono tutti indipendenti

$$E_x \cdot V_{yx} = E_y \cdot V_{xy} \quad (1)$$

Sono 4 i moduli indipendenti.

Calcolo dei moduli di Young: $E_x - E_y$

I due moduli di young sono calcolati col metodo illustrato in **Fig6**.

Lo sforzo in direzione X (Fig.b) causa la curvatura di un insieme di parti cellulari. Il momento M tende ad incurvare le pareti della cella

$$M = Pl \sin^2 \theta \quad (2)$$

$$P = \sigma x (h + l \sin \theta) b \quad (3)$$

Dalla teoria della linea elastica

$$\delta = Pl^3 \sin^3 \theta / 12 E_s I \quad (4) \quad \text{dove } I \text{ è il momento di inerzia della parete cellulare.}$$

Il componente $\delta \sin \theta$ è parallelo ad X, dando l'allungamento

$$\epsilon_x = \delta \sin \theta \cos \theta = \sigma l^4 \sin^3 \theta \cos \theta / 12 E_s I \quad (5)$$

Il modulo di Young parallelo ad X è $E_x = \sigma / \epsilon_x$

$$E_x \cdot E_s = 3 \cos^2 \theta / (l^4 \sin^3 \theta) \quad (6)$$

Lo sforzo in direzione Y (Fig.c) causa

$$M = Wl \cos^2 \theta \quad (7)$$

Le pareti si deformano con

$$\delta = Wl^3 \cos^3 \theta / 12 E_s I \quad (8) \quad \text{dove } I \text{ è il momento di inerzia della parete cellulare.}$$

Il componente $\delta \cos \theta$ è parallelo ad Y, dando l'allungamento

$$\epsilon_y = \delta \cos \theta (h + l \sin \theta) = \sigma l^4 \cos^3 \theta (h + l \sin \theta) / 12 E_s I \quad (9)$$

Il modulo di young parallelo a Y produce un allungamento di

$$E_y \cdot E_s = 12 (h + l \sin \theta) \cos^3 \theta / l^4 \quad (10)$$

Se le celle sono esagoni regolari i moduli sono uguali:

$$E_x \cdot E_s = E_y \cdot E_s = 23 t l^3 \quad (11)$$

:

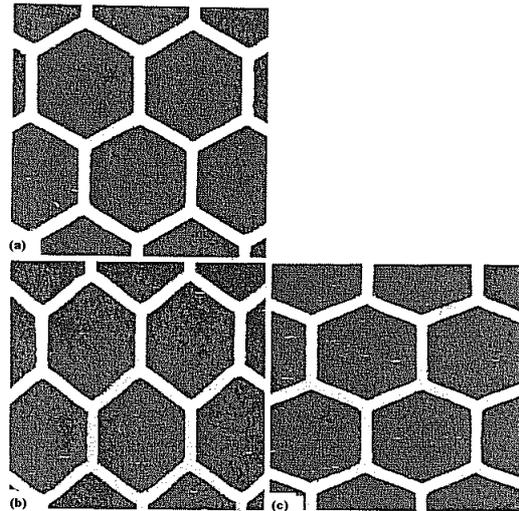


Fig.7: meccanismi deformativi in materiali elastomerici:

- a) *honeycomb in materiale elastico con celle esagonali regolari;*
- b) *pareti cellulari incurvate per compressione in X;*
- c) *pareti cellulari incurvate per compressione in Y.*

Quando l'honeycomb viene caricato in direzione X o Y i tratti inclinati dell'esagono portano carico assiale e di taglio in aggiunta al carico di flessione considerato. Questo ha due effetti:

- produce una deformazione assiale e di taglio del membro, che per t/l piccoli è trascurabile;
- esso crea l'effetto trave-colonna: cioè un momento addizionale causato dal fatto che i carichi assiali non sono coassiali. Ciò ingrandisce il momento di flessione.

Il rapporto di poisson viene calcolato facendo il rapporto tra la deformazione normale e parallela alla direzione di carico.

$$\text{Per sforzi lungo X: } \nu_{xy}^* = -\frac{C_y}{C_x} = \cos 2\theta \frac{h}{l} + \sin \theta \sin \theta \quad (12)$$

$$\text{Per sforzi lungo Y: } \nu_{yx}^* = -\frac{C_x}{C_y} = \frac{h}{l} + \sin \theta \sin 2\theta \cos 2\theta \quad (13)$$

$$\text{Per esagoni regolari } \nu_{xy}^* = \nu_{yx}^* = 1 \quad (14)$$

Calcolo del modulo di taglio G_{xy}^*

Il modulo di taglio viene calcolato col metodo di figura 8.

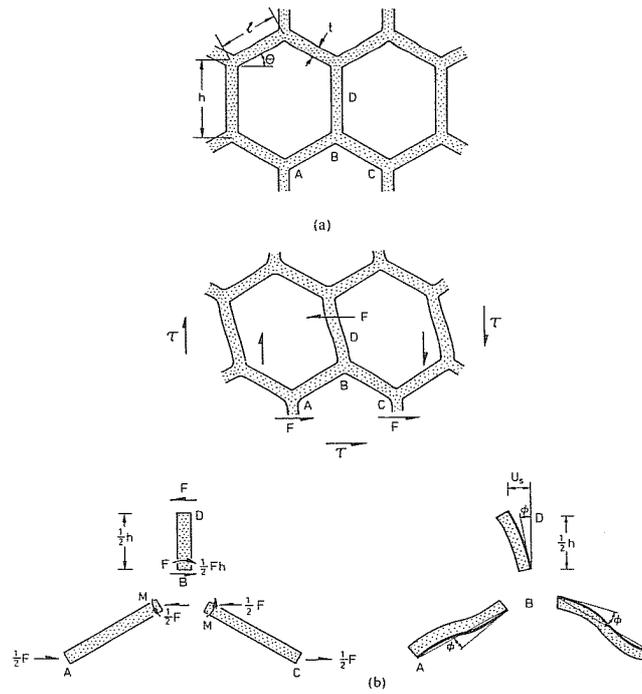


Fig.8: celle deformate mediante curvatura delle pareti e rotazione

a) celle indeformate;

b) i carichi, momento, spostamento e rotazione causati dallo sforzo di taglio.

La deformazione di taglio u_s è interamente dovuta alla curvatura della trave BD ed alla sua rotazione (dell'angolo Φ) attorno al punto B.

Sommando i momenti in B si ottiene il momento applicato ai membri AB e BC:

$$M = Fh^4 \quad (15)$$

L'angolo di rotazione risulta:

$$\Phi = Fh/24Esl \quad (16)$$

Lo spostamento dovuto al taglio del punto D relativamente al punto B vale:

$$U_s = \Phi \cdot h^2 + F/3Esl \cdot h^3 = Fh^2/48Esl(1+2h) \quad (17)$$

La deformazione a taglio vale:

$$\gamma = 2U_s/h + l \sin \theta = Fh/24Esl \cdot (1+2h) + l \sin \theta \quad (18)$$

La tensione tangenziale vale:

$$\tau = F/2l \cos \theta = G_{xy} \cdot \gamma \quad (19)$$

Da cui

$$G_{xy} = \tau / \gamma \quad (20)$$

oppure

$$G_{xy} \cdot E_s = t/3 \cdot (hl + \sin \theta) h l^2 \cdot (1+2h/l) \cos \theta \quad (21)$$

Per esagoni regolari si riduce a:

$$G_{xy} \cdot E_s = t/3 \cdot 0.57 = 0.25 \cdot E E_s \quad (22)$$

Che rispetta la relazione valevole per i solidi isotropici $G = E / (2 \cdot (1 + \nu))$ (23)

8.3.3.2 Instabilità Elastica

Il plateau nella curva sforzo-deformazione in compressione per i materiali elastomerici è causato dall'instabilità elastica.

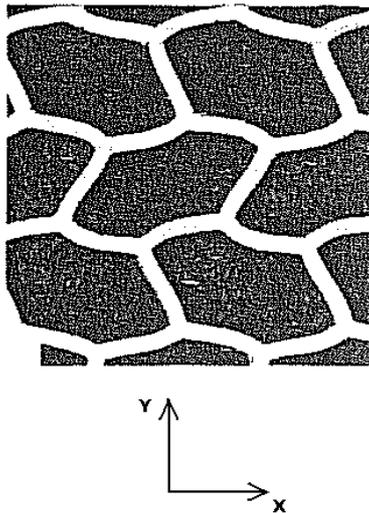


Fig.9

La Fig.9 mostra come le pareti cellulari siano quasi parallele alla direzione di carico (Y).

Come una colonna soffre del fenomeno dell'instabilità al carico di punta così l'honeycomb tende all'instabilità elastica quando il carico applicato eccede al carico limite

$$P_{cr} = n^2 \pi^2 E s l h^2 \quad (24)$$

n: rigidezza rotazionale del nodo.

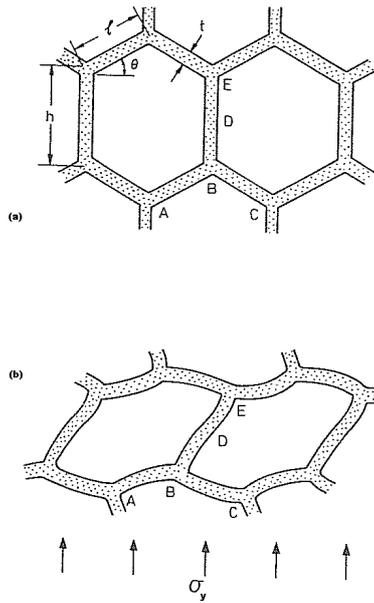


Fig.10

La figura 10 mostra l'instabilità dell'honeycomb elastomerico quando viene compresso in direzione Y (se viene compresso in direzione X si ha la semplice curvatura)

Il carico per colonna (colonne EB in fig) vale:

$$P_{crit} = 2 \sigma_y l b \cos \theta \quad (25)$$

Il collasso elastico si ha quando il carico supera il carico critico, raggiungendo la tensione di collasso elastico $(\sigma_{*el})_2$

$$P_{crit} E s^* Area = (\sigma_{*el})_2 E s = n^2 \pi^2 h^2 \frac{1}{12} b t^3 \cdot 12 l^* \cos \theta \cdot b = \pi^2 n^2 t^3 24 l^* h^2 \cos \theta \quad (26)$$

Rimane però da calcolare il fattore di contrasto n alla rotazione del nodo :

- n= 0.50 se rotazione libera;
- n=2 se rotazione non permessa.

I valori sono compresi tra tali limiti.

Fattore di contrasto per compressione monoassiale:

h/l	1.0	1.5	2.0
N	0.686	0.760	0.806

Esagono regolare

In trazione naturalmente l'instabilità elastica di questo tipo non avviene, infatti la cella continua a distorcersi mediante curvatura.

8.3.3.3 Collasso plastico

Metalli e molti polimeri sono solidi elasto-plastici. Gli honeycomb di questo tipo collassano plasticamente quando il momento di curvatura delle pareti raggiunge il momento plastico. Tali materiali hanno plateau nella curva sforzo-deformazione sia in compressione che in trazione quando raggiungono la tensione di collasso plastico σ_{pl}^* .

Considero prima il carico in direzione X.

Il limite superiore del collasso plastico è dato dal lavoro fatto dalle forze:

$$P = \sigma_x \cdot h + l \sin \theta \cdot b \quad (27)$$

Lavoro sulle cerniere plastiche A B C D:

$$4MP\phi = 2 \cdot \sigma_x \cdot b \cdot h + l \sin \theta \cdot \phi \cdot l \sin \theta \quad (28)$$

Momento plastico totale in curvatura:

$$M_p = 14 \sigma_{ys} \cdot b \cdot t^2 \quad (29)$$

dove σ_{ys} = tensione di snervamento delle pareti cellulari.

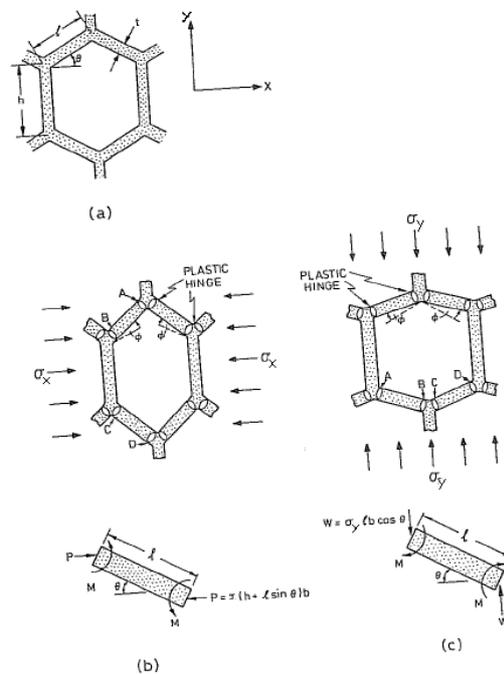


Fig.11:

Deformazione delle celle per collasso plastico: a) cella esagonale indeformata, b) e c) rotazioni, momenti e forze di carico per carichi in direzione x e y.

Valore di collasso plastico in direzione X:

$$\sigma_{pl} \sigma_y = t l^2 \cdot 12 h l + \sin \theta \sin \theta \quad (30)$$

Massimo momento di curvatura

$$M_{max} = 12 \sigma_x h + l \sin \theta \cdot b \cdot l \cdot \sin \theta \quad (31)$$

Per esagoni regolari

$$(\sigma_{pl} \sigma_y)_x = t l^2 \cdot 23 \quad (32)$$

Valore di collasso plastico in direzione Y:

$$\sigma_{pl} \sigma_y = t l^2 \cdot 12 \cos 2\theta \quad (33)$$

Il momento di curvatura vale:

$$M_{max} = 12 \sigma_y \cdot l^2 \cdot b \cdot \cos 2\theta \quad (34)$$

Che in caso di esagono regolare si riduce a

$$(\sigma_{pl} \sigma_y)_y = t l^2 \cdot 23 \quad (35) = (32) \text{ dato che esagoni regolari}$$

La deformazione plastica da taglio viene trattata in modo analogo.

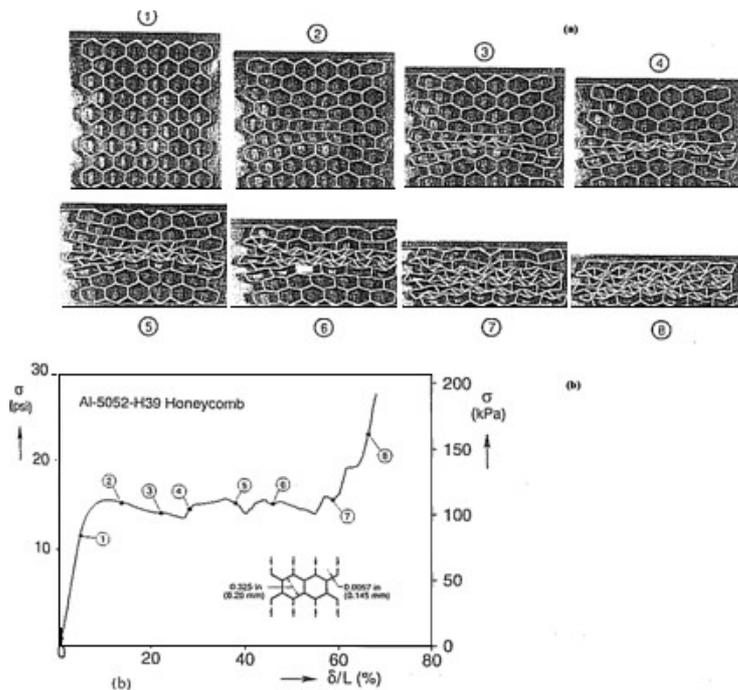
Se l'honeycomb è caricato da solo taglio nel piano XY con lo sforzo di taglio τ_{xy} , si formano cerniere plastiche nelle pareti verticali. Se il momento esercitato dalle forze $Fh/2$ supera il momento plastico l'honeycomb si taglia plasticamente, dando un limite inferiore per la resistenza in piano al taglio di:

$$(\tau_{pl})_{xy} \sigma_y = 14 \cdot t l^2 \cdot 1 h / l \cos \theta \quad (36)$$

Che per esagoni regolari si riduce a: $(\tau_{pl})_{xy} \sigma_y = 12 \cdot \sqrt{3} \cdot t l^2 \quad (37)$

Sotto talune condizioni l'instabilità elastica può procedere come un collasso plastico. Perché questo accada è necessario che la densità (t/l) sia inferiore al valore critico che è stato trovato impostando $(\sigma_{cr})_y = (\sigma_{pl})_y$ da cui si ricava per gli esagoni regolari

$$(t/l)_{crit} = 3 \cdot \sigma_{ys} / E_s \quad (38)$$



Sviluppo post-sneramento

(tratto dagli studi di Kyriakides, 1994)

Fig.11: schiacciamento dell'honeycomb in alluminio:

- (a) sequenza di deformazione della configurazione;
 (b) grafico della prova;

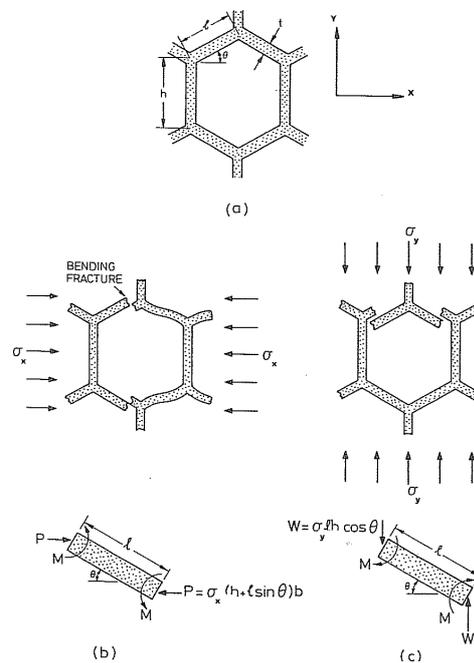
nella parte (a) è stata fotografata la deformazione dell'honeycomb all'incrementare dello sforzo con deformazione controllata durante un test di compressione monoassiale.

In regime elastico la deformazione è omogenea in tutta la sezione. Quando viene superata la tensione limite la deformazione comincia a localizzarsi. Dentro all'intorno la cella collassa con la deformazione di taglio, mentre fuori dall'intorno la struttura continua a deformarsi uniformemente e simmetricamente. Con l'incrementarsi dello sforzo la deformazione nelle celle adiacenti, nella stessa fascia dell'intorno, comincia ad essere asimmetrica.

Alla fine le pareti delle celle della prima riga che collassa entrano in contatto: l'incremento del carico necessario per un'ulteriore deformazione riflette la ripresa complessiva della risposta. Questa sequenza di eventi si ripete nelle righe adiacenti e alla fine tutte le righe collassano. Da questo punto in poi si ha una netta ripresa nella pendenza della curva sforzo-deformazione.

8.3.3.4 Frattura fragile

Gli honeycomb in materiali fragili quali ceramica o vetro si rompono in maniera fragile. In trazione la cella si rompe velocemente in maniera fragile, in compressione la cella si schiaccia progressivamente.



Rottura a Compressione

Fig.12: rottura fragile di un honeycomb compresso:

- (a) honeycomb indeformato;
 (b) e (c) forze e momenti che portano a rottura per carico in direzione X e Y.

Lo sforzo σ_x o σ_y applicato curva le pareti cellulari. Se la tensione sulla superficie delle pareti supera la tensione limite di rottura σ_{fs} la cella si rompe.

Le tensione superficiale causata dal momento vale:

$$\sigma_{max} = \frac{6M_{max}}{bt^2} \quad (39)$$

Momento di rottura-frattura:

$$M_f = 16\sigma_{fs} * b * t^2 \quad (40)$$

Il momento causato da σ_x e σ_y è già stato calcolato:

$$M_{maxx} = 12\sigma_x h + 12\sigma_y \sin^2 \theta * b * l^2 \sin \theta \quad (31)$$

$$M_{maxy} = 12\sigma_y l^2 * b * \cos^2 \theta \quad (34)$$

Sostituendo queste nell'ultima equazione si ottiene:

$$\sigma_{crxofs} = 13 * \frac{1}{l} (1 + \sin^2 \theta) \sin \theta * t^2 \quad (41)$$

$$\sigma_{cryofs} = 13 * \frac{1}{l} \cos^2 \theta * t^2 \quad (42)$$

In caso di esagoni regolari:

$$\sigma_{crxofs} = \sigma_{cryofs} = 49 t^2 \quad (43)$$

Rottura a trazione

La rottura a trazione è diversa.

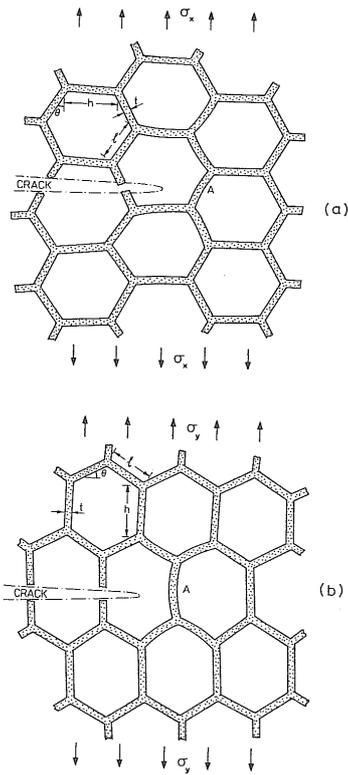


Fig.13: propagazione della rottura all'interno del materiale fragile. La sollecitazione concentrata all'apice della cricca causa l'incremento della sollecitazione:

- (a) deformazione per carico in y;
- (b) deformazione per carico in x.

Se, in un honeycomb fragile che viene caricato vicino alla tensione di rottura, una cella cede, allora lo sforzo nelle celle vicine incrementerà e finiranno per cedere a loro volta. Così la frattura si propaga attraverso il materiale.

Tale problema deve essere affrontato tramite la meccanica della frattura.

Approccio con la Meccanica della Frattura

Consideriamo un honeycomb fragile contenente una rottura. Quando viene caricato a trazione le celle si curvano. Il carico trasmette forze e momenti. Fino a che il comportamento dell'honeycomb è lineare elastico lo sviluppo di forze e momenti può essere calcolato dal continuo lineare-elastico.

Quando la risultante delle forze è sufficiente a rompere le pareti cellulari all'apice della frattura quest'ultima avanza. Tale condizione definisce il K_{Ic} la Resistenza alla Frattura

Tale metodo fa 3 assunzioni:

- I. l'honeycomb viene trattato come un continuo, la lunghezza della cricca deve essere maggiore della dimensione della cella;
- II. i contributi delle forze assiali nella determinazione della tensione all'apice della cricca-frattura sono trascurabili;
- III. i materiali delle pareti cellulari hanno modulo costante.

Una frattura di lunghezza $2c$ in un solido elastico produce una tensione locale σ_x

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\pi c} \quad (44)$$

Alla distanza r dall'apice della frattura.

Consideriamo una cella integra, di cui prendiamo $\frac{1}{2}$ larghezza $(h + l \sin \theta) / 2$. La forza su di essa vale:

$$P = \sigma_x \cdot h + l \sin \theta \cdot b \quad (45)$$

Sostituendola nella (43)

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{ch + l \sin \theta} \quad (46)$$

Tale forza esercita un momento M_1 proporzionale a P .

Quando $M_x > M_f = 1/6 \sigma_b b t^2$ (47) la parete cede e la frattura avanza.

Associando tali risultati si giunge ad ottenere la tensione di rottura-frattura per carichi in direzione X

$$\sigma_f \sigma_s = 16 h l + \sin \theta / 2 \sin \theta l c t l^2 \quad (48)$$

Caricando in direzione Y si arriva, mediante analoga procedura, ad ottenere:

$$\sigma_f \sigma_s = 13 \sqrt{2} \cos \theta / 2 l c t l^2 \quad (49)$$

Se la frattura ha lunghezza inferiore a $2c$ la tensione di trazione diviene uguale alla tensione di compressione eccetto che per una costante numerica. Se però la frattura ha lunghezza maggiore la tensione di rottura a trazione è inferiore alla tensione di rottura a compressione. Per esagoni regolari entrambe le tensioni di rottura (46) e (47) si possono approssimare con:

$$\sigma_f \sigma_s = 0.3 l c t l^2 \quad (50)$$

La rottura a trazione avviene quando viene raggiunta la resistenza a rottura degli honeycomb:

$$K1c = 0.3 \sigma_s \pi l t l^2 \quad (51)$$

Si ricava che la tenacità della frattura decresce rapidamente con l'aumentare della densità e meno rapidamente al decrescere della dimensione della cella.

8.3.3.5 Deformazione Visco-Elastica

Alla temperatura ambiente molti polimeri sono vicini alla loro temperatura di transizione vetrosa T_g . Se è così gli honeycomb composti da tali polimeri non hanno i moduli costanti, ma variano col tempo, cioè hanno un comportamento viscoso. A causa di tale comportamento le celle, se caricate, subiscono deformazioni anche se la sollecitazione è notevolmente inferiore a quella critica.

Il comportamento visco-elastico di un honeycomb per quanto riguarda la deformazione è simile al comportamento di un sistema parallelo molla-smorzatore.

Consideriamo una cella esagonale caricata in X.

la cella, come prima, se caricata tende a curvarsi. La curvatura però non è più costante, ma variabile in funzione del tempo. Carico di curvatura P:

$$P = 12 E_s y l l^3 \sin \theta \delta e l + 12 \eta s l l^3 \sin \theta \delta v \quad (50)$$

Dove la prima parte è la deformazione elastica, costante, mentre la seconda parte è la deformazione viscosa, dipendente dal tempo. γV è il coefficiente di deformazione viscosa.

L'equazione differenziale della deformazione viscosa viene ottenuta dopo una complicata analisi ed essa vale:

$$\square + E_s y \eta s \epsilon = 3 l^3 4 t^3 \{ \sigma E_s x + \sigma \eta s (E_s x + E_s y E_s x) \} \quad (51)$$

Dove:

- $E_s x$ = modulo el. long. in direzione X;
- $E_s y$ = modulo el. long. in direzione Y;
- ϵ = deformazione;
- $\dot{\epsilon}$ = velocità di deformazione;
- ηs = forza che causa la velocità di deformazione γV
-

- Nel caso in cui la sollecitazione sia temporalmente breve:

- $\epsilon = 3 l^3 4 t^3 \sigma E_s x \quad (52)$

- Dove $E_s x$ = modulo elasticità in direzione X del materiale

- Nel caso di caricamento veramente lento:

○ $\epsilon = 3 \frac{1}{4} t^3 \sigma E_s x^* (E_s x + E_y E_s x E_y)$ (53)

○ Dove $(E_s x + E_y E_s x E_y)$ = modulo di rilassamento del materiale.

- Nel caso di carico costante:

○ $\epsilon = 3 \frac{1}{4} t^3 \sigma E_s x^* E_s x + E_y E_s x E_y * (1 - \exp(-E_y \eta_s T))$ (54)

○ Dove T è il tempo.

○ $E_y \eta_s - 1$ è la costante del tempo. La costante del tempo è funzione del materiale e non della forma della cella.

○

○

○ **8.3.3.6 Creep ed Instabilità al Creep**

○ Al di sopra della temperatura T_g (temperatura di transizione vetrosa) i polimeri mostrano una lenta, permanente e viscosa deformazione, o creep.

○ Il creep crea problemi quando il solido viene caricato per lunghi periodi.

○ Calcoliamo la velocità di creep di un honeycomb bidimensionale caricato in direzione Y .

○ La velocità di creep del materiale descritto vale:

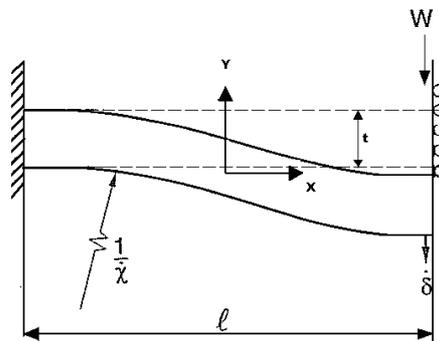
○ $\dot{\epsilon} = \epsilon_0 s^* \sigma \sigma_0 s n s$ (55)

○ In cui $\epsilon_0 s$, $\sigma_0 s$, $n s$ sono costanti del creep. $\epsilon_0 s$ è dipendente dalla temperatura.

○ Non verifico il creep in direzione X.

○ Considero il creep di una trave orizzontale caricata in punta incastrata ad un estremo.

○



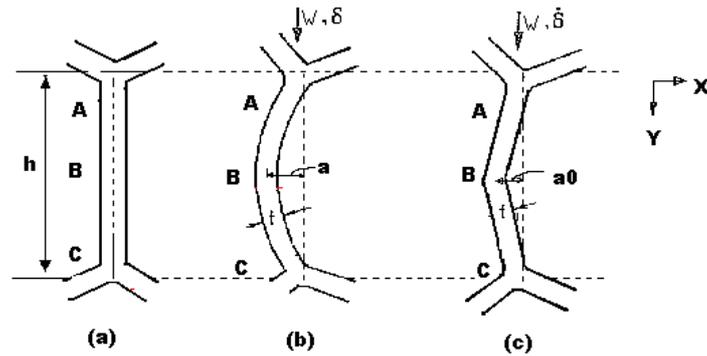
○ **Fig.14: coeff di flessione δ del creep della trave**

○

○

○

-
-
-
- Per calcolare il coeff. di flessione dobbiamo considerare le pareti cellulari come travi sottoposte a flessione e fare 3 assunzioni:
 - L'asse neutro è nel piano di simmetria;
 - Le sezioni rimangono piane;
 - Gli spostamenti a flessione sono piccoli.
 - Per l'equilibrio:
 - $M = 2b \int_{-t/2}^{t/2} \sigma(y) dy$ (56)
 - La compatibilità richiede che la velocità di deformazione ϵ_y di ogni punto della sezione sia correlata con la velocità di cambio curvatura k :
 - $\epsilon_y = y \cdot k$ (57)
 - Sostituendo:
 - $\sigma_y = \sigma_0 s^* y k$ (58)
 - Sostituendo nell'equazione (56) ed integrando ottengo l'equazione per tutti i problemi di scorrimento sulle travi:
 - $k = k_0 \frac{M}{I}$ (59)
 -
 - In cui:
 - $k_0 = 2^{2n+1} \epsilon_0 s^t$ (60)
 - $M_0 = 2n s^{2n+1} \sigma_0 s^* b^* t^2$ (61)
 - Il momento sulla trave vale: $M(x) = -W(x)$ x è posto a metà della trave come mostrato in figura.
 - $kx = d^2 \delta dx^2$ (62)
 - Sostituendo in (58) e integrando per gli estremi $x=0$ e $x=-l/2$ ricavo δ :
 - $\delta = 1(n+2)^{-1} \epsilon_0 s^* l^2 t^* ((2n+1)s)^{-1} W l \sigma_0 s^* b^* t^2)^{n+1}$ (63)
 - Facendo il limite a ∞ mi riconduco al cedimento plastico.
 - Bisogna passare dal macro al micro e guardare gli effetti del creep sulle pareti cellulari.



○

○ **Fig.15: instabilità al creep delle pareti cellulari.**

a) *Forma indeformata;*

b) c) *forma deformata;*

○ *dato che il creep non è lineare la forma sinusoidale (b) viene sostituita con una in cui la maggior parte della curvatura è al centro (c).*

○

○

○

○

○

○ Consideriamo le celle aventi altezza h , spessore delle pareti t e profondità b , con $t < b$ così che l'instabilità avviene nel piano delle figure.

○ Combinando la velocità di curvatura elastica con il creep si ottiene una **legge costitutiva della flessione** che include sia la rigidità che il creep:

○ $k = MEsI + k_0 \cdot M \cdot t$ (64) velocità di curvatura

○ Dove:

○ k = curvatura;

○ M = momento;

○ E = rigidità flessionale;

○ k_0 e M_0 sono relativi alle costanti ϵ_0 e σ_{0s} dell'equazione (45)

○ Ipotizziamo che la struttura abbia disallineamenti delle pareti cellulari che inducono curvature delle pareti stesse. Tali deformazioni possono essere rappresentate con a_0 .

○ Assumiamo $a_0 > t/2$.

○ Nell'instabilità elastica assumiamo che la deformata abbia forma di una semionda sinusoidale e che tale forma si conservi durante tutto il processo di instabilità.

○ La deformazione per creep non avviene in modo lineare ed il maggior sviluppo deformativo lo si ha a metà della trave, in B.

- Per poter determinare la distribuzione dei momenti bisogna assumere che le sezioni AB e BC restino rettilinee che ci sia rotazione relativa solo in B.
- Se la struttura supporta un carico costante F e x è la distanza dall'incastro della struttura, allora su tutta la lunghezza:
- $M=2Fxha$ (65)
- $M=2Fxha$ (66)
- La velocità di lavoro in un dato istante del processo :
- $W=20h/2Mkdx$ (67)
- Sviluppando e sostituendo:
- $W=F\delta=20h/2M^*k \quad dx=20h/2[M^*MEsl+M^*k0 \quad MM0ns]dx=20h/24F2xh2^*a^*aEsldx+20h2k0M02FxahM0ns+1dx$ (68)
- Integrando e dividendo per F si ottiene:
- $\delta=13^*FhEslla+1ns+2hak0(FaM0)ns$ (69)
- Come già detto la struttura si deforma essenzialmente come due elementi di trave dritta incernierati in B. Per tale configurazione vale la relazione:
- $\delta=4aah$ (70)
- Sostituendo sopra si ottiene:
- $4ah1-Fh212EsI=1ns+2hk0(FaM0)ns$ (71)
- In base a questa formula la velocità di spostamento a tende ad infinito quando:
- $F=12^*EsIh2$ (72)
- che corrisponde al carico per l'instabilità elastica della trave.
- Con il carico (72) si ricava :
- $a=h2k04ns+2FaM0ns(1-F/FE)$ (73)
- Integrando ciò tra i limiti $a=a_0$ e $t=0$ ed a ∞ al tempo in cui l'instabilità diventa disastrosa si ottiene il tempo per l'instabilità t_b :
- $t_b=4ns+2ns-1ha0ns-11-FFEhk0FhM0ns$ (74)
- In cui M_0 e $k0$ derivano dalle formule (60) e (61)
- Da tali formule, mediante passaggi al limite e numerose sostituzioni si arriva alla formula:
- $\sigma_{2el}^2-\sigma_{2el}^2/ns=[2^*ns+2ns-1ha0ns-11tb]ns^*2ns2ns+1^* \sigma_{0sn}^2*\pi^2Es^*th1-nsns$ (75)
- Tale formula parecchio complicata dice che per una data densità (t/h), temperatura (tenuta in considerazione con σ_{0s}) e durata del carico vi è una tensione critica σ_2 al di sotto della quale l'instabilità non ha luogo.
- Quando il tempo di carico è veramente breve si ha che:
- $1-\sigma^2(\sigma^*el)^2 \ll 1$ e che quindi $\sigma_2 \approx (\sigma^*el)^2$ (76)
- Cioè che la tensione critica è molto vicina alla tensione limite per l'instabilità elastica.

○ Quando la tensione è molto ridotta rispetto alla tensione per l'instabilità elastica e l'esponente è maggiore di 5, come lo è per molti metalli, la tensione per il creep $(\sigma_{cb}^*)_2$ si semplifica:

$$\sigma_{cb}^* = \sigma_0 \left(\frac{2 \cos \theta}{a_0} \right)^{1/2} \left(\frac{b_1 n}{h} \right)^{1/2} \quad (77)$$

○ Questa tensione definisce la tensione di soglia per l'instabilità al creep.

○ Invertendo si ricava:

$$t_b = \frac{2}{\epsilon_0} \left(\frac{a_0}{2 \cos \theta} \right)^2 \left(\frac{h}{b_1 n} \right)^2 \frac{1}{\sigma_0} \quad (78)$$

○ Ciò ci dice che il tempo per l'instabilità al creep è molto sensibile sia alla dimensione delle imperfezioni a_0 , sia alla tensione σ_0 .

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

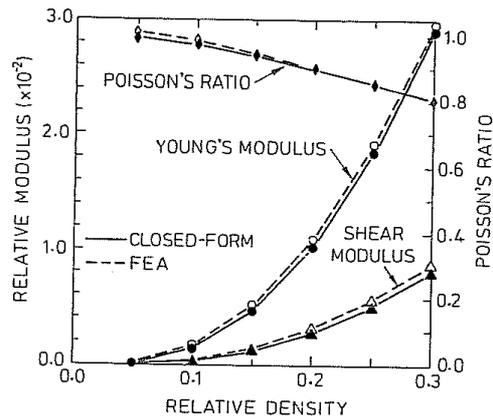
○

○

○ 8.3.3.7 Variazione della Struttura delle Celle

○ Finora si è discusso di honeycomb costituiti completamente da celle a forma di prisma esagonale identiche. Molte proprietà possono essere descritte facendo riferimento ad una singola cella. Tale approccio però non tiene conto delle naturali variazioni microstrutturali.

○ Vi sono molti metodi per tenere conto di questo. Il metodo più usato è il metodo di Suquet e Hollister che usa l'approccio degli elementi finiti nella caratterizzazione microstrutturale.



- Il risultato di tale approccio agli elementi finiti è che non vi sono apprezzabili variazioni dei moduli al seguito di variazioni significative della densità relativa ($0.05 < \rho^*/\rho_s < 0.30$). L'instabilità elastica ed il collasso plastico sono invece influenzati fortemente dalle variazioni microstrutturali, cosa che comporta di assumere resistenze all'instabilità elastica e al collasso plastico del 25% in meno rispetto a quelle ipotetiche, ovvero rispetto a quelle che offrirebbero strutture esagonali perfette o ideali.

○

- **Fig.16: moduli e rapporto di Poisson relativi alla variazione di densità relativa.**

- **Closed form: struttura normale;**

- **FEA : Finite Element Analyses, risultato dell'analisi agli elementi finiti.**

○

○

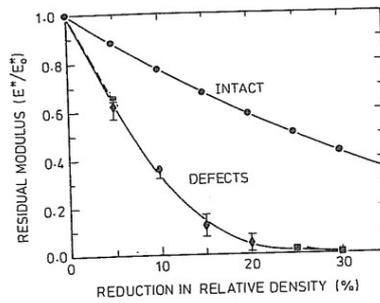
○

○

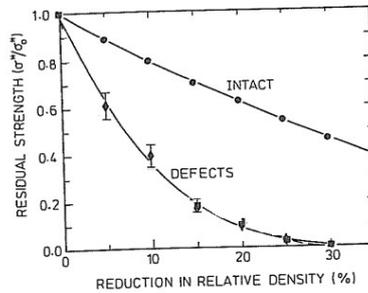
○

○ 8.3.3.8 Difetti negli Honeycomb

- C'è la possibilità che alcune celle degli honeycomb si rompano o si deformino durante lo svolgimento del proprio ruolo a causa di eventi di varia natura. La simulazione numerica stabilisce che la resistenza di un honeycomb è fortemente dipendente dai difetti delle celle: una perdita di solo il 5% delle pareti cellulari provoca una riduzione di più del 30% del modulo di resistenza. Tale analisi suggerisce che una perdita del 35% delle pareti cellulari ha come effetto la completa distruzione dell'honeycomb stesso.
- L'osservazione di honeycomb in alluminio con celle regolari ha indicato che la perdita di una singola cella causa l'innesco della frattura interna al materiale.



(a)



(b)

○

○ **Fig.17**

○

○

○

○

○

○

○

8.3.4 PROPRIETÀ NEL PIANO DEGLI HONEYCOMB: CARICO BIASSIALE

○ Quando l'honeycomb viene caricato in modo biassiale nel piano la reazione lineare-elastica della struttura viene rispettata.

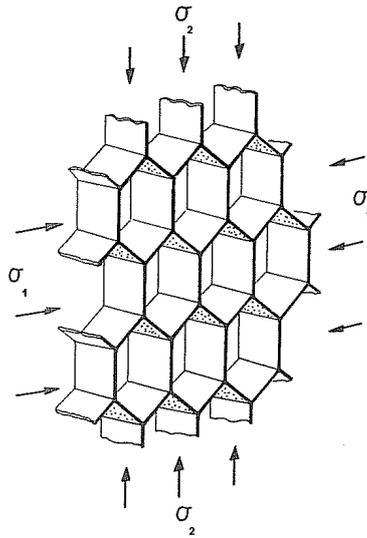
○ Cambiano però le modalità dei vari fenomeni che incorrono negli honeycomb rispetto al caso del carico monoassiale:

- L'instabilità elastica cambia fenomenologia e la tensione necessaria per il crearsi dell'instabilità in una direzione è influenzata dalla tensione applicata nell'altra direzione ortogonale (relazioni biassiali);
- Il collasso plastico aumenta notevolmente, nel caso di tensioni biassiali uguali la tensione risultante che andrà a influenzare ed eventualmente a far innescare il collasso plastico è 100 volte maggiore rispetto alla tensione risultante che si eserciterebbe in presenza di una sola sollecitazione monoassiale;
- La frattura fragile dipende fortemente dallo stato tensionale.

○

○ Dato che siamo in presenza di sole sollecitazioni normali siamo su di un sistema di riferimento principale in presenza quindi di sole tensioni principali. Possiamo quindi rapportare X con 1 e Y con 2.

○



○

○ **Fig.18:** carico biassiale su un honeycomb

○

○

○

○

○

○

○

○

○ **8.3.4.1 Risposta Lineare Elastica alle Sollecitazioni Biassiali**

○ Consideriamo il carico biassiale sul piano dell'honeycomb.

○ In caso di sollecitazione monoassiale la deformazione causata flessione è talmente grande che le deformazioni per stiramento o compressione possono essere ignorate.

○ In caso di sollecitazione biassiale è sempre possibile trovare una combinazione di σ_1 e σ_2 tale da annullare il momento flettente. Se ciò avviene logicamente la deformazione assiale per stiramento o compressione non può più essere trascurata dato che è l'unico contributo deformativo che rimane.

○ La risposta elastica vale:

○
$$\epsilon_1 = \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - \nu_{12} \sigma_2) \quad (79)$$

○
$$\epsilon_2 = \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - \nu_{21} \sigma_1) \quad (80)$$

○
$$\gamma_{12} = \tau_{12} G_{12} \quad (81)$$

○

○ In caso di tensione biassiale uguale il momento di curvatura delle pareti cellulari si annulla.

○ La deformazione elastica vale:

○ $\epsilon = \sigma E(1-\nu)$ (82)

○ $\epsilon = 3^* \sigma E t l$ (83)

○ La rigidezza di honeycomb isotropi sottoposti a stato tensionale biassiale dipende da t/l (invece che $(t/l)^3$ del caso monoassiale), essa riflette più che la rigidezza flessionale la rigidezza assiale delle pareti cellulari.

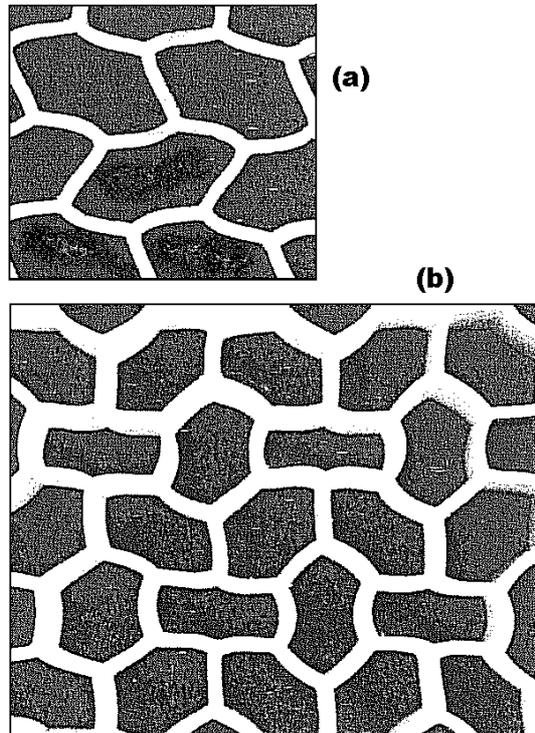
○

○ 8.3.4.2 Instabilità Elastica Sotto Carico Biassiale

○ Sotto carico biassiale le modalità di instabilità elastica dipendono dallo stato tensionale. Honeycomb regolari esagonali si deformano principalmente in due tipologie: la prima (tipologia (a)) è stata precedentemente studiata per carichi monoassiali. Essa viene messa in relazione con il fattore di *end constraint* n nell'equazione (20):

○ $P_{cr} = n 2 \pi^2 E s l h^2$

○ per la rigidezza rotazionale dei nodi. Tale fattore dipende dallo stato di tensione e dalla modalità di instabilità.



○

○ **Fig.19:** ingrandimento che mostra le modalità di instabilità di honeycomb elastici sottoposti a compressione biassiale.

○

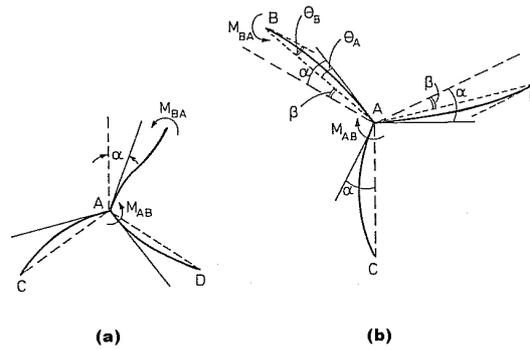
○

○

○

○

-
-
-
-
-
-



○ **Fig.20: modalità di instabilità elastica.**

-
-
-

○ Dall'analisi delle modalità di curvatura delle celle, dopo l'assunzione e lo sviluppo di svariati teoremi (Timoshenko e Young ,1965; Gibson ,1989) si ottengono due condizioni rispettate le quali le tensioni principali σ_1 e σ_2 annullano il momento flettente agente sulle pareti cellulari.

○ Per celle esagonali regolari:

○ tipologia a)

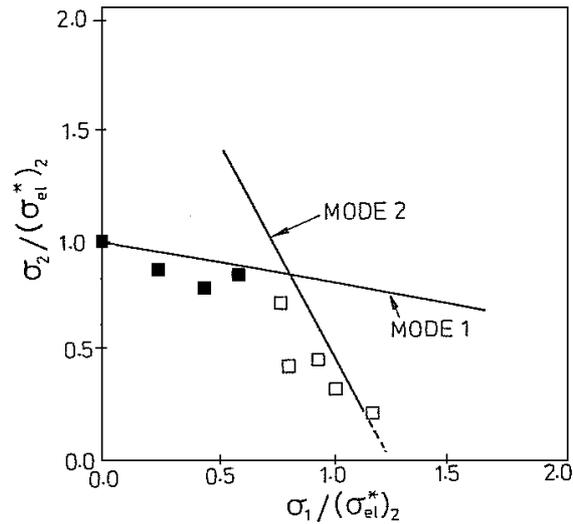
$$\tan 12t^* - 123 \log 2 \quad \text{Est}^* \tan 12t^* - 33 \log(3\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{Est} - 3\sigma_1 + \sigma_2 \sigma_2 = 0 \quad (84)$$

○ tipologia b)

$$3\sigma_1 + \sigma_2 \sigma_2 + \tan 12t^* - 123 \log 2 \quad \text{Est} \tan 12t^* - 123 \log 2 \quad \text{Est} = 0 \quad (85)$$

○ Tali due condizioni sono rappresentate nel grafico seguente:

-



- **Fig.21:** grafico di un honeycomb elastico di gomma con celle regolari sottoposto a carico biassiale. Le linee indicano il calcolo dell'instabilità della superficie corrispondenti ai modi a) e b) : simboli pieni modo a), simboli vuoti modo b).

○

○

- Una compressione monoassiale in direzione 1 non causa instabilità elastica, l'honeycomb rimane stabile. Come conseguenza si ha che la retta non intercetta l'asse 1, teoricamente la retta diviene una curva asintotica a 1. Ecco il perché che i dati si discostano dalla retta modo b) tendendo a formare una curva.

- La figura documenta come il modo dell'instabilità cambia, nel punto $\sigma_1 = \sigma_2$.

○

○

○

○

○

○

○

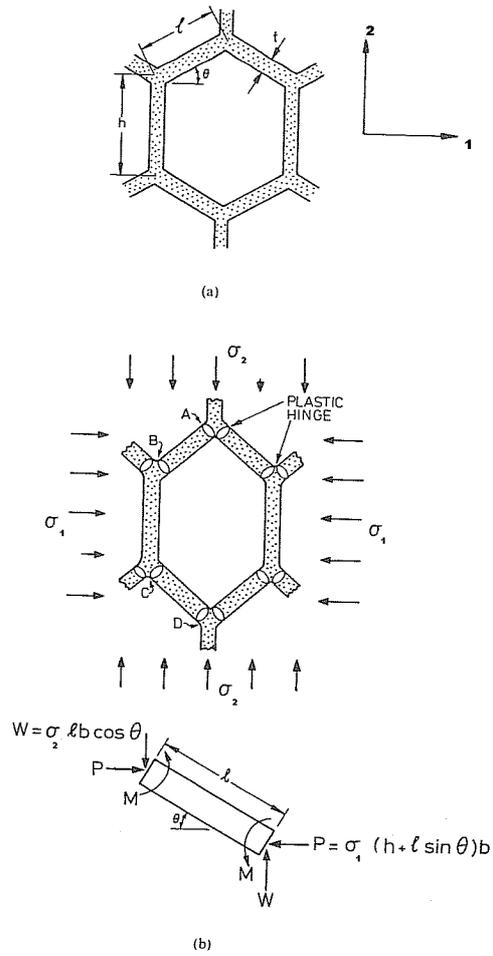
○

○

○

○ 8.3.4.3 Collasso Plastico e Superficie di Curvatura (Yield Surface)

- il carico biassiale ha il maggior effetto nel collasso plastico dell'honeycomb. Se le due tensioni principali sono opposte in segno il momento di curvatura delle pareti incrementa ed il collasso avviene più facilmente. Se invece sono dello stesso segno il momento causato da una tensione principale viene parzialmente o totalmente cancellato dall'altra tensione principale ed il collasso mediante la formazione di cerniere plastiche è più difficile, se non soppresso del tutto. In quel caso il collasso plastico richiede il cedimento assiale delle pareti cellulari ed il livello di tensione aumenta di 10-100 volte.



○

○ **Fig.22:** collasso plastico dell'honeycomb sottoposto a carico biassiale. Le forze ed i momenti sono mostrati in b)

○

○

○

○

○

○

○

○

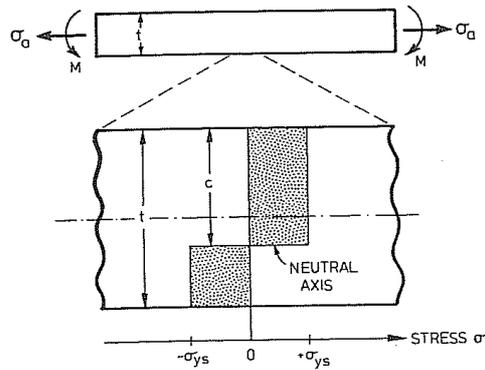
○

○

○

○

-
-
-
-
- La combinazione di σ_1 e σ_2 che causa il collasso è stata tracciata in un sistema di riferimento principale ed è rappresentata da una superficie chiusa chiamata superficie di curvatura.



- Di seguito viene brevemente riassunto il procedimento per ricavare tale forma.

○

○ **Fig.23**

- Momento netto sulle pareti:

$$\text{○ } M = \pm \sigma_1 h + |\sin \theta| b |\sin \theta - \sigma_2| 2bc \cos 2\theta \quad (86)$$

○

- Tensione assiale:

$$\text{○ } \sigma_a = \sigma_1 h + |\sin \theta| \cos \theta + \sigma_2 |\sin \theta| \cos \theta \quad (87)$$

- La tensione assiale causa lo spostamento dell'asse neutro dal piano baricentrico. La distanza si ricava:

$$\text{○ } \sigma_1 y_s c_b - \sigma_2 y_s t - c_b = \sigma_a t b \quad (88)$$

$$\text{○ } c t = (\sigma_a + \sigma_2) / 2 \sigma_1 \quad (89)$$

- Il momento che causa plasticità totale vale:

$$\text{○ } M_p = \sigma_1 y_s b t^2 / 4 - \sigma_a \sigma_2 \quad (90)$$

- Si ha il collasso plastico quando il momento supera il momento per il collasso plastico. Si ottiene quindi l'equazione per la superficie:

$$\text{○ } \pm \sigma_1 h + |\sin \theta| \sin \theta - \sigma_2 \cos 2\theta \sigma_1 y_s t / 2 = 1/2 [\pm \sigma_1 h + |\sin \theta| \cos \theta + \sigma_2 |\sin \theta| \cos \theta \sigma_1 y_s t / 2] \quad (91)$$

- Per celle esagonali regolari si riduce a :

$$\text{○ } \pm \sigma_1 y_s - \sigma_2 y_s = 2/3 t [2/3 \sigma_1 y_s + \sigma_2 y_s] t / 2 \quad (92)$$

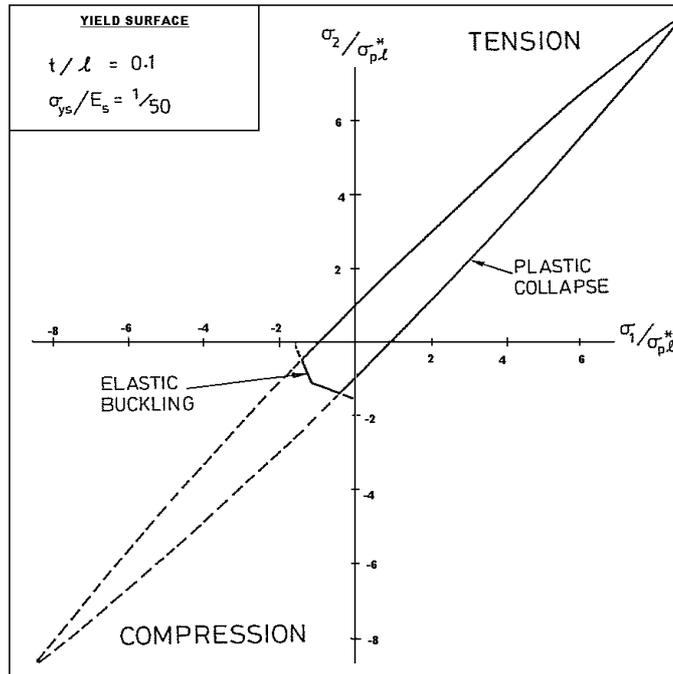
- Ponendo $\sigma_{pi}^* = 2/3 \sigma_{ys} (t/l)^2$ (93) si riscrive in

$\pm\sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_2 = 1 - 3\sigma_1\sigma_2 + 13\sigma_1\sigma_2 t^2$

(94)

dove $\sigma_{pl} = 23\sigma_{st} t^2$

○



○ Fig.24 grafico curva limite di rottura per honeycomb esagonale regolare avente $t/l=0.1$. Nel lato compressione il grafico è troncato dall'insorgere dell'instabilità elastica.

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

○ 8.3.4.3 Frattura Fragile e Frattura di Superficie

○ La frattura fragile avviene quando la tensione superficiale massima sulle pareti cellulari, ora soggette sia al carico assiale sia alla flessione, supera il modulo di rottura del materiale delle pareti cellulari σ_b .

○ Un momento M produce una massima tensione superficiale

○ $\sigma_{max} = Mbt^2$ (95)

○ In una parete di spessore t e profondità b.

○ La rottura avviene quando tale tensione, aggiunta alla tensione assiale, supera la tensione di rottura σ_{fs} .

○ Dalle equazioni (86) e (87) si ottiene l'equazione della rottura-frattura superficiale:

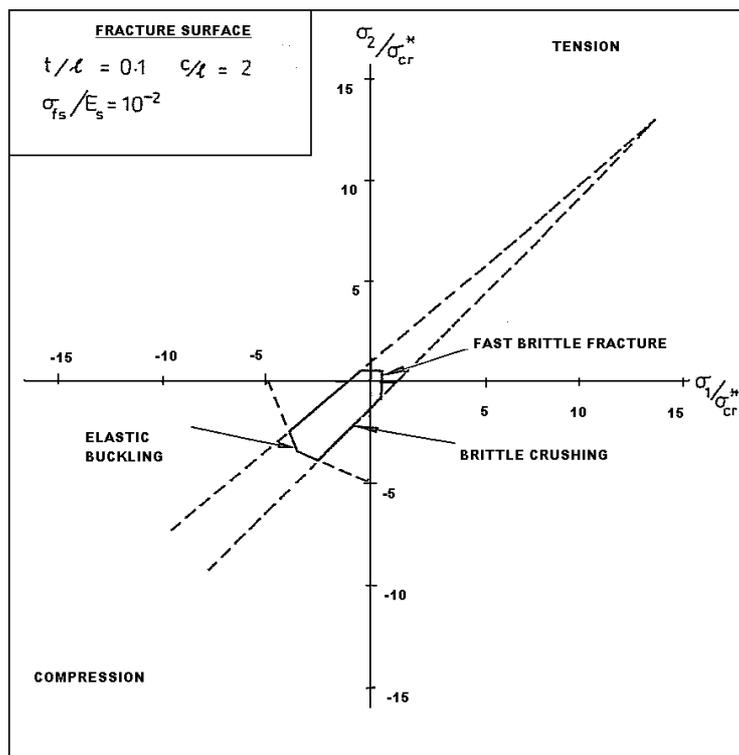
$$\pm \sigma_1 h / l + \sin \theta \sin \theta - \sigma_2 \cos 2\theta \sigma_{fs} t l^2 = 131 - \sigma_1 h / l + \sin \theta \cos \theta + \sigma_2 l \sin \theta \cos \theta \sigma_{fs} t l \quad (97)$$

○ Per honeycomb esagonale regolare:

$$\pm \sigma_1 \sigma_{ys} - \sigma_2 \sigma_{ys} = 49 t l^2 1 - 334 (t/l) \sigma_1 \sigma_{fs} + 13 \sigma_2 \sigma_{fs} \quad (98)$$

○ Come per il collasso plastico è conveniente assumere $\sigma_{cr}^* = 4/9 \sigma_{fs} (t/l)^2$

$$\pm \sigma_1 \sigma_{cr}^* - \sigma_2 \sigma_{cr}^* = 1 - 13 t l \sigma_1 \sigma_{cr}^* + 13 \sigma_2 \sigma_{cr}^* \quad (99)$$



○

○ **Fig. 25:** rottura fragile superficiale per honeycomb esagonale regolare avente $t/l=0.1$.

○ La superficie deve essere troncata nel lato compressione per l'instabilità elastica e nel lato trazione per la veloce rottura fragile.

○

○

○

○

○

○

○

-
-
-
-
-

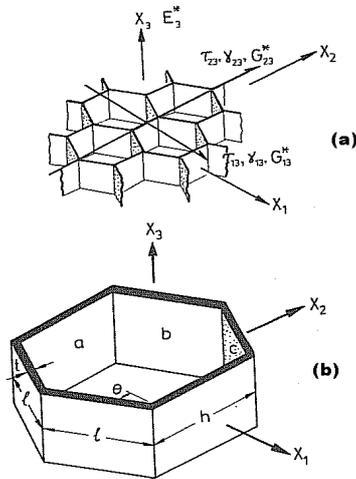
○ **8.3.5 PROPRIETÀ FUORI DAL PIANO**

○ **8.3.5.1 Deformazione Lineare Elastica**

- La funzione del core in honeycomb è quella di portare carico normale e di taglio nel piano contenente gli asse dei prismi esagonali- la direzione X_3 o Z.
- Quando viene caricato in questa direzione le pareti cellulari vengono tirate o compresse, ed il loro modulo è molto maggiore rispetto a quello calcolato precedentemente nel caso di sollecitazioni nel piano. La resistenza al collasso plastico aumenta notevolmente. Tale aumento delle caratteristiche meccaniche è conseguenza del fatto che nel caso assiale se le pareti cellulari si piegano le deformazioni sono coinvolte.
- Durante tale spiegazioni viene considerato honeycomb di bassa densità ($t \ll l$), avente lo spessore di parete cellulare t uniforme. L'estensione alle pareti cellulari è lineare.
- Per una completa descrizione dell'honeycomb sono necessari 9 moduli, di cui 5 aggiuntivi e 4 già presentati precedentemente. Di seguito vengono presentati i 5 moduli aggiuntivi:

1) Modulo di young E_3^* , per carichi normali paralleli a X_3

-



-

○ **Fig.26:** a) honeycomb caricato parallelamente a X_3 ; b) Parete cellulare

-

○ Il modulo E_3^* riflette il modulo del solido E_s scalato nell'area della sezione portante.

-

○ $E_3^* E_s = h l + 22 h l + \sin \theta \cos \theta l = \rho^* p_s \approx t l$ (100)

-

-
-
-
-
-
-
-
-

2) Rapporti di Poisson ν_{31}^* e ν_{32}^*

-

$\nu_{31}^* = E^*3/E^*1$ (101) $\nu_{31}^* = \nu_{32}^* = \nu_s$ (102)

-

3) Rapporti di Poisson ν_{13}^* e ν_{23}^*

-

$\nu_{13}^* = E^*1/E^*3 \cdot \nu_s \approx 0$ (103) $\nu_{23}^* = E^*2/E^*3 \cdot \nu_s \approx 0$ (104)

-

4) 5) Moduli di taglio

- Lo studio dei moduli di taglio è complicato, ogni superficie della cellula subisce una deformazione diversa data la presenza dei vincoli imposti dalle celle vicine. Il valore esatto dei moduli viene ricavato esclusivamente con metodi numerici, è però possibile trovare il range, ovvero i limiti inferiori e superiori tra i cui tali moduli devono posizionarsi.
- Il calcolo di tali limiti viene fatto calcolo dell'energia di deformazione associata, primo, con una distribuzione degli sforzi compatibile con la deformazione, secondo, con una distribuzione delle tensioni che soddisfi l'equilibrio.
- Se i due coincidono allora la soluzione è esatta.

-

-

-

-

- Mediante l'applicazione del teorema della minima energia potenziale di Sokolnikoff e Argon si arriva a ottenere, dopo diversi passaggi, i seguenti limiti:

-

- limiti superiori:

-

$G_{13}^* \leq G_s \cos\theta \sin\theta$ (105) $G_{23}^* \leq 12hl + 2\sin 2\theta (hl + \sin\theta) \cos\theta$ (106)

-

○ Limiti inferiori:

○

○ $G^*13Gs \geq \cos\theta hl + \sin\theta t l$ (107)

$G^*23Gs \geq 12hl + 2\sin 2\theta (hl + \sin\theta) \cos\theta t l$ (108)

○ Quindi le soluzioni trovate sono esatte ed i moduli valgono:

○ $G^*13Gs = \cos\theta hl + \sin\theta t l$ (109)

$G^*23Gs = 12hl + 2\sin 2\theta (hl + \sin\theta) \cos\theta t l$ (110)

○ Che per gli esagoni regolari si riducono a :

○

○ $G^*13Gs = 0.577 t l$ (111)

$G^*23Gs = 0.577 t l$ (112)

○

○ $G^*13Gs = G^*13Gs = 0.577 t l$

gli esagoni regolari sono isotropici nel piano $X_1 - X_2$

○

○

○

○ 8.3.5.2 Elasticità non Lineare, Instabilità Elastica

○ L'instabilità di una parete cellulare è vincolata ai due lati che si trovano paralleli alla direzione di carico è un problema standard.

○ Il carico di instabilità è determinato dal secondo momento di inerzia della parete e dalla larghezza (l o h), non dall'altezza del pannello. Per una parete di lunghezza l il carico di instabilità vale:

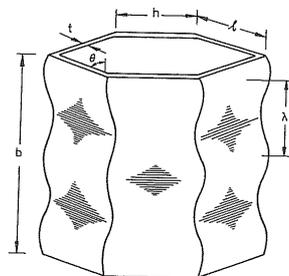
○ $P_{crit} = K E_s \frac{1 - \nu_s^2}{3} \frac{t^3}{l}$ (113)

○ K : costante di vincolo, analogamente al fattore n usato per le colonne. Se i bordi verticali sono semplicemente supportati (e quindi liberi di ruotare) e lo spessore b è largo ($b > 3l$) $K=2$; se invece essi sono bloccati $K=6.2$. La realtà sta nel mezzo: $K=4$.

○ Se il carico di instabilità elastica è la somma dei carichi caricati sulle singole celle si ottiene lo stress di cedimento elastico, che per honeycom esagonale regolare vale:

○ $(\sigma^* e l)^3 E_s = 5.2 t l^3$ (114)

○



○ Fig.27: instabilità assiale elastica di una cella esagonale.

○

-
-
-
-

○ 8.3.5.3 Collasso Plastico

○ Se nella sezione netta del piano la tensione normale a X_3 supera la tensione di snervamento σ_{ys} del materiale della parete cellulare le pareti cellulari cedono assialmente.

○ La tensione limite superiore di collasso plastico di un honeycomb vale:

$$\sigma_{pl} = \frac{h}{3} \sigma_{ys} = h(1 + 2.2 \cos \theta) h + \sin \theta t l = \rho^* \rho_s \quad (115)$$

○ Tale formula vale però solo in trazione, perché in compressione la deformazione plastica si verifica prima.

○ Gli studi di Wierzbicki hanno trovato che la tensione limite per il collasso plastico in compressione vale:

$$\sigma_{pl} = 5.6 \frac{h}{3} \sigma_{ys} \quad (116a)$$

○ Per gli esagoni regolari con spessore delle pareti uniforme:

$$\sigma_{pl} = 6.6 \frac{h}{3} \sigma_{ys} \quad (116b)$$

-

○ 8.3.5.4 Rottura Fragile

○ La resistenza a rottura fragile di un honeycomb è importante per conoscere sia il carico sostenibile sia il range di temperature al quale è possibile esporre l'honeycomb.

○ Il limite superiore di tensione di trazione vale:

$$\sigma_{fs} = \frac{h}{3} \sigma_{fs} = h(1 + 2.2 \cos \theta) h + \sin \theta t l = \rho^* \rho_s \quad (117)$$

○ Ciò nel caso di honeycomb privi di difetti. Se sono affetti da difetti il cedimento può avvenire prima.

○ La resistenza a rottura fragile in compressione è molto maggiore rispetto a quella in trazione poiché la compressione stessa chiude le piccole cricche createsi. Si è visto che la resistenza alla rottura fragile in compressione è 12 volte maggiore rispetto alla resistenza a trazione.

-
-
-
-
-
-
-
-
-

-

○

○ **8.3.6 Conclusioni:**

- Gli Honeycomb si deformano in svariati modi. Quando vengono caricati nel loro piano le pareti cellulari si piegano, in modo lineare elastico, fino a che l'allungamento non raggiunge il 10%.
- Gli honeycomb si comportano quindi come una molla: la geometria permette una grande deformazione del materiale con una piccola deformazione delle pareti cellulari.
- Quando vengono caricati fuori dal piano le pareti cellulari sono tese, compresse o sottoposte a taglio, e la struttura risulta molto più rigida.
- La teoria mi richiede 9 costanti elastiche per descrivere la meccanica dell'honeycomb ortotropo, in caso di honeycomb regolare esse si riducono a 5.
- Le complicazioni iniziano quando l'elasticità lineare viene meno. Se gli honeycomb sono di materiale elastomerico le pareti cellulari si piegano in compressione, dando luogo ad un grande plateau nel grafico sforzo-deformazione; in trazione al contrario tali pareti cellulari ruotano e si allungano e la curva nel grafico sforzo-deformazione sale ripida. Se invece gli honeycomb sono in materiale plastico le celle cedono per cedimento plastico in compressione ed in trazione se la sollecitazione è nel piano, per deformazione plastica se la compressione e la trazione è fuori dal piano. Tale fenomeno di deformazione plastica dà ugualmente luogo a un vasto plateau nel grafico suddetto, le deformazioni associate sono naturalmente permanenti.
- Se le pareti cellulari sono di materiale sensibile allo scorrimento gli honeycomb stessi sono sottoposto a creep, se invece il materiale è fragile gli honeycomb sono soggetti a schiacciamento ed a rottura fragile.
- In ogni caso a parità di deformazione la sollecitazione fuori dal piano è notevolmente maggiore rispetto alla sollecitazione nel piano, in altro modo, gli honeycomb sono più sensibili alle sollecitazioni nel piano che alle sollecitazioni fuori dal piano poiché nel caso delle sollecitazioni nel piano non riescono a far valere la loro rigidità-momento di inerzia.
- La risposta degli honeycomb ai carichi biassiali è anomala, questo perché il momento che tende a piegare le pareti cellulari può essere eliminato, o per meglio dire, compensato da una corretta combinazione delle tensioni nel piano. In tal modo gli honeycomb possono cedere solo per cedimento assiale, o creep, e per natura o rottura fragile, ed il materiale risulta molto più resistente.

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

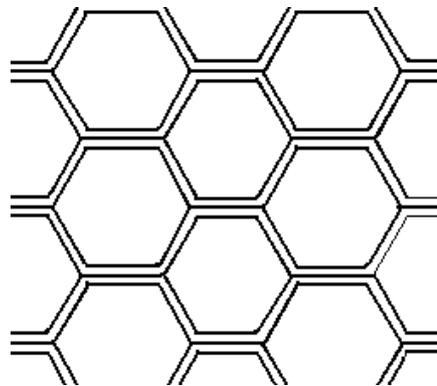
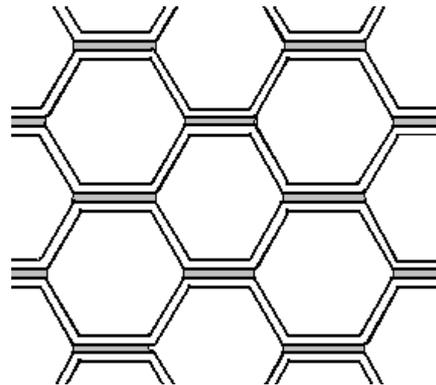
○

○

○ **9 PRODUZIONE DEGLI HONEYCOMB**

- Vi sono due metodi per la produzione del core in tipologia Honeycomb:
- - processo per espansione
- - processo "Corrugato".
- Semplificando i due processi si differenziano nel principio logico: nel metodo per espansione viene depositata una pellicola anti-adesione in aree predeterminate, in modo che in seguito alla termosaldatura dei fogli essi presentino aree di unione ed aree non saldate in cui viene effettuata l'espansione finale, invece nel metodo corrugato il principio logico è il contrario, ovvero si deposita un legante nelle aree di unione dei due fogli. Ciò ha però un'altra implicazione logica: il metodo per espansione è adatto ai materiali termoplastici o ai compositi di matrice termoplastica, dato che l'unione è per fusione dei fogli stessi, mentre il metodo corrugato è adatto sia per i materiali termoplastici che per i materiali termoindurenti.

○



○

- risultato metodo per espansione
- risultato metodo per corrugamento

○

- Dai disegni sopra si ricava una seconda conseguenza: l'honeycomb prodotto mediante espansione è più regolare dell'honeycomb prodotto mediante corrugamento, poiché le pareti di collegamento-unione tra i sottosistemi orizzontali del primo caso sono inferiori rispetto a quelle del secondo caso e quindi sono più aderenti alle ipotesi della meccanica dell'honeycomb espressa precedentemente.

○

- A seguire vi sono i metodi di fabbricazione preannunciati ricavati dai brevetti depositati a suo tempo. Sono stati tralasciati i particolari iniqui. Da osservare che il brevetto del metodo per espansione è stato presentato dalla Hexcel, tuttora tra le imprese leader nel settore degli honeycomb.

○

○

-
-
-
-
-
-

○ **9.1 METODO DI FABBRICAZIONE DEGLI HONEYCOMB TERMOPLASTICI PER ESPANSIONE**

○ Paese : United States of America

○ N°brevetto : **3,366,525**

○ Data presentazione : 30/1/1968

Data approvazione: 6/2/1968

○ Denominazione : metodo di costruzione degli honeycomb termoplastici

○ Inventore: Wendell T. Jackson per la **Hexcel Corporation**

○ *Primo esaminatore : Earl M. Bergert*

Assistente Esaminatore: H. F. Epstein

○

○ Estratto:

○ metodo per la fabbricazione degli honeycomb o strutture laminate similari da fogli plastici termosaldati che sono legati insieme sottoponendoli a calore e pressione in specifiche aree.

○ ***Di seguito vi è un breve riassunto dell'invenzione che, unitamente alla figura 1 , permette di spiegare in modo coinciso la tecnica del brevetto. Per avere maggiori informazioni circa il brevetto è possibile leggere la completa traduzione sottostante il riassunto.***

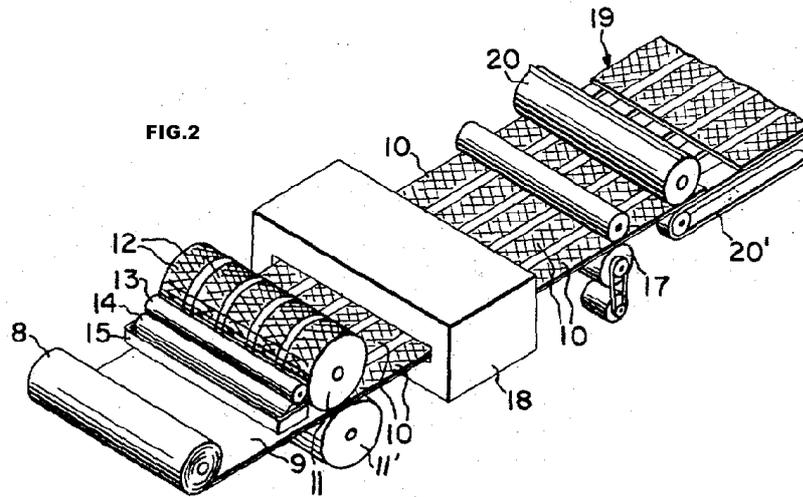
○ **Riassunto dell'invenzione:**

○ *L'invenzione permette la costruzione in modo efficace di honeycomb in materiale termoplastico.*

○ *La logica di tale invenzione non è quella di depositare del legante per i fogli, semmai l'opposto, cioè si fa in modo che i fogli stessi vadano ad unirsi gli uni con gli altri, e interponendo un film di materiale distaccante di geometria appropriata si riesce ad ottenere un materiale di tipo honeycomb senza l' apporto di legante esterno. L'unione dei fogli viene eseguita mediante la termosaldatura dei fogli stessi. Il film distaccante viene quindi rimosso. Una volta avvenuta la termosaldatura il blocco ottenuto viene fatto espandere mediante azione meccanica previo riscaldamento di rilassamento (a temperatura inferiore a quella di termosaldatura) in modo da assumere la geometria finale esagonale.*

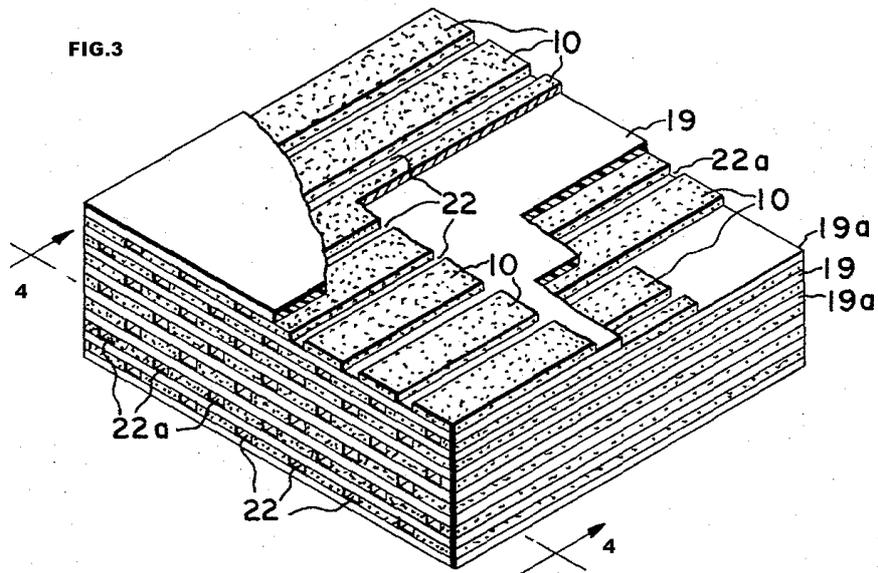
○ *Il film di rilascio che viene stampato sul materiale termoplastico può essere fornito con un colorante trasferibile a tutta la superficie non saldata dal calore. In tal modo si possono produrre honeycomb di colori differenti semplicemente variando il tipo di colorante nel film di rilascio.*

○ W.T.JACKSON



○ *vista schematica delle apparecchiature atte al procedimento di costruzione dell'honeycomb*

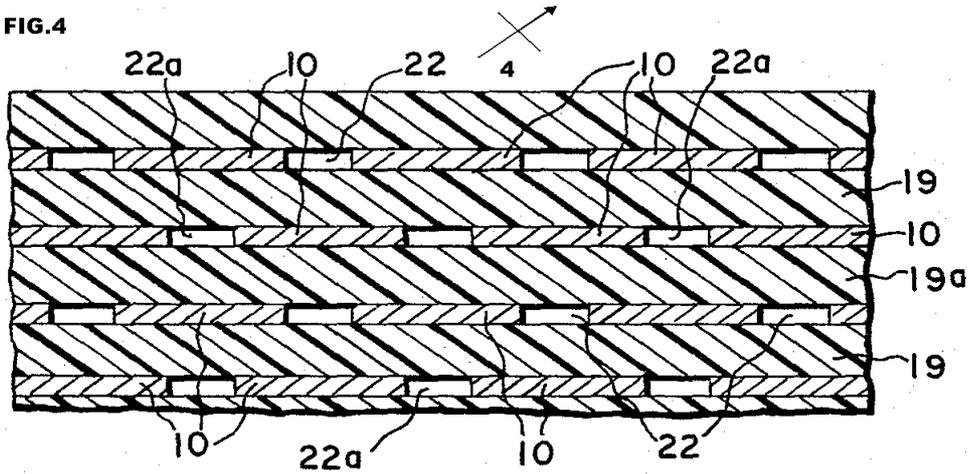
○
○
○
○
○
○
○



○ *vista prospettica di uno spaccato dei fogli impilati. Sono visibili gli strati-fogli di materiale termoplastico 19-19a ; le regioni-zone con il film distaccante 10 e le zone libere da film distaccante 22 ove avverrà la termosaldatura degli strati termoplastici*

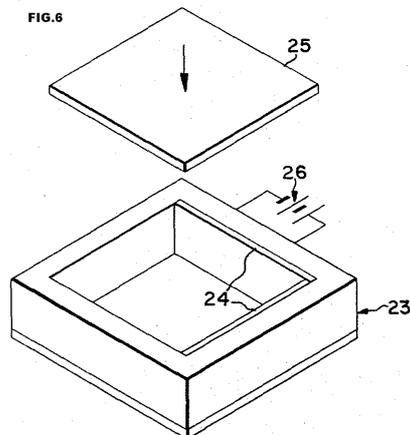
○
○

FIG.4



- sezione della porzione della struttura in figura 3. Sono visibili il film distaccante 10, le zone libere da film distaccante 22-22a e gli strati-fogli di materiale termoplastico da unire 19-19a

FIG.6

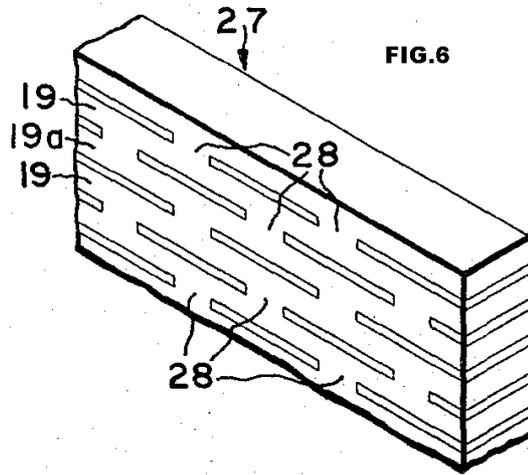


- stampo in cui avviene la parte termica del processo, ovvero riscaldamento, compressione e termosaldatura dei fogli, ove avviene inoltre la limitazione dell'espansione dei fogli. Sono visibili gli spessori 24 che vengono inseriti durante la prima fase del riscaldamento, in modo da limitare il movimento dei fogli, è che vengono tolti quando viene portata la pila alla temperatura di termosaldatura, in modo da permettere l'ulteriore espansione termica naturale.

○

○

○



○

○

○ *Vista della pila di materiale già termosaldato*

○

○

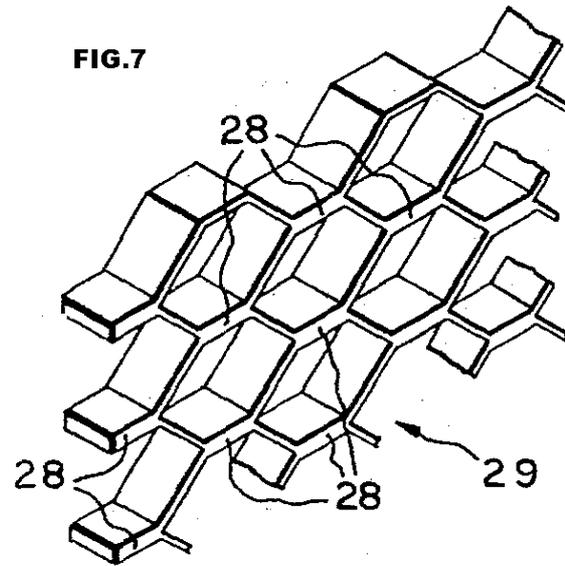
○

○

○

○

○



○

○

○

○ Risultato finale del procedimento, fase successiva all'espansione meccanica della pila di materiale termosaldato

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ Riferiamoci ora alle FIG.1 e 2

○ La scelta del materiale base di cui è costituito il rullo e la modalità di composizione del materiale nella forma adatta dipendono in gran parte dalla destinazione finale del prodotto. Inoltre essi dipendono dai fattori che entrano in campo per l'unione del web stesso allo skin, o lamina.

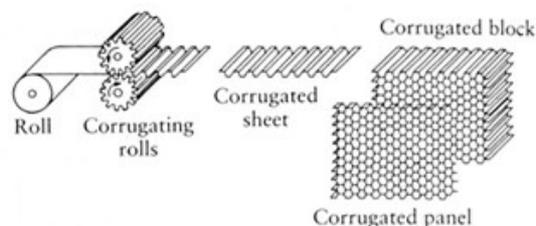
○ Su almeno un lato del web sono applicate molteplici linee di film distaccante equidistanziate, longitudinali, in modo da prevenire mutue adesioni non volute durante la fase di termosaldatura nei tratti di unione. Il film distaccante, di rilascio, è preferibile selezionarlo in modo tale che dopo il processo di formatura dell'honeycomb sia possibile staccarlo mediante aria o fluidi soffiati all'interno dell'honeycomb stesso. La tipologia di distaccante dipende dai materiali in uso per i fogli e dalle caratteristiche richieste per il prodotto finito. [...]

○ Le fasi del processo sono elencate di seguito.

- Le linee di film distaccante 10 possono essere applicate al web 9 mediante stampaggio, come visualizzato in FIG.2. più specificatamente i rulli 11 imprimono per pressione il film distaccante sul materiale web 9 svolto dal rullo 8. Il materiale distaccante viene fornito dal rullo 12 che viene movimentato mediante il rullo 13. [...] . Il film distaccante 8 viene applicato sul materiale web 9 mediante stampaggio tra i rulli 11. Il rullo motorizzato 17 trascina il foglio di materiale web. I solventi con cui è realizzato il materiale distaccante vengono scacciati in modo tale da lasciare uno strato di distaccante secco, mediante il riscaldamento elettrico o a gas all'interno del forno 18. Si taglia poi il nastro in fogli 19 di egual dimensione mediante una lama solidale al rullo 20.
- I fogli 19 sono poi portati mediante il nastro trasportatore 20 alla stazione di impilaggio dove essi vengono messi in pile 21 alternandole coi fogli 19 su cui le linee del film distaccante sono sfalsati alternativamente rispetto alle linee di film distaccante in modo tale che nella pila di fogli le linee di materiale distaccante localizzate sui lati opposti di ogni foglio di materiale web siano sfalsati rispetto ad ogni altro. (FIG.3-FIG.4). [...] .
- Mediante l'impilamento dei fogli 19 e 19a nella maniera sopra, si espongono le regioni 22 e 22 del materiale web sul lato superiore dei fogli web. Sono queste regioni contigue esposte adiacenti che stabiliscono le aree od i punti ove avverrà la termosaldatura.
- Il passo successivo consiste nell'applicare ai fogli una compressione iniziale per mantenere i fogli 19 e 19a piatti durante l'espansione iniziale dei fogli causata dal calore applicato ai fogli stessi. Più specificatamente, riferendosi alla FIG.5, la pila di fogli viene posta nello stampo di fusione. Tale stampo di fusione riscalda la pila ed applica ad essa pressione. Sempre lo stampo impedisce ai fogli di dilatarsi se non per la normale espansione termica successiva al riscaldamento.[...]
- Nel passo successivo la pila viene riscaldata fino alla temperatura di termosaldatura e durante l'esposizione a tale temperatura la pila si espande radialmente fin dove le è permesso dallo stampo. Poi la pressione applicata alla pila aumenta notevolmente in modo tale che le regioni libere dal film distaccante si saldino per termosaldatura. A seguire la temperatura viene ridotta mentre la pressione viene mantenuta in modo da evitare il corrugamento dei fogli. Infine la temperatura viene ridotta notevolmente, così come la pressione e la pila viene estratta dallo stampo.[...]
- Mediante tale sequenza di fasi di applicazione di calore e pressione alla pila, ai fogli è permesso di espandersi durante il processo di riscaldamento evitando il corrugamento e si compie la termosaldatura evitando l'insorgenza dello scorrimento dei fogli di materiale termoplastico. Se l'espansione oltre alla normale espansione termica non viene vincolata i fogli tendono a scorrere dando luogo ad imperfezioni ed irregolarità nella struttura.
- Nel passo successivo si tagliano i blocchi dello spessore desiderato in modo da produrre blocchi di honeycomb prima dell'espansione come mostrato in FIG.6 . [...]
- Nel passo successivo si espande il blocco ottenuto in modo da formare la forma aperta definitiva dell'honeycomb, come mostrato in FIG.7. questa fase di espansione può essere effettuata mediante vari modi di espansione , uno dei quali coinvolge una numerosità di poli che hanno direzione di movimento opposte in modo da applicare forze per espandere meccanicamente l'honeycomb.
- *Tale fase può coincidere con la fase finale di espansione dei fogli di honeycomb che si ha nella procedura di costruzione per corrugamento, come si può facilmente vedere col confronto.*
- Durante tale fase il blocco viene riscaldato ad una temperatura inferiore alla temperatura di termosaldatura in modo da ridurre il modulo di rigidità del materiale allo scopo di facilitare l'espansione. Quando le celle cominciano ad espandersi viene rimosso il film distaccante, poi le celle acquistano la forma definitiva.

○ 9.2 PROCESSO CORRUGATO

- Il processo corrugato nella produzione degli honeycomb permette di fabbricare prodotti aventi un ampio range di densità.



- disegno riassuntivo della procedura tipo Corrugato

○ **Riassunto dell'invenzione**

- *in modo molto semplificato si può riassumere il processo dicendo il materiale di cui si compone il core viene svolto dai rotoli, sottoposto a laminazione in modo tale da fargli assumere la geometria voluta, poi ritagliato in fogli e unito*

mediante un strato adesivo ad altri fogli precedentemente formati fino a formare dei blocchi di honeycomb da cui vengono tagliati i pannelli dello spessore voluto.

○

○ Per avere maggiori informazioni circa il brevetto è possibile leggere la completa traduzione sottostante.

○ **PROCEDIMENTO DEL PROCESSO AUTOMATICO DELLA FABBRICAZIONE DEGLI HONEYCOMB**

○ Paese : United States of America

○ N°brevetto : **3,887,418**

○ Data presentazione : 14/5/1975

Data approvazione: 3/6/1975

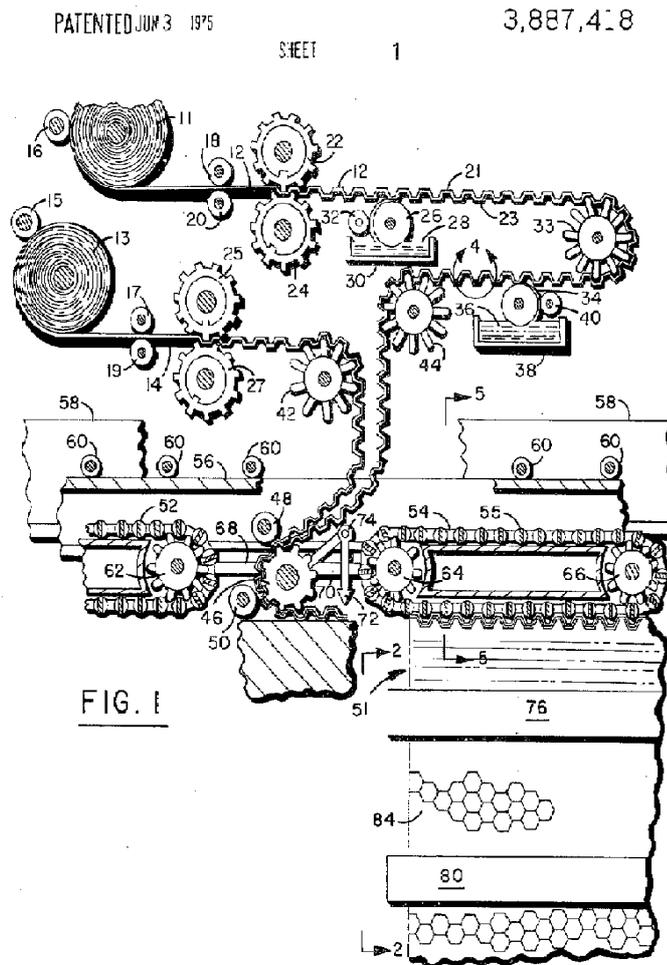
○ Denominazione : prodotto honeycomb e processo per la fabbricazione

○ Inventore: **Peter J. Jurisich**, 4731 Royce Road, Irvine, California, 92664

○ *Primo esaminatore : George F. Lesmes*

Assistente esaminatore : P. Thibodeau

○



○ Estratto

○ Processo per la produzione continua di honeycomb di bassa densità destinati in pannelli sandwich leggeri e altri laminati. Le leggere strutture di tipo web (ragnatela n.d.r), ad esempio fogli di alluminio o di tessuto, sono prima corrugate con la formazioni di aree di creste e di depressioni, a cui poi vengono applicato strati di adesivo, per esempio sulla superficie esterna della cresta e della depressione.

- Gli strati sono poi impilati uno sopra l'altro disponendoli alternativamente, uno strato a cui è stato applicato adesivo ed uno strato libero di adesivo.
- Calore e/o pressione vengono poi applicati alla pila per effettuare l'incollaggio del materiale accatastato.
- L'espansione dello strato effettuato mediante stiramento produce materiale honeycomb a bassa densità

○

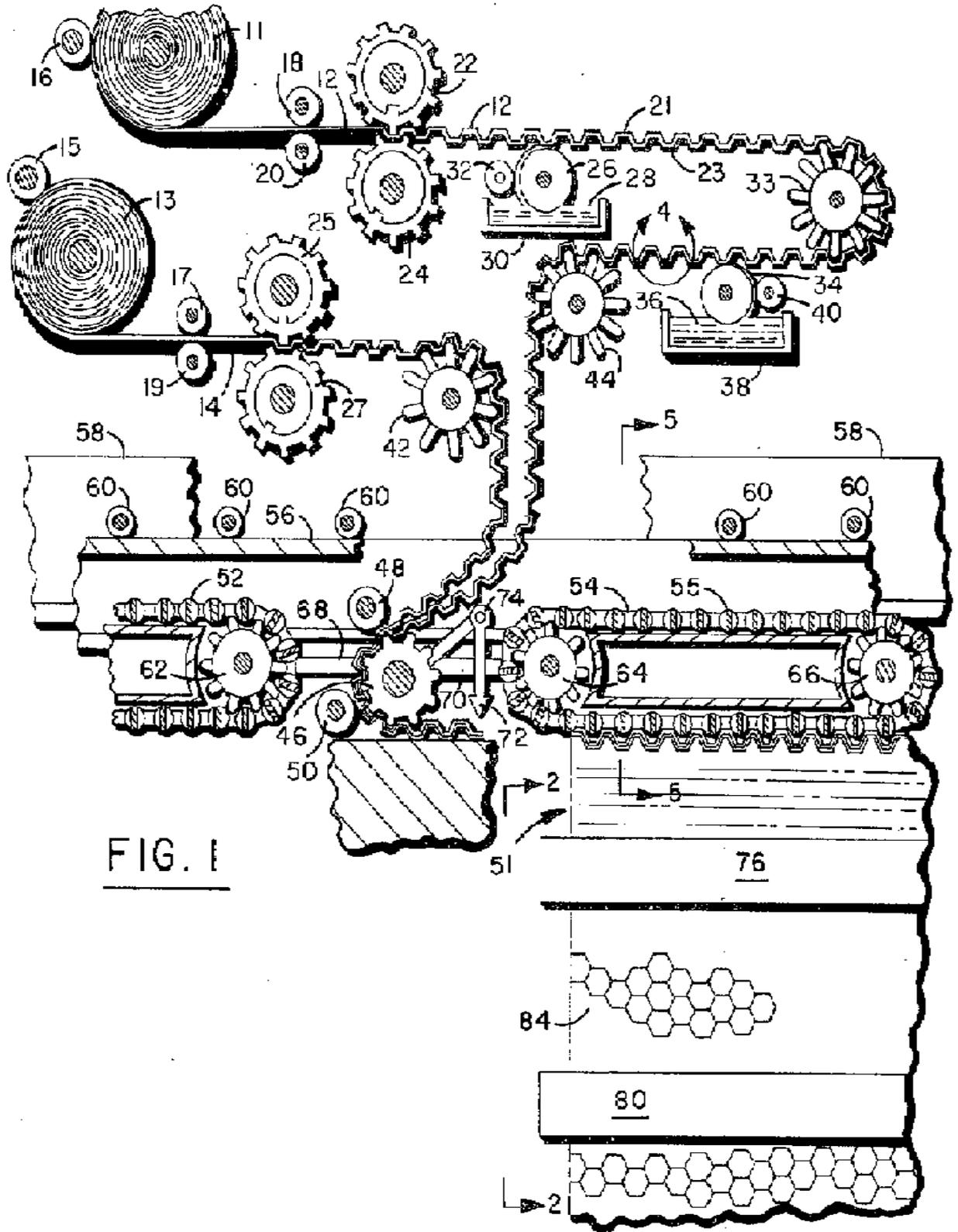


FIG. 1

○ Contesto Dell'invenzione

1. Campo dell'invenzione

○ Questa invenzione è relativa ai pannelli strutturali ed in particolare ad i pannelli leggeri di tipo sandwich usati diffusamente nelle costruzioni aeronautiche ed in altre applicazioni ove resistenza, leggerezza della struttura e precisione della forma sono richiesti.

2. Descrizione della Prior Art.

○ Tipicamente i pannelli sandwich sono composti al loro interno da spessori relativamente fini di honeycomb ed all'esterno da due superfici, o fogli, di alta densità aderenti al core interno.

○ Il core in struttura honeycomb è tipicamente composta da celle di forma esagonali composte mediante fogli, spesso di materiale fibroso, simili al tessuto, ed occasionalmente da fogli di alluminio.

○ Il seguente metodo è comunemente usato per la costruzione dei core in honeycomb. Secondo un metodo il web, o ragnatela (a volte per spiegare meglio intende la struttura honeycomb come una ragnatela. Ndr), è prima corrugata e poi viene messo uno strato di adesivo sulle creste create con il corrugamento, in seguito i fogli di web vengono impilati in modo tale che le creste si tocchino, così da formare una struttura cellulare. Mediante l'applicazione di una pressione limitata e di calore si ha l'incollaggio dell'adesivo e la formazione della struttura cellulare.

○ Gli svantaggi di tale metodo sono che tale procedura è applicabile solo a materiali molto rigidi aventi poco mercato attualmente.

○ Secondo un metodo alternativo sul materiale web viene prima depositato lo strato di adesivo in zone predeterminate, seguentemente impilati per essere sottoposti a calore e pressione per unire gli strati.

○ La configurazione finale dell'honeycomb viene prodotta mediante espansione.

○ L'espansione finale produce una contrazione da 4 a 3 pannelli dagli strati originari al web finale.

○ Tale contrazione rende difficile produrre forme complicate ed è difficile da automatizzare a causa dell'effetto della contrazione.

○

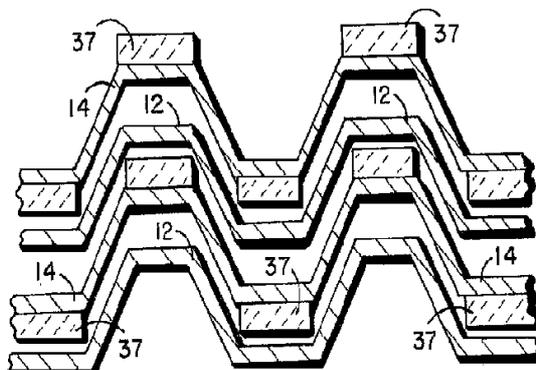
○ Riassunto Dell'invenzione

○

○ La corrente invenzione è adatta per la produzione continua automatica ad allo stesso tempo consente una alta precisione costruttiva del core.

○ Il processo permette l'applicazione di alte pressioni nell'area di incollaggio.

○ Secondo l'invenzione la lunghezza del materiale è prima corrugata in modo da formare aree di cresta e di depressione. Poi sulla sua superficie esterna estrema della cresta e sulla superficie esterna estrema della depressione viene deposto uno strato di adesivo. Tale web viene poi impilato su un altro web corrugato ma che non presenta adesivo, in modo da alternare strati con adesivo con strati senza adesivo. Il web viene impilato in modo che la cresta si posizioni sulla depressione dello strato precedente.

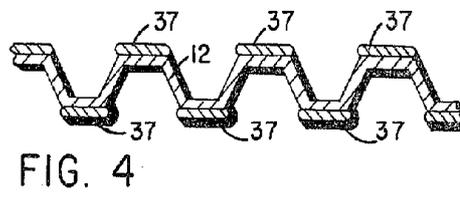


○

- *Disegno n° 11 del brevetto. Mostra la disposizione dello strato adesivo .*
-
-
-
-
-
- Calore e pressione sono poi esercitati per incollare gli strati
- Il blocco risultante è una forma compatta.
- Quando si desidera costruire/formare il core a honeycomb basta espanderel'honeycomb nella forma delle celle.
- Ci sono vari metodi per espandere l'honeycomb nella forma finita.
- Secondo un metodo gli strati incollati devono passare attraverso due catene-cinghie che si muovono a differente velocità. Come verrà spiegato più precisamente in seguito una delle coppie di catene-cinghie di movimentazione si muovono ad una velocità notevolmente superiore all'altra coppia di cinghie . Tale differenza di velocità fa sì che i due strati incollati vengano tirati per separarli e così le zone non incollate si separano, dando luogo alla forma finale.

○ **Descrizione Dettagliata Dell' Invenzione**

- L'invenzione può essere più chiaramente spiegata facendo uso delle descrizioni qui di seguito unitamente con i disegni.
- Riferendosi alla **Fig1** c'è mostrato un rotolo di alimentazione **11** che passa il web **12** sul rullo di alimentazione **16** ed i rulli di guida **18** e **20**. Dai rulli guida **18** e **20** il materiale web viene in seguito corrugato mediante il passaggio nell'ingranaggio cilindrico **22 - 24**.
- Una simile unità corruga il web **14**. Specificatamente il web viene svolto dal rotolo di alimentazione **13** mediante il rullo di alimentazione **15** e poi mediante i rulli guida **17** e **19** viene portato all' di ingranaggio cilindrici **25** e **27** che lo corruga.
- Come mostrato il rotolo corrugato avente le creste **21** e le depressioni **23** , passa sopra un rullo di incollaggio **26** il quale preleva adesivo dalla vasca **30**. La quantità di adesivo viene dosata dal rullo dosatore **32** . il rullo di incollaggio **26** applica l'adesivo solo sulle estreme superfici esterne delle depressioni **23** del web corrugato. La superficie incollata e corrugata passa poi sopra una ruota dentata a sperone, chiamata da ora in poi pignone, e dopo di essa sulla sua superficie estrema esterna della cresta **21** viene deposto dell'adesivo. Il metodo di dosaggio e applicazione dell'adesivo è quello appena spiegato. Specificatamente il rullo di incollaggio **34** preleva l'adesivo **36** dalla vasca **38**, la quantità dell'adesivo viene controllata dal rullo dosatore **40** e applicato sul web.
- A questo punto la superficie estrema esterna di ogni cresta **21** e depressione **23** ha uno strato di adesivo. Bisogna notare che con tale metodo solo le superfici di cresta e valle hanno adesivo, mentre le superfici intermedie sono pulite, prive dell'adesivo.



-
- Mentre sul web **12** viene deposto l'adesivo il web **14** viene corrugato mediante l'ingranaggio **25-27** e poi passa sopra il pignone **42**.
- Dopo il passaggio del web sul rullo di incollaggio **34** il web passa sopra il pignone **44**.
- I due web corrugati **12** e **14** passano insieme sul pignone **46** dove i rulli di guida **48** e **50** allineano i web corrugati **12** e **14** in modo tale che vadano ad incastrarsi, cresta con valle.

- I due web corrugati **12** e **14** passano poi alla fase successiva in cui le zone da unire, aventi adesivo, sono riscaldate e sottoposte a pressione.
- La pila **51** viene formata da sinistra a destra. Ciò è compiuto mediante rulli di alimentazione **50** e **48** che lavorano simultaneamente con le catene a rulli **54** e **52**.
- Le catene a rulli **52** e **54** ed il pignone **46** sono fissati ad un carrello mobile **56** che è sostenuto dal membro stazionario **58** mediante i rulli di sostegno **60**.
- I pignoni **61**, **62**, **64** e **66** sono vincolati al carrello mobile **56** e sostengono i pignoni delle catene a rulli **52** e **54** rispettivamente. La ruota dentata sperone **46** è vincolata al carrello mobile **56**, mediante il membro di supporto **68-70** sul cui è fissato il congegno per il taglio **72**.
- Il carrello mobile **56** supporta le catene a rulli **52** e **54** e le tiene in contatto con la pila **51** di web corrugati in modo da esercitare pressione sulla pila stessa, allo scopo di controllarla nei movimenti (che i fogli della pila non si muovano).
-

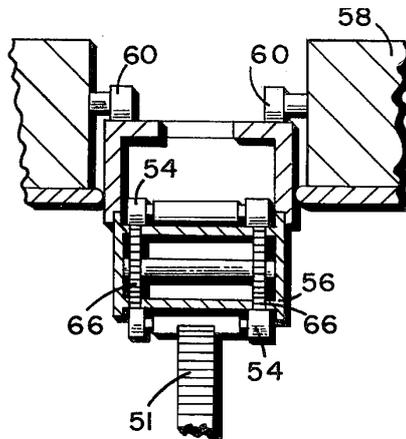


FIG. 5

- La fig.5 mostra una larga sezione del carrello mobile **56** con la catena di alimentazione **54** mentre sta comprimendo la pila **51**.
- I nastri di tessitura corrugata **12** e **14** sono applicati alla pila mediante il movimento del carrello mobile e della catena a rulli alla destra fino a quando il nastro web corrugato accoppiato **12** e **14** è allineato con le porzioni corrugate della pila all'estrema destra.
- A questo punto la catena-cinghia a rulli **54** si stacca completamente dalla pila **51** mentre la cinghia-catena a rulli **52** mantiene la pressione sulla pila***
- Il pignone **46** porta poi la tessitura corrugata **12** e **14** dalla destra alla sinistra come il carrello **56** muove il pignone **46** e le catene a rulli **52** e **54** verso sinistra .
- Durante questa corsa come il carrello **56** si muove verso sinistra la catena a rulli **54** esercita nuovamente pressione alla pila **51** mentre la catena a rulli **52** comincia a rotolare, uscire fuori all'estrema sinistra della pila.
- Alla fine di tale corsa la catena a rulli **52** è completamente a contatto con la pila **51** alla quale esercita pressione e il pignone **46** è completamente fuori dalla pila .
- A questo punti il congegno di taglio **72** unito al membro **74** taglia il foglio di tessitura corrugata precisamente quando il il materiale tessile raggiunge la fine della pila **51**.
- Il pignone **46** viene poi leggermente sollevato per evitare contatti con la pila **51** mentre il carrello mobile inizia la corsa di ritorno verso destra. Durante tale corsa di ritorno le catene a rulli **52** e **54** esercitano una pressione sulla pila tale da rendere possibile le unioni tra gli strati di tessuto corrugato.
- La corsa di ritorno con il pignone in posizione sollevata è possibile vederla in **fig.8**

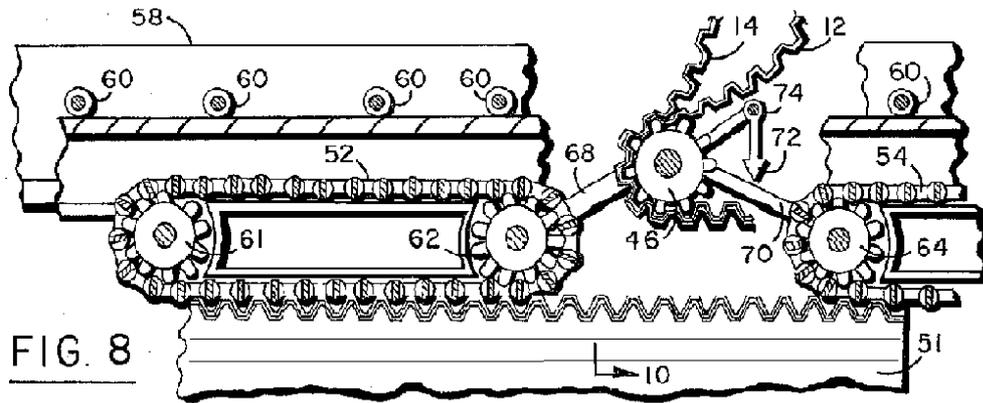


FIG. 8

-
- Notare che la catena a rulli stà comprimendo mentre il pignone è completamente separato dalla pila.
- Quando il carrello mobile raggiunge la fine della sa corsa di ritorno a destra il pignone viene nuovamente abbassato in posizione di inizio processo. Tale processo è stato appena descritto.
- In questa maniera si ottengono delle pile di tessuto corrugato unito in punti con passo prestabilito.
- L'espansione automatica della pila **51** nella forma finale della cella honeycomb viene effettuata mediante le cinghie **76-78** e **80-82**.
- Tali cinghie afferrano la superficie della pila mentre le catene a rulli **52** e **54** stanno esercitando pressione. L'apparato **76-78** inoltre sottopone ad elevata temperatura la pila, in modo che l'azione congiunta di pressione e calore assicuri un perfetto incollaggio degli strati di tessuto. Le cinghie del blocco 80-82 opera a velocità molto maggiore rispetto alla velocità del blocco **76-78** in modo tale che la pila sia sottoposta a stiramento. In tale situazione le parti non incollate si portano quindi a distanza, creando così la forma esagonale.

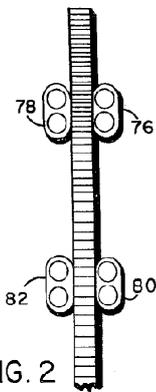
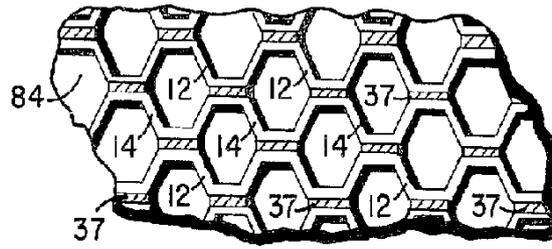


FIG. 2

blocchi di espansione 76-78 e 80-82

-
-
-



○
*ingrandimento honeycomb finito, formato mediante espansione
 del tessuto legato corrugato*

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ 10 MATERIALI E CONFRONTI

○ Di seguito vi sono sviluppati i principali materiali con cui gli honeycomb possono essere fabbricati:

- A) Alluminio;
- B) Fibre di vetro;
- C) Carte aramidiche

○ Per le prime due classi è stato fatta una rappresentazione parziale, mentre per la classe delle carte aramidiche è stato fatto un approfondimento completo, per l'importanza che tali materiali hanno nella tecnologia moderna e per le caratteristiche particolari che essi attribuiscono al pannello stesso.

○

○ **10.1 HONEYCOMB IN ALLUMINIO**

○ È forse il più diffuso nelle più disparate situazioni. Grazie alle sue caratteristiche di durata, resistenza e non ultima facilità di produzione ha avuto un'applicazione tra le più ampie, dall'ambito prettamente civile a quello agonistico. Bisogna infatti affermare che l'honeycomb in alluminio ha la capacità di assorbire quantità notevoli di energia durante la sua deformazione, quindi negli anni passati veniva usato pure nelle macchine da competizione della massima serie, poiché unisce le caratteristiche prettamente funzionali con quelle di sicurezza.

○ Naturalmente gli honeycomb in alluminio vengono prodotti esclusivamente con la tecnica di corrugazione.

○ L'alluminio usato negli honeycomb è di 4 differenti leghe, aventi tutte un campo specifico:

- Lega 5052: applicazioni aeronautiche di carattere generale, disponibile in un'ampissima gamma di dimensioni/densità, celle di forma esagonale regolare od OX.
- Lega 5056: lega avente caratteristiche superiori di circa il 20% rispetto al 5052, sempre per applicazioni aeronautiche di carattere generale. Anch'essa è disponibile in un'ampia gamma di dimensioni/densità, celle di forma esagonale od OX.
- Lega 3104: lega ACG (aluminum commercial grade), ovvero lega economica per applicazioni industriali;
- Lega 3003: lega ACG per applicazioni industriali, usata per assorbitori di energia.

○ Solitamente, ovvero per i maggiori produttori i pannelli honeycomb in alluminio vengono designati in tal modo:

○ materiale – dimensione delle celle – lega – spessore nominale del foglio base – densità

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ **materiale base: Alluminio 5052**

○ **Tipologia celle: esagonale**

○ **Produttore: Hexcel composites**

○ **Tipologia prodotti: commerciale**

○ **Designa**

○

○

○ Sollecitazione di compressione

○

○ Sollecitazione di

○

○ Sollecitazione di

zione	de						taglio L	direzione		taglio W	direzione		
○ Dim celle[in] t.pareti [in]	○	○	R e si st e n z a m at er ia le s c o p er to	○	R e si st e n z a m at er ia le st a bi liz z at o	○	Mo Ty	○	R e si st e n z a	○	R e si st e n z a	○	mo
○ U.M	○ kg	○	M p a	○	M p a	○	Mp	○	M P a	○	M p a	○	Mp
○ 1/16 0,0007	○ 10	○	5 . 0 9 8	○	5 . 3 7 4	○	18	○	3 . 0 3 2	○	1. 8 6 0	○	27
○ 1/16 0,001	○ 14	○	8 . 6 1	○	8 . 2 6 8	○	28	○	4 . 5 4 7	○	2 . 7 5 6	○	36
○ 1/16 0,0015	○ 19	○	1 3 . 0 8 9	○	1 3 . 7 8 0	○	44	○	6 . 2 0 1	○	3 . 8 5 8	○	44
○ 1/8 0,0007	○ 49	○	1. 3 7 8	○	1. 4 8 1	○	51	○	1. 0 6 8	○	0 . 6 2 0	○	151
○ 1/8 0,001	○ 72	○	2 . 5 8 0	○	2 . 7 9 0	○	10	○	1. 9 6 4	○	1. 1 5 7	○	21
○ 1/8 0,0015	○ 97	○	4 . 4 7 8	○	4 . 6 8 5	○	16	○	3 . 1 3 5	○	1. 8 7 4	○	28
○ 5/32 0,0007	○ 41.	○	1. 0 3 3	○	1. 1 0 2	○	37	○	0 . 8 2 7	○	0 . 4 8 2	○	13
○ 5/32 0,001	○ 60	○	1. 9 6 4	○	2 . 0 6 7	○	75	○	1. 4 8 0	○	0 . 8 6 1	○	181
○ 5/32 0,0015	○ 84	○	3 . 3 7 6	○	3 . 6 8 6	○	13	○	2 . 5 4 0	○	1. 4 8 1	○	24
○ 3/16 0,0007	○ 32	○	0 . .	○	0 . .	○	23	○	0 . .	○	0 . .	○	98.

			6 1 9	6 8 9		5 5 1		3 7 1	
○ 3/16 0,001	○ 49	○ 1. 3 7 8	○ 1. 4 8 1	○ 51	○ 1. 0 6 8	○ 31	○ 0 . 6 2 0	○ 0 . 6 2 0	○ 151
○ 3/16 0,0015	○ 70	○ . 4 7 8	○ . 6 5 3	○ 10	○ 1. 9 2 9	○ 46	○ 1. 1 0 2	○ 20	
○ 1/4 0,0007	○ 26	○ . 4 1 3	○ . 4 8 2	○ 13	○ . 4 1 3	○ 14	○ . 2 2 0	○ 75.	
○ 1/4 0,001	○ 36	○ . 8 2 7	○ . 8 9 6	○ 31	○ . 6 8 9	○ 22	○ . 3 9 3	○ 111	
○ 1/4 0,0015	○ 54	○ 1. 6 5 4	○ 1. 7 2 2	○ 62	○ 1. 2 4 0	○ 34	○ 0 . 7 2 3	○ 16	
○ 3/8 0,0007	○ 16.	○ . 3 7	○ . 3 8	○ 68.	○ . 2 2 0	○ 82	○ . 3 7	○ 48.	
○ 3/8 0,001	○ 25	○ . 4 1 3	○ . 4 8 2	○ 13	○ . 4 1 3	○ 14	○ . 2 2 0	○ 75,	
○ 3/8 0,0015	○ 36	○ . 8 2 7	○ . 8 9 6	○ 31	○ . 6 8 9	○ 22	○ . 3 9 3	○ 111	

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

e
te
r
m
ic
a
○ [10
-
6/
°
C]

○ E- gl as s	○ 10	○ 2.54	○ 72.4	○ 3.40	○ 4.8	○ 5	○ 0.2
○ S- gl as s	○ 10	○ 2.49	○ 86.9	○ 4.30	○ 5.0	○ 2.9	○ 0.22
○ Ke vl ar 4 9	○ 11.9	○ 1.45	○ 131	○ 3.62	○ 2.8	○ -2 lon g. ○ -59 rad .	○ 0.35
○ Ke vl ar 1 4 9	○ 11.9	○ 1.47	○ 179	○ 3.45	○ 1.9	○ -6 lon g.	○ 0.35
○ Bor o	○ 140	○ 2.7	○ 393	○ 3.1	○ 0.79	○ 5	○ 0.2
○ All u m in a	○ 11	○ 3.9	○ 380	○ 3.1	○	○ 8	○

- ○ Per fare il confronto con fibre di altra natura:
○

○ Tipi di fibra	○ Densità ρ ○ [kg/m ³]	○ Modulo di Young E ○ [GPa]	○ Resisten za della fibra ○ [MPa]	○ Rapporto E/ ρ [Gpa*m ³ /kg]	○ Rappo rto ρ/σ ○ [kg/ (m ³ Mpa)]
○ Vetro	○ 2200	○ 72.4	○ 3400	○ 0.03291	○ 0.647
○ Kevlar 49	○ 1450	○ 131	○ 3620	○ 0.08345	○ 0.401
○ Nomex 430	○	○	○	○	○
○ Acciaio	○ 7860	○ 206	○ 420	○ 0.02621	○ 18.71
○ Boro	○ 2500	○ 400	○ 3400	○ 0.16000	○ 0.7353
○ Allumini o	○ 2750	○ 71	○ 620	○ 0.02582	○ 4.435
○ Titanio	○ 4540	○ 115	○ 1900	○ 0.02533	○ 2.3894

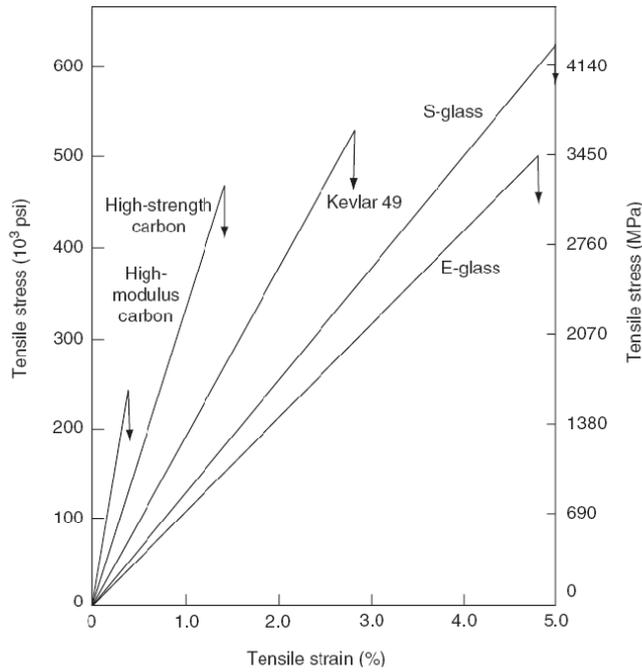
- ○
○ Per rapportarli tra di loro ho posto come valore di confronto il rapporto *Modulo di Young/Densità*
○

- Prendendo come **riferimento** il valore del rapporto sopraindicato per l'**acciaio** si trova che:
-
-

○ **Confronto tra le fibre**

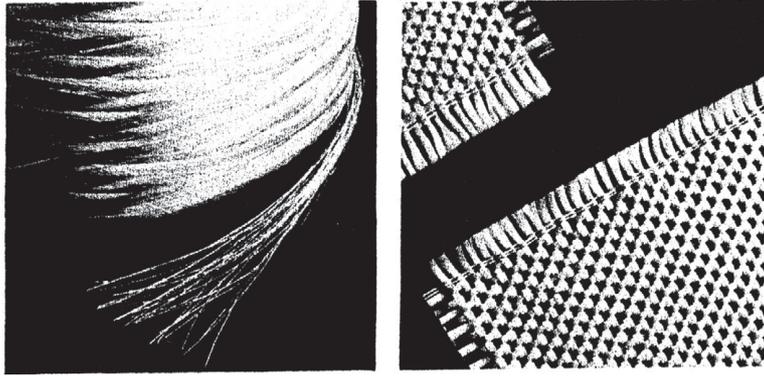
○ Materiale	○ Vet ro E	○ Ke vl ar 4 9	○ No m e x 4 3 0	○ Bor o	○ Allu m in io	○ Tita ni o
○ Differenza rispetto all'acciaio del rapporto E/ρ	○ + 9 . 2 7 %	○ +2 1 8 %	○	○ +5 1 0 %	○ - 1. 4 9 %	○ - 3 . 3 5 %
○ Differenza nel rapporto ρ/σ	○ - 2 7 9 1 %	○ - 4 5 6 5 %	○	○ - 2 4 4 4 %	○ +5. 3 4 4 %	○ - 6 8 3 %

-
-
-
-
-



-
- Diagramma tensione-deformazione per varie fibre di rinforzo.
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

- Eccellenti proprietà di insulating.
-
- I punti di debolezza di tali fibre sono:
- Modulo a trazione relativamente basso;
- Densità relativamente elevata;
- Sensibilità all'abrasione durante il loro maneggiamento (cosa che influenza fortemente la resistenza a trazione);
- Resistenza a fatica limitata;
- Durezza molto elevata (è un limite in fase costruttiva).
-
- Ci sono due tipi di fibre comunemente usate nei rinforzi di matrici polimeriche e sono le fibre di tipo E-glass e di tipo S-glass. Un altro tipo detto C-glass è usato in applicazioni chimiche ove è richiesta una alta resistenza alle aggressioni chimiche, superiore a quella offerta dall'E-glass.
- E-glass è la fibra di rinforzo meno costosa e questo è uno dei motivi per cui questa è la più diffusa. S-glass, originariamente sviluppato per componenti aeronautiche e missilistiche, ha la più alta resistenza a trazione tra le fibre in uso. La sua particolare composizione e le caratteristiche di cui è dotata la rendono più costosa dell'E-glass. Una sua versione economica è l'S-2-glass, che viene prodotto con specifiche meno stringenti delle specifiche militari dell'S-glass.
- Le fibre di vetro sono amorfe (non cristalline) e isotrope (eguali proprietà in tutte le dimensioni)
-
- Le fibre di vetro sono disponibili in varie nature:
- Strand: serie di filamenti paralleli in numero maggiore di 204 (17 dozzine);
- Roving: serie di strand paralleli non avvolti che vanno a comporre un rotolo di fibre;
- Chopper strand : le fibre continue vengono spezzettate in fibre di lunghezza limitata. Esse a loro volta si suddividono in due categorie a seconda della loro integrità:
 - Hard:se aventi integrità elevata;
 - Soft se di scarsa integrità;
- si suddividono ulteriormente a seconda della lunghezza:
 - Corte: (3.2-12.7mm = 0.125-0.5in), esse vengono usate nell injection-molding.
 - Lunghe: (50.8mm=2in o +), per rinforzi random biassiali.
 - Cortissime (0.79-3.2mm=0.031-0.125in), usate nell'industria plastica, non danno significativi miglioramenti.
- Tessuto:le fibre continue vengono tessute in due direzioni mutuamente ortogonali.
- Chopped strand Mat: particolare feltro composto da filamenti strand disposti in modo randomico. Si può considerare isotropo nel suo piano.
- Chopper strands:filamenti spezzettati.
-

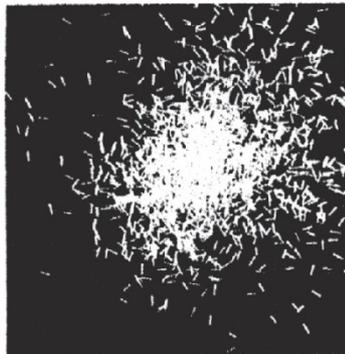


○ foto provenienti dalla Owens Corning Fiberglass Corporation

-
-
-
-
-
-
-

tessuto in fibre di vetro

Fibre continue in roving



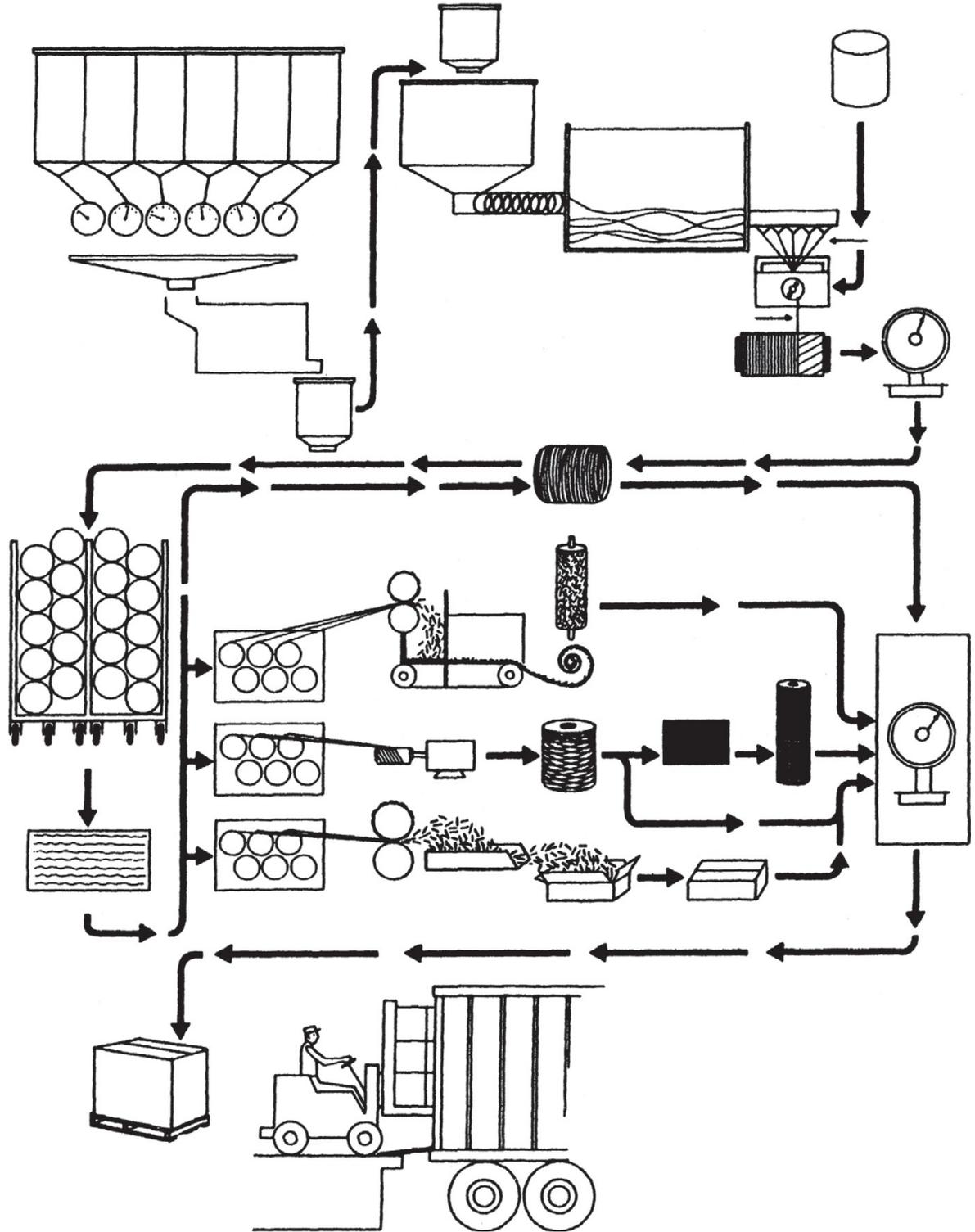
-

Chopper strands

chopper strand mat

-
-
-
-

○ Di seguito vi è una descrizione riassuntiva della procedura di produzione delle fibre di vetro.



-
-
-
-
-
-

○ *Disegno proveniente dalla PPG Industries*

-
-
-
-

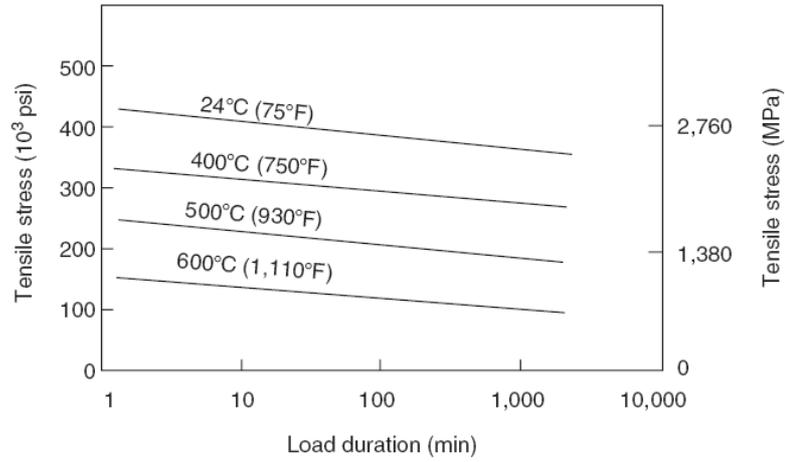
○ *Caratteristiche delle fibre di vetro*

○ Fibra	○ Diametro tipico ○ [μm]	○ Densità ○ [g/cm ³]	○ Modulo di trazione ○ [GPa]	○ Resistenza a trazione ○ [GPa]	○ Allungamento a rottura ○ [%]	○ Coefficiente di espansione termica ○ [10 ⁻⁶ /°C]	○ Rapporto di poisson
○ E-glass	○ 10	○ 2.54	○ 72.4	○ 3.40	○ 4.8	○ 5	○ 0.2
○ S-glass	○ 10	○ 2.49	○ 86.9	○ 4.30	○ 5.0	○ 2.9	○ 0.22
○ Composizione delle fibre in peso %							
○	○ SiO ₂	○ Al ₂ O ₃	○ CaO	○ MgO	○ B ₂ O ₃	○ Na ₂ O	○
○ E-glass	○ 54.5	○ 14.5	○ 17	○ 4.5	○ 8.5	○ 0.5	
○ S-glass	○ 64	○ 26	○	○ 10	○	○	

-

○ le caratteristiche teoriche delle fibre di vetro superano i 3.4 Gpa a trazione, ma la loro sensibilità alle scalfitture superficiali che avvengono durante la produzione abbassa tale valore ideale ad un valore pratico di 1.72-2.07 Gpa.

-



-
-
- Le fibre di vetro sono sensibili alla presenza di umidità nell'aria se messe in tensione (fatica statica).
- Se sottoposte a tensione il degrado della superficie della fibra accelera in presenza di umidità a causa della stress corrosion.
- Le fibre di vetro sono affette da creep, in modo uniforme, quasi indipendentemente dalla temperatura (la pendenza delle curve di creep è quasi la stessa a 24°C e a 660°C, le curve sono quasi parallele).
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

<input type="radio"/> materiale base:	<input type="radio"/> Tipologia celle:	<input type="radio"/> Produttore: Hexcel composites				<input type="radio"/> Tipologia prodotti:				
<input type="radio"/> fibra di vetro	<input type="radio"/> esagonale	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> commercial				
<input type="radio"/> E-glass	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
<input type="radio"/> Designazione	<input type="radio"/> de	<input type="radio"/> Sollecitazione di compressione			<input type="radio"/> Sollecitazione di taglio direzione L		<input type="radio"/> Sollecitazione di taglio direzione W			
<input type="radio"/> Dimelle[in]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> Mo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> mo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> mo
		esi	esi			esi			esi	
		st	st			st			st	
		e	e	Ty		e			e	
		n	n			n			n	
		z	z			z			z	
		a	a			a			a	
		m	m							

-
-
-
-
-
-
-
-

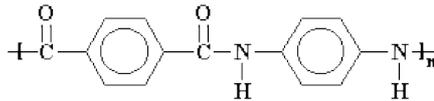
○

○ 10.2.3 Fibre Aramidiche

- Le fibre aramidiche sono una famiglia che include il nylon, il nomex® ed il kevlar®.

○ Analisi molecolare

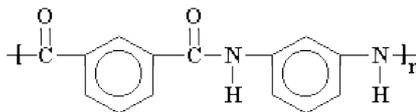
- Il Kevlar è un poliammide nel quale tutti i gruppi ammidici sono separati da gruppi parafenilenici ossia i gruppi ammidici si attaccano agli anelli fenilici opposti uno all'altro, negli atomi di carbonio 1 e 4. Il Kevlar è rappresentato nella figura sotto.



Nel Kevlar i gruppi aromatici sono collegati nella catena di base nelle posizioni 1 e 4. Questo viene detto legame para.

○

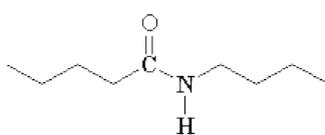
- Il Nomex, d'altro canto, ha gruppi metafenilenici, ossia i gruppi ammidici sono attaccati all'anello fenilico nelle posizioni 1 e 3.



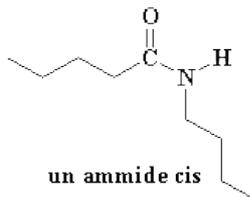
Nel Nomex i gruppi aromatici sono tutti collegati nella catena di base nelle posizioni 1 e 3. Questo viene detto legame meta.

○

- Le ammidi hanno la capacità di mostrare due forme diverse, o conformazioni. Potrete vederlo nella figura di una ammide a basso peso molecolare. Le due figure rappresentano lo stesso composto, in due diverse conformazioni. Quella sulla sinistra viene detta conformazione trans, quella sulla destra è la conformazione cis.



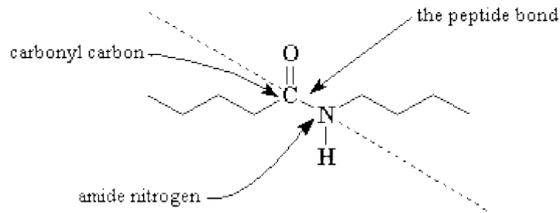
un ammide trans



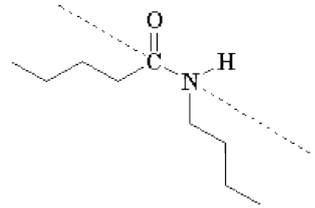
un ammide cis

○

- In Latino trans significa "sul lato opposto". Quindi quando i gruppi idrocarburi dell'ammide sono sui lati opposti del legame peptidico, il legame tra l'ossigeno carbonilico e l'azoto ammidico, si ha una amide trans. Allo stesso modo, cis in Latino significa "sullo stesso lato", e quando entrambi i gruppi idrocarburi sono sullo stesso lato del legame peptidico, si ha una amide cis.

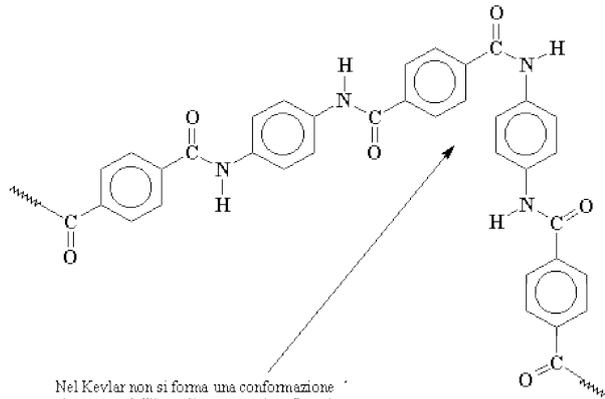


Nell'amide trans i gruppi idrocarburi sono sui lati opposti del legame peptidico



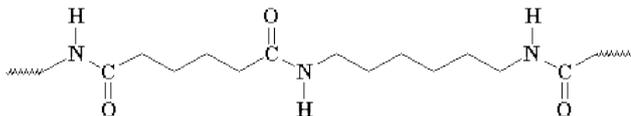
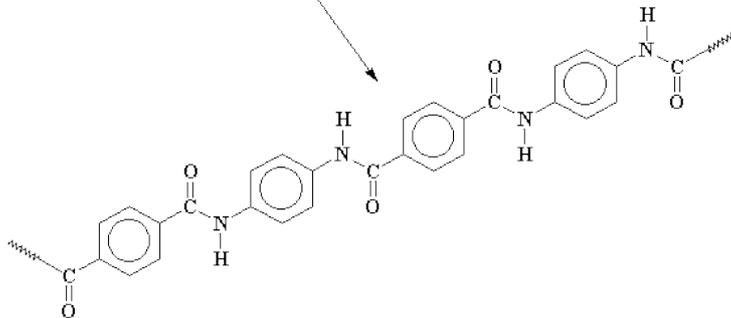
Nell'amide cis i gruppi idrocarburi sono sullo stesso lato del legame peptidico

-
-
- La stessa molecola amide può passare liberamente dalla conformazione cis a quella trans senza richiedere troppa energia.
- Le stesse conformazioni cis e trans esistono anche nelle poliammidi. Quando ci sono tutti i gruppi ammidici in un poliammide, come il nylon 6,6 ad esempio, il polimero si distende completamente su una linea retta. Questo è proprio quello che vogliamo per le fibre, poiché le catene lunghe, diritte, completamente distese si compattano meglio nella forma cristallina che crea le fibre. Purtroppo c'è sempre qualche legame ammidico nella conformazione cis. Quindi le catene del nylon 6,6 non si allungano mai completamente.

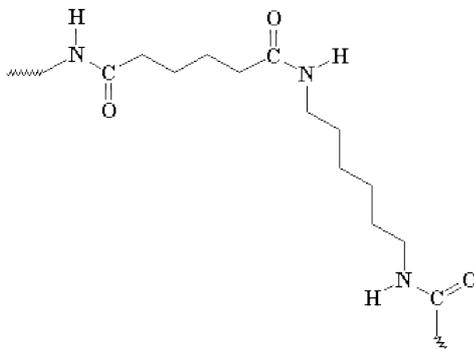


Nel Kevlar non si forma una conformazione cis a causa dell'impedimento sterico. Questi grandi anelli aromatici sono un impedimento.

Così rimane una poliammide praticamente solo trans, che si distende completamente per formare bellissime fibre.



Il Nylon 6,6 può essere facilmente trasformato in fibra quando tutti i gruppi ammidici sono nella conformazione trans



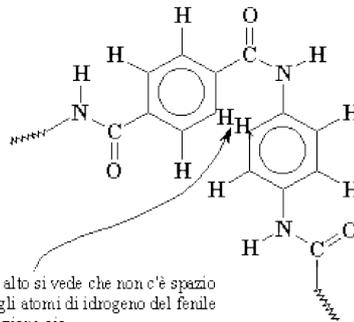
...Ma un legame cis provoca un attorcigliamento che scombina tutto!

○

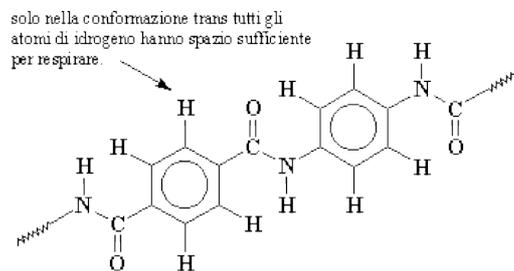
- Ma il Kevlar è differente. Quando prova a passare nella conformazione cis, gli idrogeni sui grandi gruppi aromatici fanno da impedimento. La conformazione cis presenta gli idrogeni un po' troppo vicini di quanto vorrebbero stare. Così il Kevlar resta completamente nella trans-conformazione.

○

- Può essere utile osservare una figura come questa. Osservate la figura riportata qui sotto e potrete notare che quando il Kevlar cerca di formare la conformazione cis non c'è spazio sufficiente per gli idrogeni del fenile. Quindi normalmente si trova solo la conformazione trans.



Nella figura in alto si vede che non c'è spazio sufficiente per gli atomi di idrogeno del fenile nella conformazione cis



solo nella conformazione trans tutti gli atomi di idrogeno hanno spazio sufficiente per respirare.

○

○

- È quindi possibile suddividere le fibre aramidiche in 3 categorie a seconda del legame che esse hanno nel gruppo aromatico, se para o meta:

○ para-aramidiche	○ Meta-aramidiche	○ Altro-tipo
○ Kevlar	○ Nomex	○ Sulfur
○ Techora	○ New-star	○ Nylon
○ Twaron	○	○ Textile
○	○	○ Ultra-high molecular weight polietilene

○

○

- **Le fibre aramidiche sono state realizzate dalla DuPont all'inizio degli anni 70 con lo scopo di sostituire i fili d'acciaio nei pneumatici radiali. Durante lo sviluppo evidentemente sono state trovate e sviluppate caratteristiche che superano quanto era stato messo come obiettivo. Le fibre aramidiche si suddividono in tre categorie: le fibre para-aramidiche, le fibre meta-aramidiche, le fibre di altro tipo.**

- **Di seguito sviluppo il Nomex® che è il materiale degli honeycomb oggetto della tesi.**

○

○

○

○

○

-
-
-
-

○ 11 ANALISI STRUTTURALE DEL NOMEX®

○ 11.1 Generalità

- Il Nomex® è stato sviluppato dal reparto ricerche della DuPont allo scopo di trovare una fibra avente le stesse proprietà fisiche del nylon ma che si conservino anche a temperature molto elevate. Tale ricerca ha avuto inizio negli anni 50 e la presentazione commerciale con il nome Nomex® nylon è avvenuta nel 1967. Dal 72 viene denominato semplicemente Nomex®.

○ 11.2 Tipologia di NOMEX

○

- Di seguito sono elencate le tipologie di Nomex® maggiormente commercializzate (non specifiche per gli honeycomb, in generale) ,descritte con la designazione europea, negli altri continenti la designazione può cambiare

○

■ Tipo 430

- È caratterizzato da grande cristallinità, dalla più alta resistenza meccanica e chimica. Esso viene utilizzato ove sono richieste proprietà elevate ed al contempo un aspetto gradevole . Esso viene prodotto per applicazioni tessili o per rinforzi nei tubi di gomma. I campi di applicazione sono i più vari: tute antifiama dei pompieri e dei piloti, sottocaschi, isolatori elettrici, tubi dei radiatori. Solitamente viene utilizzato nel suo colore naturale poiché è complicato produrre un filato di colore uniforme.

○

■ Tipo 450

- Ha buona cristallinità, anche se inferiore rispetto al tipo 430, e buone caratteristiche meccaniche e termiche.
- Esso viene usato in applicazioni ove sono richieste alte proprietà meccaniche in combinazione con stabilità termica e resistenza chimica adeguata come nei filtri di gas caldi, tessuti, ritardatori di fiamma. Esso viene prodotto e commercializzato nel suo colore naturale.

○

■ Tipo 455

- Il tipo 455 è una miscela brevettata di fibre di nomex e kevlar ed è stata prodotta per assicurare le più alte proprietà termiche possibili di protezione. Esso è però affetto da bassa cristallinità. Tra i suoi vantaggi rispetto al tipo 450 troviamo:

- Aumento della resistenza a rottura sotto carico ad alte temperature: la presenza del 5% di kevlar inibisce la contrazione, riducendo la possibilità di rottura e la successiva perdita della funzione di barriera termica;
- Maggior tingibilità;
- Aspetto dei tessuti più gradevole.

○

■ Tipo 462

- Deriva dal tipo 455 ed è stato sviluppato per minimizzare le scariche elettrostatiche che avvengono tra il corpo umano ed i tessuti, in modo da scongiurare il pericolo della presenza di campi elettrostatici nelle condizioni ambientali più criuche, ovvero in presenza di idrocarburi e altre sostanze altamente instabili e/o infiammabili.

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

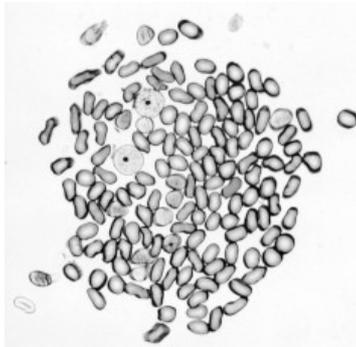
○

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

○ **11.3 PROPRIETÀ DEL NOMEX®**

-

○ La fibre di Nomex, membro della famiglia delle fibre aramidiche, presentano un eccellente resistenza al fuoco, buona stabilità dimensionale e resistenza chimica alla maggior parte dei prodotti chimici dell'industria ed infine caratteristiche di isolante termico ed elettrico. La sezione delle fibre, contrariamente a quanto si possa pensare, non è perfettamente circolare, ma presenta una sezione detta "a osso di cane", come visibile in figura.



-

○ **Fig.1**

-
-
-
-
-
-
-

○ Le proprietà descritte di seguito sono il risultato di test eseguiti secondo le normative indicate, ma sono anche presenti indicazioni provenienti da prove fatte internamente alle aziende produttrici.

○ **11.3.1 Proprietà Fisiche e Proprietà Termiche**

-

○ Il Nomex non mostra infragilimento o degradamento in condizioni criogeniche (-196°C). a temperatura ambiente le caratteristiche sono le stesse del nylon e del poliestere, e quindi presenta caratteristiche tali da essere facilmente tessuto e lavorato.

-

○ Di seguito sono presentate le caratteristiche chimico-fisiche di alcuni tipi Nomex. Essendo una fibra tessile vengono indicati anche i valori di tessitura delle fibre stesse.

-

○ **Tabella caratteristiche fisiche e termiche del NOMEX®**

-

	○ N	○ U n i t à	○ Tipo 430	○ Tipo 450	○ Tipo 462

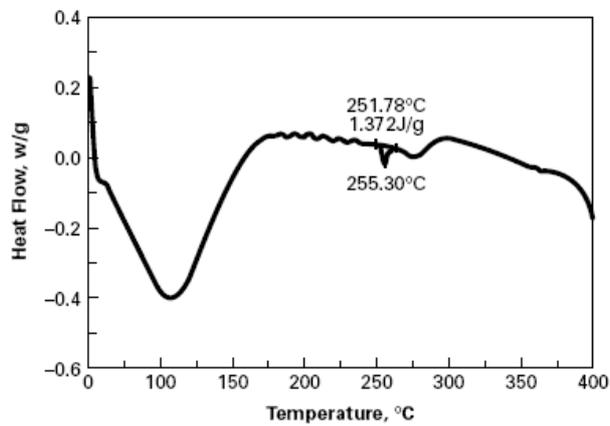
		d i m i s u r a			
<input type="radio"/> Prodotto testato	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 1200 denari <input type="radio"/> 2 dpf	<input type="radio"/> 1.5 dpf	<input type="radio"/> 1.5 dpf
<input type="radio"/> Densità	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> [gr / cm ³]	<input type="radio"/> 1.38	<input type="radio"/> 1.37	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Umidità % <input type="radio"/> Di fabbrica <input type="radio"/> Dichiarata	<input type="radio"/> <input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> <input type="radio"/> 4.0 <input type="radio"/> 4.5	<input type="radio"/> <input type="radio"/> 8.2 <input type="radio"/> 4.5	<input type="radio"/> <input type="radio"/> 8.3 <input type="radio"/> 4.5
<input type="radio"/> Proprietà a trazione					
<input type="radio"/> Tenacità <input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> [gr / den]	<input type="radio"/> 5.0	<input type="radio"/> 2.9	<input type="radio"/> 2.6
		<input type="radio"/> [M P a]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Allungamento a rottura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> %	<input type="radio"/> 31	<input type="radio"/> 22	<input type="radio"/> 21
<input type="radio"/> Modulo el. long.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> [gr / den]	<input type="radio"/> 94	<input type="radio"/> -	<input type="radio"/> -
<input type="radio"/> Proprietà termiche					
<input type="radio"/> Calore di combustione	<input type="radio"/> A	<input type="radio"/> BT U / L B	<input type="radio"/> 12100	<input type="radio"/> 12100	<input type="radio"/> 12100
		<input type="radio"/> Jo u l e / k g	<input type="radio"/> 2.8x10 ⁶	<input type="radio"/> 2.8x10 ⁶	<input type="radio"/> 2.8x10 ⁶
<input type="radio"/> Calore specifico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Ca l / g r o C	<input type="radio"/> 0.30	<input type="radio"/> 0.30	<input type="radio"/> 0.26
<input type="radio"/> Contrazione in acqua a 100°C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> %	<input type="radio"/> 1.3	<input type="radio"/> 4.0	<input type="radio"/> 0.5
<input type="radio"/> Contrazione in aria secca, 30 min, a 285°C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> %	<input type="radio"/> Max 4.0	<input type="radio"/> Max 4.0	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Conducibilità	<input type="radio"/> A	<input type="radio"/> W	<input type="radio"/> 0.25	<input type="radio"/> 0.25	<input type="radio"/> 0.25

termica		/ m ° K			
○ Coeff espansione lineare (26- 130°C)	○	○ 1/ ° C	○ 1.8	○ 1.8	○ 1.8

○

○ **11.3.2 Effetti del Calore Secco**

- Un'analisi termica ha mostrato che il Nomex tipo 455 perde il 10% in peso se esposto per un certo periodo di tempo a 400°C in aria o idrogeno. Si ha perdita di dimensioni maggiori se esso viene sottoposto a temperature superiori ai 426°C. L'ossidazione termica è dipendente dalla durata dell'esposizione ad alta temperatura. Test di fabbrica hanno accertato che l'ossidazione si verifica per esposizioni inferiori ai 30 s nel caso di esposizione a 350°C.
- Il Nomex non fonde. Un'analisi differenziale calorimetrica mostra la variazione del flusso di calore acquisito dal Nomex al variare della temperatura dei gas a cui è sottoposto.



○

○ **Fig.2**○ **Analisi differenziale calorimetrica del NOMEX® tipo 462 esposto in temperatura in idrogeno**

○

- Il flesso a 196° è la temperatura in cui le caratteristiche strutturali del Nomex cominciano a scadere.
- Nel caso di esposizioni molto brevi le temperature a cui può essere esposto sono molto maggiori.

○

○

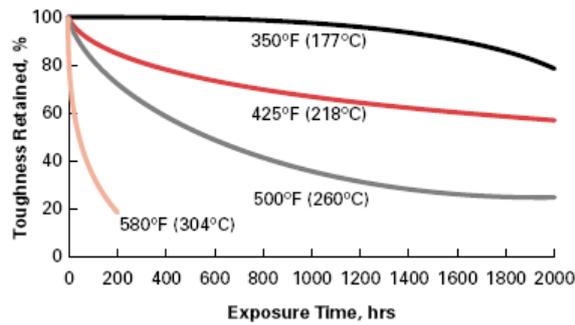
○

○

○

- Come si può vedere nel grafico 3 le caratteristiche strutturali decadono all'aumentare della temperatura. A 254°C, che è il punto di fusione del nylon, le caratteristiche fisiche del Nomex sono del 50% inferiori alle caratteristiche a temperatura ambiente.

○



○ Fig.5

○

○ Tenacità conservata dopo l'esposizione a temperature elevate del NOMEX® 430.

○

○

○

○

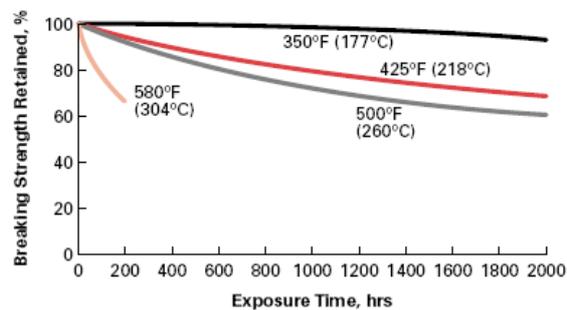
○

○

○

○

○



○

○ Fig.6

○

○ Resistenza alla rottura conservata dopo l'esposizione a temperature elevate del NOMEX® 430

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ 11.3.3 Effetti dell'umidità

○

○ La presenza di un contenuto di umidità limitato in aria o altri gas non ha effetti apprezzabili sulle proprietà del Nomex. Variazioni di umidità relativa dal 5 al 95% non hanno avuto conseguenze rilevabili sulle caratteristiche in esame.

○

○ A temperature elevate la presenza di umidità (concentrazioni prossime al 100%) nell'ambiente ha come conseguenza una perdita progressiva in resistenza. Test effettuati con NOMEX® 430 esposto per 1000h in un ambiente con contenuto di umidità del 100% ed ad una temperatura di

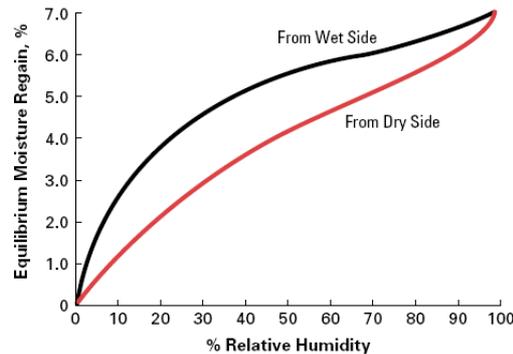
300°F–149°C hanno rilevato una perdita del 70% della resistenza. Per confronto il nylon soffre la stessa perdita dopo un'esposizione inferiore alle 100h.

-
-
-
-
-
-
-
-

○ 11.3.4 Assorbimento dell'umidità e Stabilità Dimensionale

- L'assorbimento dell'umidità è una tendenza che hanno molte fibre al fine di raggiungere un equilibrio tra l'umidità contenuta e l'umidità ambientale.
- L'umidità relativa dell'ambiente ha naturalmente un effetto sull'umidità assorbita e sul livello di equilibrio; maggiore è l'umidità relativa e maggiore sarà il livello di equilibrio che la fibra tenderà a raggiungere.

-
-



○ Fig.7

-

○ Effetto dell'umidità relativa sul contenuto di umidità acquistato dalla fibra NOMEX® 430.

-

○ Fonte: "Absorption and Desorption of Water by Some Common Fibers", John F. Fuzek, Eastman Kodak Company.

-
-
-
-
-
-
-

- Il contenuto di umidità è significativamente più grande delle fibre poliestere, leggermente più grande del nylon e minore del cotone.
- La stabilità longitudinale nel nomex è virtualmente indipendente dal contenuto di umidità relativa, però se questa è in combinazione con temperature elevate si ha un restringimento della fibra rilevante: ad esempio se viene immerso in acqua bollente la fibra si restringe dell'1.3%, se le immersioni in acqua bollente si ripetono per 100 volte per una durata di ogni esposizione di 5 minuti si ha una contrazione finale dell'3.8%.

-

○ 11.3.5 Infiammabilità, Fumo e Gas Generati

-

○ il Limiting Oxygen Index (LOI) del Nomex è 28, perciò quando la fibra viene esposta ad una fiamma a temperatura ambiente essa smette di bruciare alla rimozione della fiamma. A temperatura di circa 427°C il Nomex carbonizza.

-

○ La composizione e la quantità dei gas emessi durante la sua degradazione termica dipende dal calore a cui è esposto, dalla presenza di ossigeno e da altri fattori. La combustione del Nomex produce monossido di carbonio e diossina, entrambi gas altamente pericolosi se non letali. Se sottoposto a condizioni veramente critiche il Nomex degrada molto lentamente, rilasciando una varietà di composti organici quali acetone, butano, toluene, ecc... .

-

○ *LOI : l'indice di ossigeno è un test di ricerca ampiamente utilizzato per determinare l'infiammabilità relativa dei polimeri. Il LOI indica la concentrazione minima di ossigeno, in una miscela azoto-ossigeno, necessaria per richiamare verso il basso la fiamma che si sta sviluppando su un campione verticalmente montato. Maggiore è l'indice e maggiore è la resistenza alla combustione del polimero.*

○ *Il LOI viene eseguito in accordo con le normative ASTM D2863 ed ISO 4589-2.*

-

○ 11.3.6 Resistenza alla Degradazione per Abrasione

-

○ La resistenza all'abrasione è una caratteristica molto importante per i capi di vestiario di sicurezza e per le applicazioni di filtrazione. L'abrasione delle fibre ed il loro lavaggio sono tra le prime cause di cedimento delle fibre stesse.

	one %	a [°C]	esposizione [hr]	carico di rottura
<input type="radio"/> Acido				
<input type="radio"/> Cloridrico	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 71	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> Limitato
	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Apprezzabile
	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> 71	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> Apprezzabile
	<input type="radio"/> 37	<input type="radio"/> 71	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> Degradato
	<input type="radio"/> 37	<input type="radio"/> 71	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Degradato
<input type="radio"/> Nitrico	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Limitato
	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Moderato
	<input type="radio"/> 70	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Apprezzabile
<input type="radio"/> Solforico	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Trascurabile
	<input type="radio"/> 50	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> Trascurabile
	<input type="radio"/> 70	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Fosforico	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Limitato
	<input type="radio"/> 70	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Degradato
<input type="radio"/> Acetico	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Alcali forti				
<input type="radio"/> Idrossido di ammonio	<input type="radio"/> 28	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Idrossido di sodio	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Moderato
	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Trascurabile
	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Degradato
<input type="radio"/> Reagenti chimici organici				
<input type="radio"/> Acetone	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Benzene	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Alcol etilico	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Cherosene	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 1000	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Glicerina	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Nitrobenzene	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 21	<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Soluzioni saline				
<input type="radio"/> Solfato di rame	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 99	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Trascurabile
<input type="radio"/> Carbonato di sodio	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 121	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> Moderato

Tabella riferita al NOMEX tipo 430 1200 denari, 600 filati

<input type="radio"/> <i>Effetto</i>	<input type="radio"/> <i>Perdita di resistenza %</i>
<input type="radio"/> <i>Trascurabile</i>	<input type="radio"/> <i>0-10</i>
<input type="radio"/> <i>Limitato</i>	<input type="radio"/> <i>11-20</i>
<input type="radio"/> <i>Moderato</i>	<input type="radio"/> <i>21-40</i>
<input type="radio"/> <i>Apprezzabile</i>	<input type="radio"/> <i>41-80</i>
<input type="radio"/> <i>Degradato</i>	<input type="radio"/> <i>81-100</i>

-
-
-
-

○ 11.3.8 Resistenza all'aggressione del Vapore

-

○ La resistenza all'aggressione del vapore è un parametro importante in considerazione dell'applicazione in apparecchi per la filtrazione dei gas caldi. Gas acidi quali HCl, SO₂, NO_x possono ridurre sensibilmente la vita operativa del NOMEX.

-
-
-
-

○ 11.3.9 Resistenza all'esposizione ai raggi UV

-

○ Come molte fibre naturali l'esposizione prolungata ai raggi uv ha un'influenza sulla maggior parte dei tipi di Nomex.

○ Dopo un'esposizione prolungata il colore naturale del nomex tende a scolorirsi ed a prendere il colore del bronzo. Il cambiamento di colore non è necessariamente indice di una degradazione delle fibre. Comunque un'esposizione prolungata ai raggi UV può avere conseguenze sulle proprietà meccaniche della fibra la cui rilevanza dipende dal tempo di esposizione, dall'intensità dei raggi a cui è stata esposta la fibra, dalla lunghezza d'onda dei raggi impattanti e dalla geometria del prodotto.

○ Per degradare il polimero sono necessarie due condizioni:

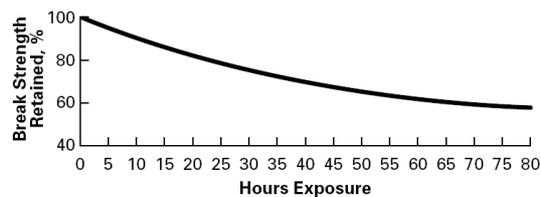
- La luce deve essere assorbita dal polimero, e non riflessa;

- L'energia ceduta dalla luce al polimero deve essere sufficiente a rompere i legami.

○ Un test eseguito con l'esposizione della fibra alla luce ad arco xeno in una camera meteo permette di accelerare la comparsa dei fenomeni degradativi rispetto alla esposizione naturale. In tali condizioni un NOMEX[®] tipo 430, 200 denari perde il 30% della sua resistenza dopo un'esposizione di 40 ore ed il 59% dopo un'esposizione di 80 ore.

○ In ogni caso l'esposizione ai raggi UV ha impatto sulle caratteristiche meccaniche, non sulla resistenza alla fiamma, che rimane inalterata anche dopo una lunga esposizione.

Specimens exposed per AATCC Standard Test Method 16E.



○ **Fig.9**

○ *Conservazione della resistenza a rottura di un NOMEX 200 denari esposto all'arco xeno in una camera meteo.*

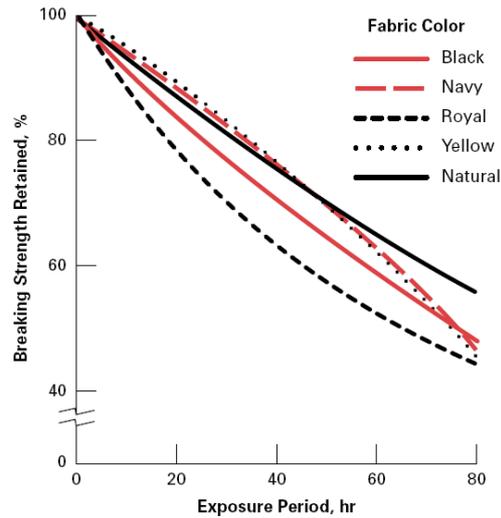
○ *Metodo AATCC standard Test Method 16E*

○ AATCC : American Association of Textile and Colorist

-

○ Anche il colore ha la sua importanza nel mantenimento delle caratteristiche meccaniche durante l'esposizione ai raggi UV. Colori scuri con alta concentrazione hanno generalmente una resistenza migliore allo scolorimento e soffrono meno di perdita di resistenza a rottura.

-



○ **Fig.10**

○

○ *Mantenimento della resistenza a rottura dopo l'esposizione nella camera meteo.*

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ **11.3.10 Resistenza alle radiazioni**

○

○ Il Nomex non risente in modo molto notevole dell'esposizione alle radiazioni nucleari, comunque non può essere assolutamente usato come protezione contro le radiazioni.

○

○ **11.4 CARATTERISTICHE ESSENZIALI PER LA RESISTENZA TERMICA**

○

○ La resistenza alla fiamma del Nomex è una caratteristica essenziale che dipende da come è fatto il Nomex internamente. La struttura attuale della fibra è stata sviluppata in modo che non possa bruciare. Diversamente dalle fibre naturali il Nomex non può bruciare in aria né fondere. Proprio per queste sue caratteristiche esso viene usato nelle apparecchiature di protezione termica. quando viene esposto ad un calore intenso le fibre del Nomex carbonizzano, formando una barriera protettiva tra la fonte di calore e la pelle. Tale barriera protettiva rimane morbida e flessibile finché la fibra è fredda, costituendo un ottimo secondo indumento protettivo per attività pericolose.

○

○	○ N	○ U	○ Tipo 430	○ Tipo 450	○ Tipo 462
---	-----	-----	------------	------------	------------

		n i t à			
○ Calore di combustione	○ A	○ BT U / L B	○ 12100	○ 12100	○ 12100
		○ Jo u l e / k g	○ 2.8×10^6	○ 2.8×10^6	○ 2.8×10^6
○ Calore specifico	○	○ Ca l / g r ° C	○ 0.30	○ 0.30	○ 0.26
○ Conducibilità termica	○ A	○ W / m ° K	○ 0.25	○ 0.25	○ 0.25

○

○

○ Le fibre del NOMEX aiutano a ridurre i rischi di ustioni in tre modi:

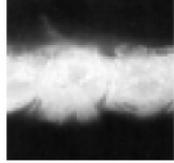
● Le fibre assorbono energia durante la loro carbonizzazione;

● Le fibre durante la degradazione si gonfiano, aumentando il loro spessore, creando così una barriera molto più fitta che limita o impedisce il passaggio dell'aria rovente;

● Le fibre gonfiandosi, oltre a ridurre gli scambi di calore convettivi, come esposto sopra, riducono anche gli scambi di calore per conduzione.

○

○



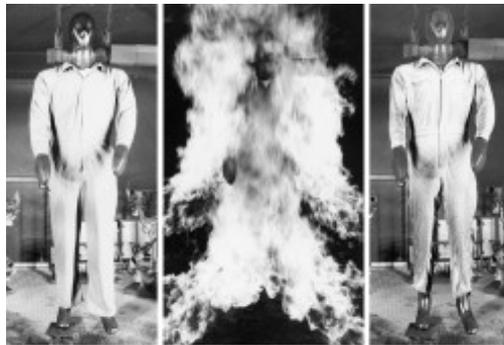
○

○

○

○ **Fig.10 e 11.**Mostrano l'ingrossarsi della fibra se sottoposta a calore intenso ed il suo compattarsi con le altre fibre circostanti.

○



○

○ **Fig.11**

○

○ *Test sulla resistenza alla fiamma di una tuta antiincendio in Nomex montata su di un manichino.*

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

-
-
-

-

- **11.5 APPLICAZIONI DEL NOMEX**

-

- Poiché il Nomex presenta una combinazione unica di proprietà meccaniche, termiche e tecnologiche esso viene usato in un'ampia gamma di applicazioni ove il rischio di archi elettrici o di incendi è presente, allo scopo di proteggere l'individuo dal contatto con essi e/o di isolare il fenomeno. Come appena detto quindi i campi di applicazioni sono i più ampi, dal campo petrolifero e petrolchimico a quello meccanico, passando per quello militare e di applicazioni agonistiche. Inoltre esso è presente anche in campo aereo spaziale.

-

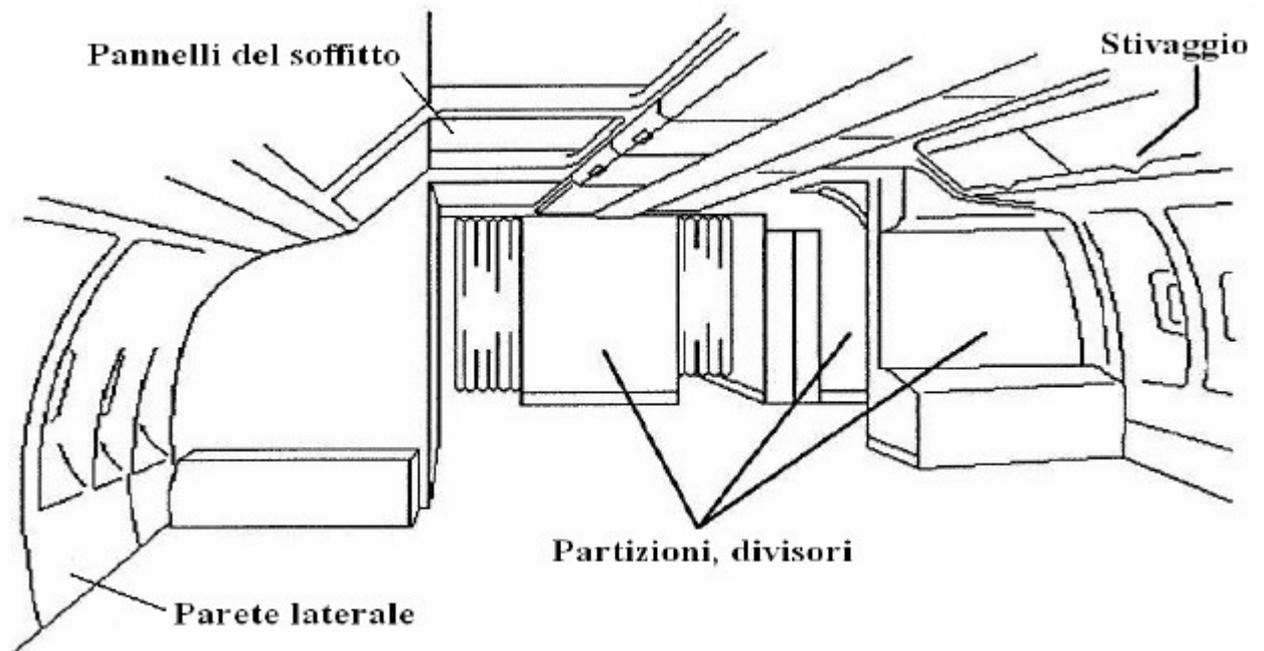
-

- **Applicazione degli honeycomb in NOMEX**

-

-

-



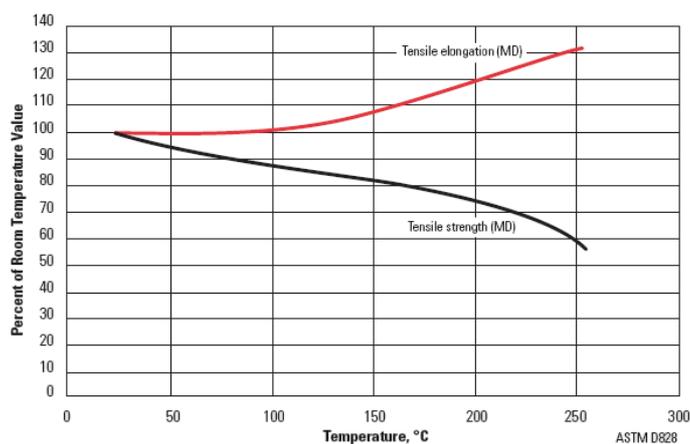
-

-

- *Esempio di applicazione di pannelli aventi honeycomb in Nomex negli interni di un velivolo civile quale il*

<input type="radio"/> Spessore nominale	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 0.05	<input type="radio"/> 0.08	<input type="radio"/> 0.13	<input type="radio"/> 0.18	<input type="radio"/> Normativa
<input type="radio"/> Spessore medio	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 0.06	<input type="radio"/> 0.08	<input type="radio"/> 0.13	<input type="radio"/> 0.18	<input type="radio"/> ASTM D374
<input type="radio"/> Peso foglio	<input type="radio"/> g	<input type="radio"/> 41	<input type="radio"/> 64	<input type="radio"/> 115	<input type="radio"/> 174	<input type="radio"/> ASTM D646
<input type="radio"/> Densità	<input type="radio"/> g	<input type="radio"/> 0.72	<input type="radio"/> 0.81	<input type="radio"/> 0.88	<input type="radio"/> 0.95	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Resistenza a trazione	<input type="radio"/> M	<input type="radio"/> 0.43	<input type="radio"/> 0.68	<input type="radio"/> 1.41	<input type="radio"/> 2.27	<input type="radio"/> ASTM D828
<input type="radio"/> Dir calandratura		<input type="radio"/> 0.19	<input type="radio"/> 0.34	<input type="radio"/> 0.71	<input type="radio"/> 1.16	
<input type="radio"/> Dir trasversale						
<input type="radio"/> Allungamento	<input type="radio"/> %	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> ASTM D828
<input type="radio"/> Dir calandratura		<input type="radio"/> 9	<input type="radio"/> 12	<input type="radio"/> 16	<input type="radio"/> 20	
<input type="radio"/> Dir trasversale		<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 9	<input type="radio"/> 13	<input type="radio"/> 15	

Conservazione caratteristiche termiche carta di NOMEX®



Dal grafico a fianco si vede come la resistenza del foglio di Nomex® decada all'aumentare della temperatura fino a perdere il 40% della sua resistenza a temperature prossime ai 250°C.

Bisogna però dire che tali temperature solitamente vengono raggiunte in caso di avvenimenti con l'innescarsi di incendi o surriscaldamenti per altra natura, quindi fuori dall'abituale ambito di lavoro del materiale.

Caratteristiche elettriche carta di Nomex®

<input type="radio"/> Spessore nominale	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 0.05	<input type="radio"/> 0.08	<input type="radio"/> 0.13	<input type="radio"/> 0.18	<input type="radio"/> Normativa
<input type="radio"/> Spessore medio	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 0.06	<input type="radio"/> 0.08	<input type="radio"/> 0.13	<input type="radio"/> 0.18	<input type="radio"/> ASTM D374
<input type="radio"/> Resistenza rapida impulso elettrico	<input type="radio"/> k	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 28	<input type="radio"/> 34	<input type="radio"/> ASTM D149

<input type="radio"/> Resistenza impulso elettrico	<input type="radio"/> k	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 55	<input type="radio"/> 55	<input type="radio"/> ASTM D3426
<input type="radio"/> Costante dielettrica a 60 hz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 1.6	<input type="radio"/> 1.6	<input type="radio"/> 2.4	<input type="radio"/> 2.4	<input type="radio"/> ASTM D150
<input type="radio"/> Fattore di dissipazione a 60 hz	<input type="radio"/> x	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> ASTM D150

13 RESINA - MATRICE

13.1 Funzione della Resina

Le resine nella struttura honeycomb hanno un compito del tutto simile a quello che hanno come matrici di un composito.

Breve riassunto del compito della matrice di un composito:

La matrice di un composito consta di una resina che, resa solidale con la fibra, svolge il ruolo deputato alla matrice.

I compiti della matrice nei compositi rinforzati da fibre sono molteplici:

1. Tenere le fibre in posizione;
2. Trasferire le tensioni tra le fibre;
3. Far da barriera ad attacchi chimici e umidità;
4. Prevenire l'abrasione delle fibre;
5. Contribuire, seppur in minima parte, all'assorbimento delle sollecitazioni.

La matrice ha però un ruolo chiave se la sollecitazione è di compressione: la matrice svolge il ruolo di sostegno contro l'instabilità causata dal carico verticale di compressione. Nel caso di compositi laminati essa svolge un ruolo chiave perché ad essa è affidato il compito di sopportare le forze di taglio interlaminari che si sviluppano. L'interazione fibre-matrice è importante anche nel pre-stabilire le modalità di rottura della struttura. Infine il processo costruttivo e i difetti nel materiale composito dipendono fortemente dalla matrice.

La resina nell'honeycomb ha lo scopo di irrigidire e irrobustire la struttura porosa delle pareti cellulari e di difendere le pareti cellulari stesse da aggressioni chimiche di varia natura e dall'umidità, oltre che contribuire alla resistenza ad alta temperatura. Si vede quindi che lo scopo della resina nell'honeycomb ricopia quello della resina come matrice.

Per ovviare al fenomeno dello "sfogliamento" della resina dalle pareti cellulari, cosa che diminuisce notevolmente l'effetto migliorativo prestazionale

della presenza della resina, le pareti cellulari hanno struttura porosa, in modo tale che la resina riesca ad aggrapparsi alle pareti, componendo un legame tridimensionale con le pareti stesse (cosa affrontata in modo più approfondito nel brevetto di produzione degli honeycomb aramidici).

○

- Proprio la presenza della resina è uno dei motivi dell'incertezza della densità dell'honeycomb stesso, poiché la quantità di resina assorbita dalle pareti cellulari è funzione della percentuale di volume delle porosità che viene riempito dalla resina, cosa che varia da processo a processo.

○

○ 13.2 Generalità delle Resine

○

- Genericamente una resina può essere definita come un prodotto organico, solido o semisolido, d'origine naturale o sintetica, senza un preciso punto di fusione, generalmente, di alto peso molecolare.

○

- La principale distinzione che viene fatta è tra resine termoplastiche e resine termoindurenti.

○

- Le **resine termoplastiche** sono polimeri lineari o ramificati, tenuti assieme non da legami chimici bensì da legami secondari quali Van Der Waals e legami idrogeno, che possono essere fusi unendo loro un'adeguata quantità di calore; durante la fase di plastificazione non subiscono alcuna variazione a livello chimico. Possono essere forgiati e riforgiati in qualsiasi forma usando tecniche quali stampaggio ed estrusione. Tramite il calore si ottiene la fusione di questi polimeri che, successivamente, a contatto con le pareti dello stampo, solidificano per raffreddamento.

- Il processo di fusione-solidificazione può essere ripetuto senza apportare variazioni notevoli alle prestazioni della resina.

- Generalmente i polimeri termoplastici non cristallizzano facilmente, a seguito di un raffreddamento, perché le catene polimeriche sono molto aggrovigliate. Anche quelli che cristallizzano non lo fanno perfettamente, bensì sono caratterizzati da regioni cristalline e regioni amorfe.

- Le regioni cristalline sono caratterizzate da una loro temperatura di fusione, le regioni amorfe o semi-amorfe sono caratterizzate dalla temperatura di transizione vetrosa T_g (glass transition temperature), temperatura alla quale si trasformano in maniera abbastanza rapida dallo stato rigido-vetroso a quello viscoso.

- Con l'applicazione di calore i legami secondari sopracitati vengono temporaneamente rotti e le molecole hanno nuovamente la possibilità di muoversi per fluire in una nuova configurazione se vengono forzate.

- Con il raffreddamento le molecole vengono congelate nella configurazione assunta ed i legami secondari vengono riformati.

- Quindi è per questo che i polimeri termoplastici possono essere riscaldati-riammorbiditi e riformati quante volte si vuole.

○

- Questa temperatura di transizione è legata all'innescarsi di moti di alcune macromolecole consentiti dalla rottura dei legami intermolecolari di Van Der Waals e dei legami idrogeno che compongono il materiale, sotto T_g tali moti non hanno luogo perché manca loro l'energia di attivazione fornita dalla temperatura.

○

- La temperatura di fusione e quella di transizione vetrosa sono proporzionali con la forza di legame intermolecolari.

- Le **Resine termoindurenti** invece sono tenute assieme chimicamente mediante Cross-Link, formando una struttura reticolare, tridimensionale e solida. Una volta che tali legami sono formati, durante la reazione di polimerizzazione, i polimeri termoindurenti non possono essere più fusi mediante l'apporto di calore. In ogni caso il numero di collegamenti intermolecolari, i cross-link, è limitato, ed è possibile ammorbidire il polimero somministrandogli calore (che andrà ad indebolire i legami non chimici presenti).

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

- ***Classificazione delle resine***

-

- Esistono numerose famiglie di resine che si differenziano le une dalle altre in base alla diversa composizione chimica, che ha ripercussioni sulle proprietà chimico-materiali dei materiali.

- Di seguito vi è un elenco delle principali famiglie di resine:

-

- termoindurenti:

- Fenoliche
- Ammidiche
- Epossidiche
- Poliuretaniche
- Poliestere insature
- Siliconiche
- Alchidiche

-

- Termoplastiche:

- Acriliche
- Policarbonati
- Poliesterriche termoplastiche

- Vinilesteriche
- Polifluoruri di vinile
- Poliolefiniche (polietilene, polipropilene)

○

○

- Le resine utilizzate come resine di rinforzo nelle carte aramidiche usate nella produzione degli honeycomb esaminati è esclusivamente la resina fenolica, anche se altre resine sarebbero state ugualmente adatte allo scopo.

○

○

○ 13.3 Resine fenoliche

○

- Sono prodotte a partire dalla reazione della formaldeide con il fenolo per dare prodotti di condensazione. La reazione è svolta in presenza di catalizzatori: questi possono essere sia acidi che basi e la loro scelta ha un ruolo determinante, insieme al rapporto molare dei reagenti, sulla natura dei prodotti della reazione.

○

- Il primo passo della reazione consiste nella produzione di composti noti come derivati metilici.

○

- Tali prodotti possono essere considerati come le unità monomeriche per la successiva fase di polimerizzazione, si formano più facilmente in ambiente neutro o alcalino. Se l'ambiente in cui si svolge la reazione è acido e se il rapporto tra la formaldeide ed il fenolo è minore di 1 i derivati metilici reagiscono con delle reazioni di condensazione con i fenoli a dare inizialmente il diidrossifinilmetano ed in seguito ad altre condensazioni e formazioni di ponti metilici, dei polimeri lineari con massa molecolare molto ridotta chiamati Novolacs.

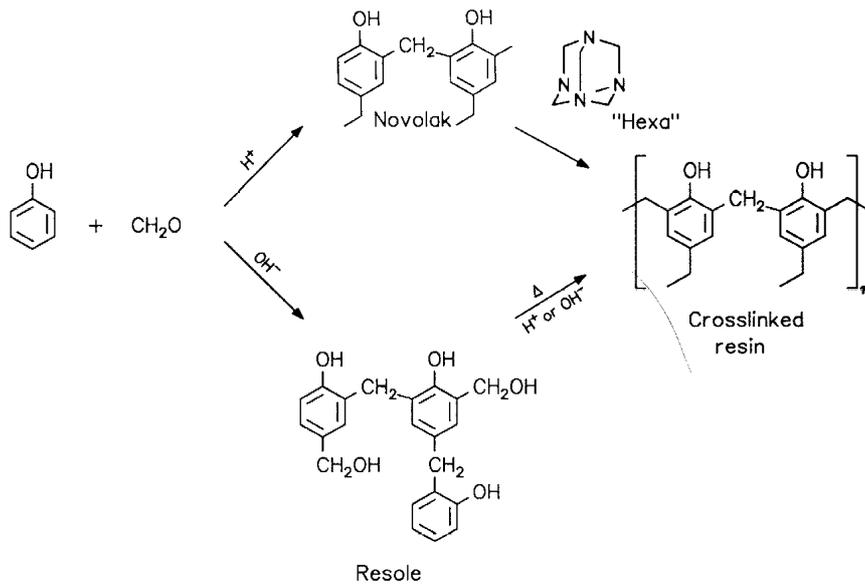
- Per ottenere resine reticolate occorre farli reagire con altra formaldeide fino a portare il rapporto sopracitato maggiore di 1.

○

- In presenza di ambiente alcalino e con maggior formaldeide i fenoli metilici possono reagire o attraverso la formazione di legami metilici o attraverso la formazione di legami eterici, in questo caso è però necessario perdere una molecola di formaldeide per la formazione di un ponte metile.

- Prodotti di questo tipo, solubili e fusibili, sono detti Resoli. Se la reazione che porta alla loro produzione è portata ulteriormente avanti un grande numero di gruppi fenolici può condensare a produrre una reticolazione del polimero.

○



○

○

○ La formazione di resole e novolacs, rispettivamente, porta alla formazione di resine fenoliche attraverso processi detti ad uno stadio o a due stadi.

○

○ In un processo ad uno stadio tutti i reagenti necessari per la produzione del polimero finale (fenolo+formaldeide+catalizzatore) sono posti all'interno di un reattore e fatti reagire assieme. Il rapporto molare tra formaldeide e fenolo è di 25:1 ed il catalizzatore è alcalino.

○

○ Nel processo a due stadi il catalizzatore utilizzato è acido e solo una parte della formaldeide necessaria per la reazione è introdotta nel reattore all'inizio della reazione. Le restante formaldeide necessaria per il completamento della reazione viene introdotta solo in seguito sotto forma di esametilteraammina che si decompone in presenza di calore ed umidità dando luogo a formaldeide e ammoniaca la quale reagisce come catalizzatore per il processo.

○

○ Quando i prodotti intermedi vengono ottenuti dal sistema viene eliminata l'acqua e ciò che rimane è una resina detta allo stadio A.

○

○ A questo punto vengono introdotti coloranti, lubrificanti e esametilteraammina a sufficienza per ottenere la quantità di formaldeide necessaria per completare la reazione.

○

○ Le caratteristiche di resistenza chimica e termica sono dipendenti in parte dai rinforzi inseriti.

○

○ Vantaggi:

- Buona resistenza termica (HDT=200-260°C)
- Buona stabilità dimensionale (anche ad alta temperatura)
- Elevata resistenza a creep
- Eccellenti proprietà adesive

- Buona resistenza chimica
- Elevata durezza
- Elevata resistenza a compressione
- Buon isolante elettrico
- Scarsa infiammabilità e generazione di fumi
- Bassa tossicità dei fumi
- Basso assorbimento di umidità
- Costo ridotto

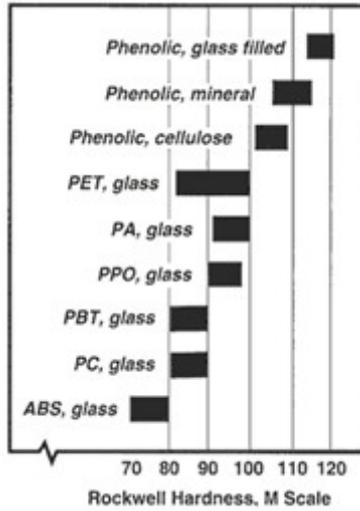
Svantaggi:

- Produzione di sottoprodotti (volatili) durante la policondensazione
- Instabilità alle radiazioni UV
- Bassa deformazione a rottura

Dati tecnici

<input type="radio"/> Parametri esaminati	<input type="radio"/> Unità di misura	<input type="radio"/> Valori riscontrati	<input type="radio"/> Normative di riferimento
<input type="radio"/> Peso specifico	<input type="radio"/> g/cm ³	<input type="radio"/> 1,5-1,6	<input type="radio"/> ISO 1183
<input type="radio"/> Assorbimento acqua a 23°C	<input type="radio"/> Mg	<input type="radio"/> >=50	<input type="radio"/> DIN 53495
<input type="radio"/> Resistenza a flessione	<input type="radio"/> Mpa	<input type="radio"/> 120-140	<input type="radio"/> ISO 178
<input type="radio"/> Modulo elastico a 23°C	<input type="radio"/> Gpa	<input type="radio"/> 11-13	<input type="radio"/> ISO 178
<input type="radio"/> Resistenza a compressione a 23°C	<input type="radio"/> Mpa	<input type="radio"/> 200-250	<input type="radio"/> DIN 53454

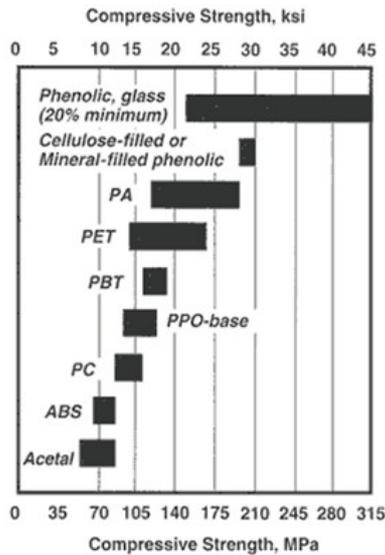
-
-
-
-
-
-



-

- Grafico 2) (a sx)
- Durezza in scala Rockwell delle plastiche ingegneristiche. Si vede come i polimeri prodotti delle resine fenoliche abbiano una resistenza notevolmente superiore rispetto agli altri polimeri esaminati data la presenza di gruppi aromatici

-
-
-
-
-

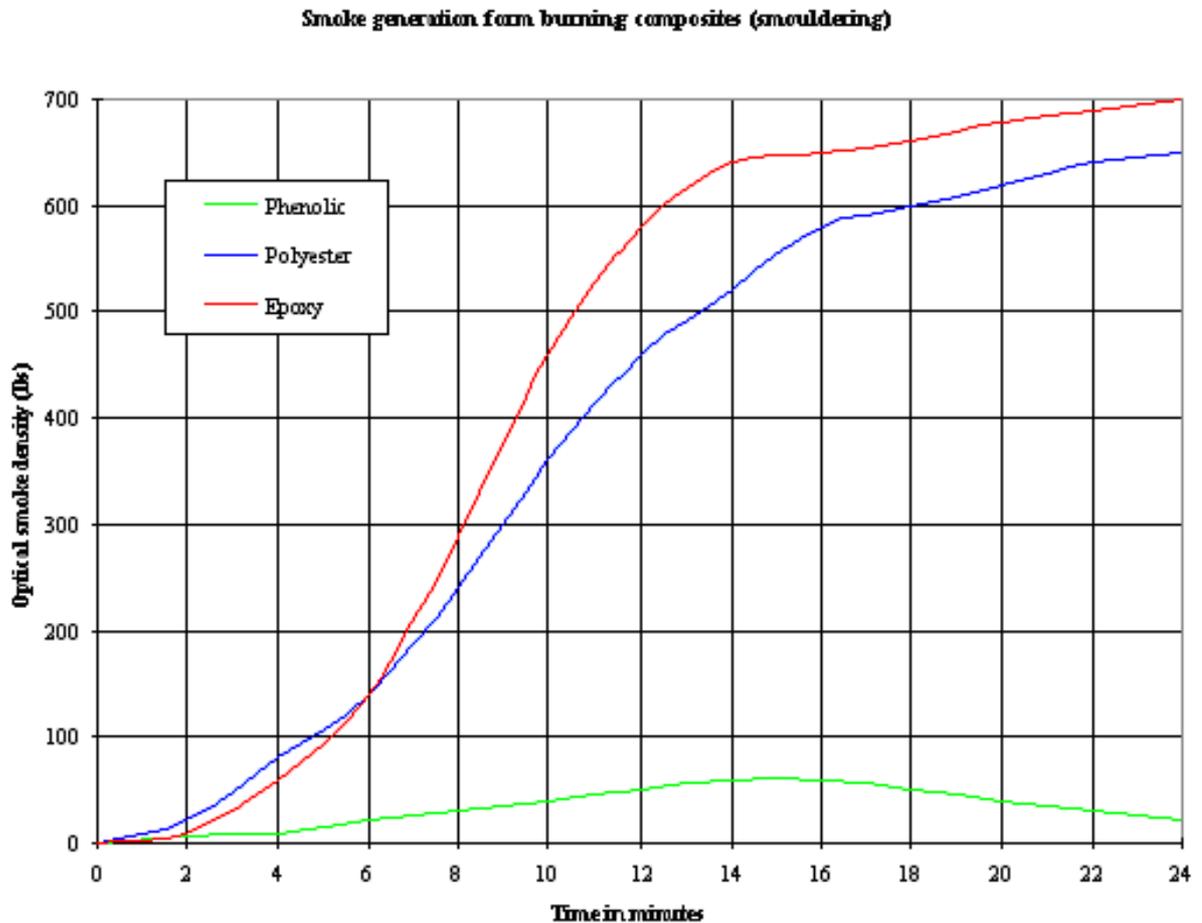


-
-
-
-
-
-
-

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

Grafico 3) (a dx)

- Resistenza a compressione delle plastiche ingegneristiche. Si vede come i polimeri fenolici sopravanzino di larga misura gli altri polimeri di confronto ***???perchè
-



- Grafico 4: Grafico che rappresenta l'esame di densità ottica dei fumi emanati dalle resine sottoposte alla fiamma.
-
- La maggior resistenza delle resine fenoliche e la minor densità dei gas emessi è conseguenza della presenza dei gruppi aromatici, che rendono la struttura stabile alle alte temperature.
- Resine fenoliche caratterizzate da bassa tossicità dei fumi.

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-
-
-
-
-

○ **HONEYCOMB ARAMIDICO E METODO PER LA PRODUZIONE DELLO STESSO**

○ Paese : United States of America

○ N°brevetto : 6,544,622 B1

○ Data presentazione :non dichiarata Data approvazione: 8/04/2008

○ Denominazione : Honeycomb aramidico e metodo per la produzione dello stesso

○ Inventore: Kazuhiko Nomoto, Akisima (JP)

○ Mandatario : Shova Aircraft Industry Co.,Ltd , Tokyo(JP)

○ *Primo esaminatore : Deborah Jones*

Assistente Esaminatore: Ling Xu

○

○ Estratto:

○ I fogli aramidici sono calandrati in modo da produrre porosità che si estendono dalla superficie esterna fin dentro al materiale, con una porosità dal 20 al 60%. Inoltre una resina di rinforso adesisce alle pareti cellulari dei fogli aramidici ad i fori delle porosità vengono riempiti di resina fino al 50% del loro volume.

FIG. 1A

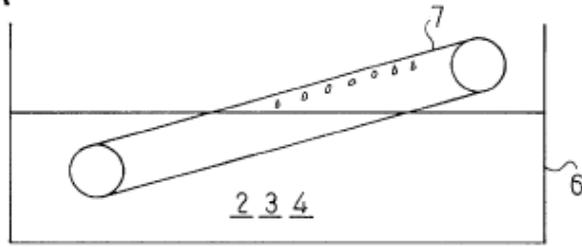


FIG. 1B

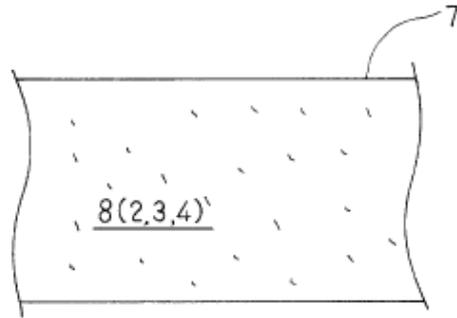
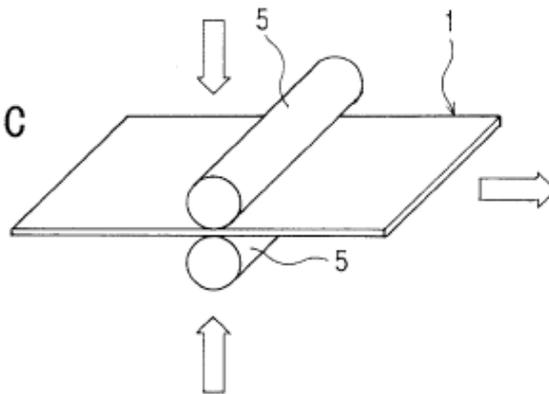


FIG. 1C



o

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

FIG. 2A

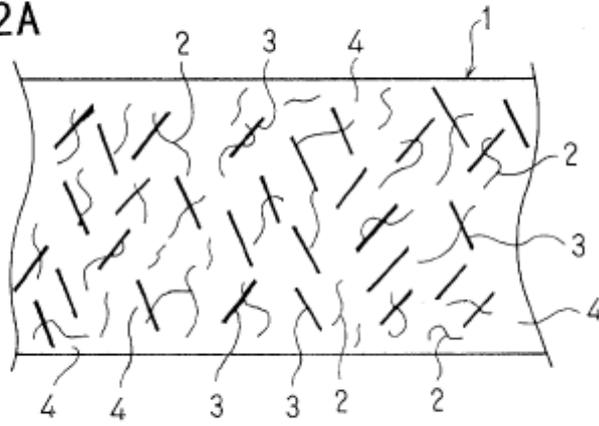
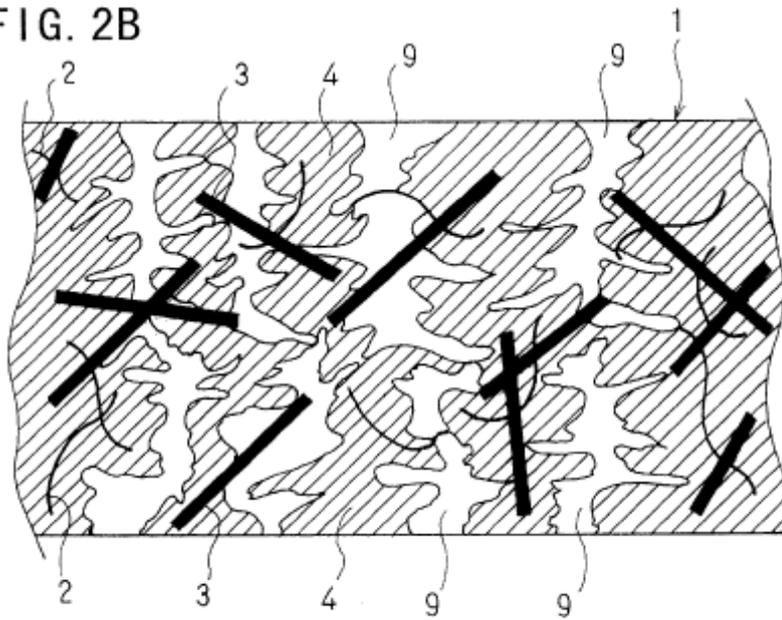


FIG. 2B



○

-
-
-
-
-
-
-
-
-

FIG. 3A

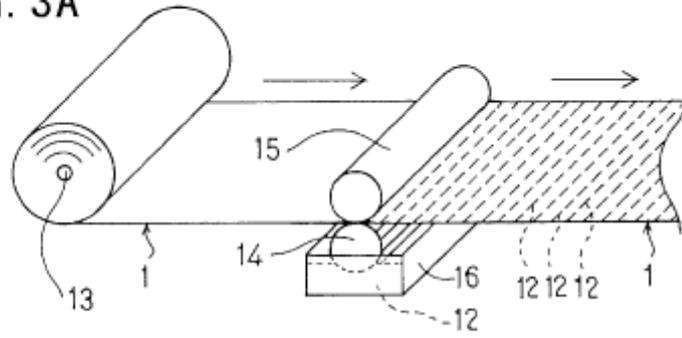


FIG. 3B

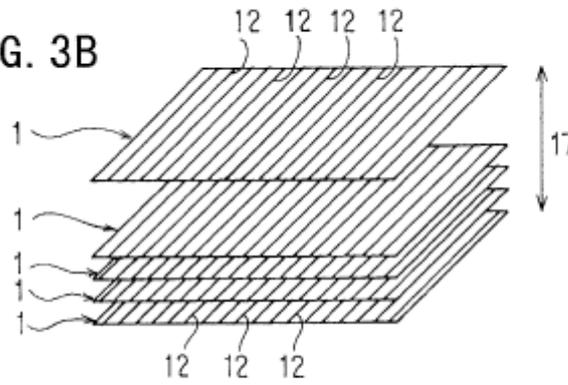
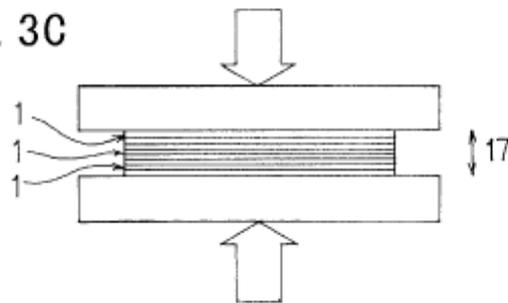
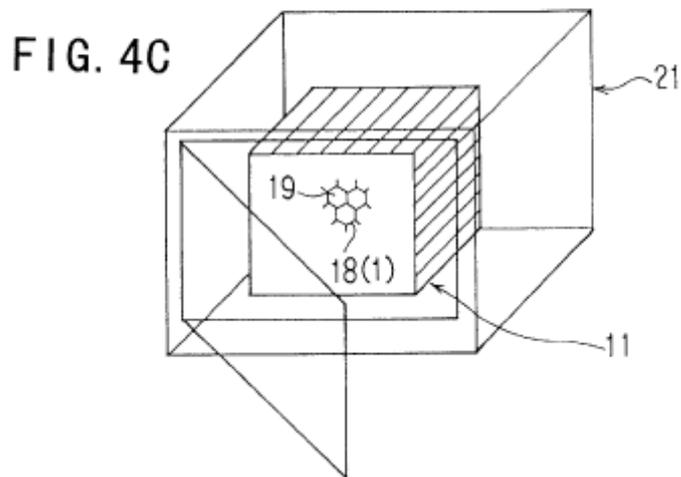
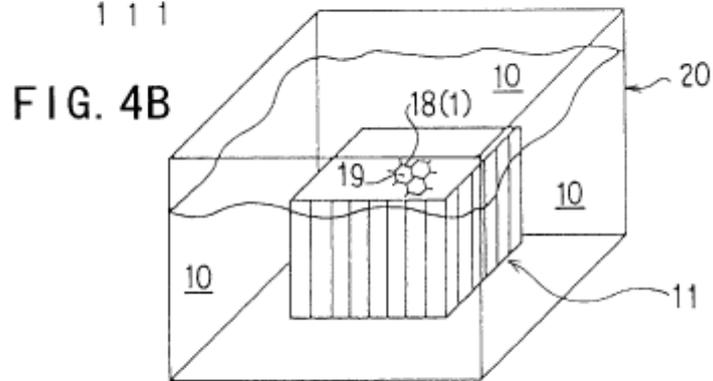
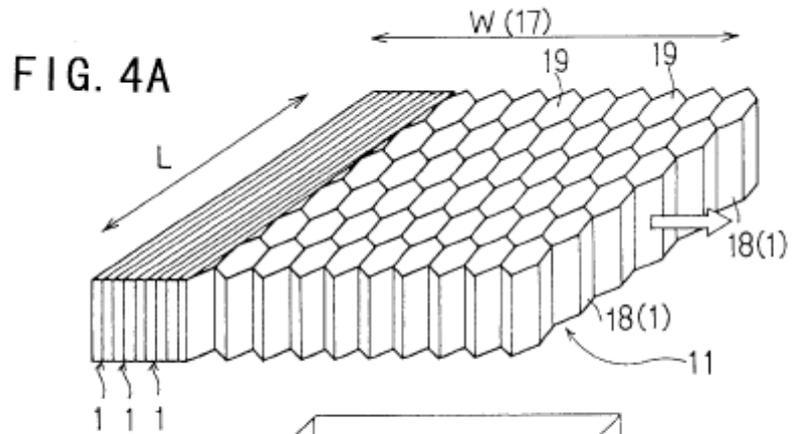


FIG. 3C



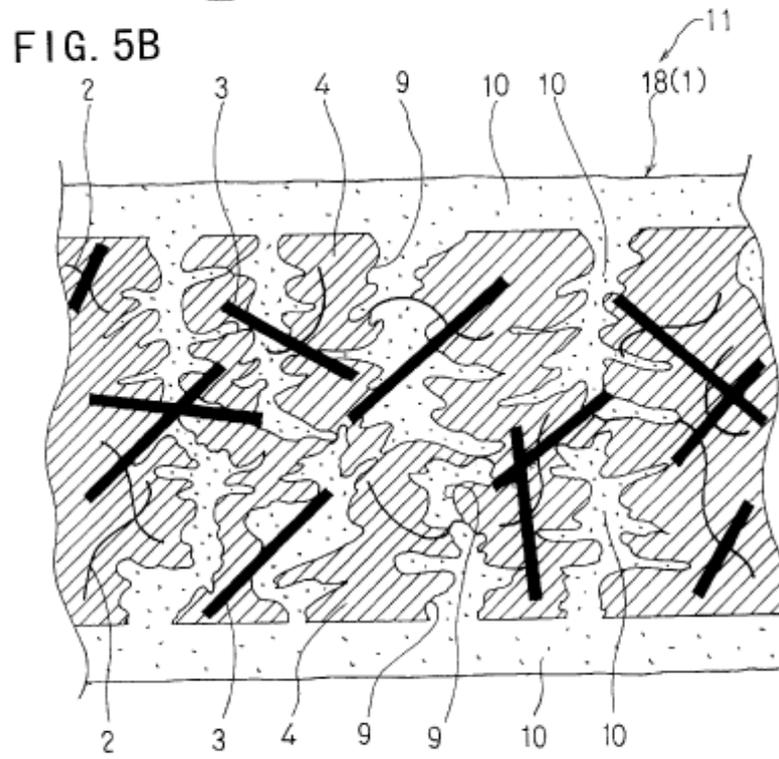
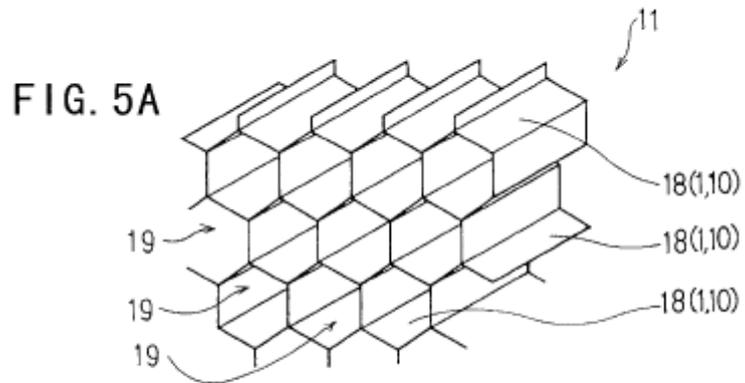
○

○
○
○
○
○
○
○
○
○
○



○

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-



○

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

FIG. 6A Relationship between the compression strength of the aramid honeycombs and the porosity of the aramid sheets

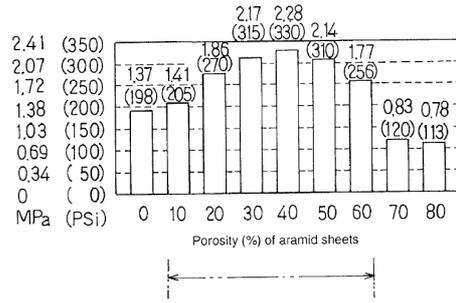


FIG. 6B Relationship between the compression strength of the aramid honeycombs and the porosity of the aramid sheets

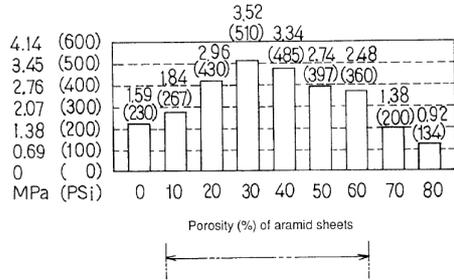


FIG. 7A Relationship between the compression strength of the aramid honeycombs and the amount of the para-aramid fibers

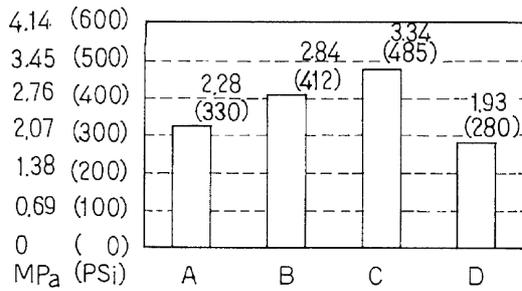
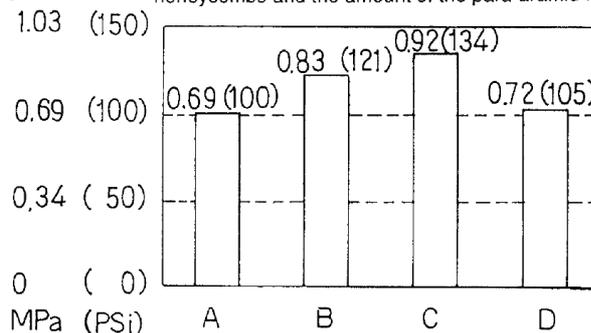


FIG. 7B

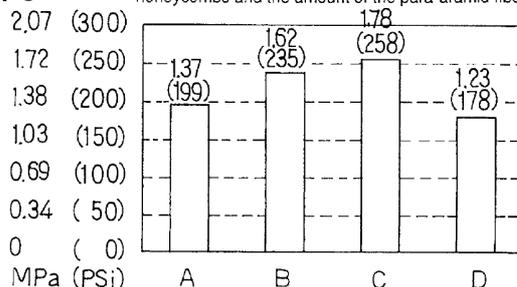
Relationship between the shear strength (W direction) of the aramid honeycombs and the amount of the para-aramid fibers



○

FIG. 7C

Relationship between the shear strength (L direction) of the aramid honeycombs and the amount of the para-aramid fibers



○

○

○ Ambiente dell'invenzione:

- la presente invenzione è relativa agli honeycomb aramidici ed ai metodi per produrre gli stessi. In modo particolare l'invenzione è relativa ai core in honeycomb usando fogli aramidici.

○

○ Descrizione della Prior Art

○ Sfondo

- Si conosce che la struttura del core in honeycomb è composta da un numero notevole di strutture cellulari colonnari separate da pareti cellulari comuni alle celle. Inoltre si conosce l'uso dei fogli aramidici come materiale base per la produzione degli honeycomb aramidici. I fogli di honeycomb aramidici contengono una resina di tipo nylon, in modo particolare i fogli di honeycomb aramidici comprendenti resina hanno capacità di ritardare la fiamma, il calore ed altre eccellenti proprietà richieste per la struttura del core a honeycomb.
- Una struttura del core ad honeycomb comprende fogli honeycomb aramidici usati come materiale base delle pareti cellulari, descritti dal brevetto giapponese n° 4,226,745. Secondo tale pubblicazione i fogli honeycomb aramidici contengono dallo 0% al 50% in peso di leganti e dal 50% al 100% in peso di fibre, in cui le fibre aramidiche rappresentano dal 20% all'80% del totale.
- Gli honeycomb convenzionali però difettano nei seguenti punti.
- Primo, i fogli aramidici hanno una struttura tessuta difettosa. I fogli contengono una larga parte, dal 50% di peso in più, di fibre para-aramidiche allargate, e ciò è un difetto nel funzionamento. Durante la produzione dei fogli si dà una dispersione tutt'altro che uniforme delle fibre. Come conseguenza di tale disuniformità i fogli prodotti non sono uniformi e presentano densità diverse nelle varie porzioni del foglio. Quindi il foglio presenta zone con presenza di fibre in concentrazione diverse, e ciò è ovviamente un inconveniente nella produzione dell'honeycomb. Inoltre le porosità nel foglio non sono regolari e può accadere che le porosità buchino letteralmente le pareti cellulari, (in tal caso le porosità si dicono a "buco di spillo") con il conseguente passaggio di resina attraverso le pareti cellulari. Per questo la produzione degli honeycomb è spesso difficoltosa.

- Secondo, i fogli aramidici difettano di resistenza. Se i fogli contengono dal 50% in su di fibre la presenza di acqua nell'ambiente di lavoro diminuisce in modo insoddisfacente la loro capacità di filtraggio.
- In terzo luogo i fogli divengono eccessivamente spessi quando contengono dal 50% in su di fibre ed il ripristino di uniformità dello spessore del foglio causa una disuniformità della densità del foglio. È proprio questo punto che definisce i fogli aramidici come materiale inappropriato per la produzione di honeycomb.

○ PRIOR ART

- Come è stato menzionato sopra la produzione di honeycomb aramidici presentata da Kokai (n°4,226,745), presenta problemi nei materiali base usati nella produzione. Una contromisura sta nel trattamento di calandratura ad alta temperatura ed alta pressione che può essere usato nei materiali di partenza per la produzione dell'honeycomb aramidico.
- La polpa meta-aramidica, che ha ottime proprietà di fissaggio, è usata in addizione con altri ingredienti, col 50% o più di fibre aramidiche, per risolvere i problemi di scarse proprietà di legame. [...] . Inoltre i fogli, dopo essere stati prodotti, vengono sottoposti a calandratura ad alta temperatura e pressione in modo da produrre un film sottile e così risolvere il terzo problema dello spessore dei fogli e della riduzione di densità.
- La polpa meta-aramidica ha il punto di rammollimento a 200°C. Comunque le fibre para-aramidiche e la polpa para-aramidica sono semplicemente impigliati una con l'altra nella produzione dei fogli mediante un normale metodo con un liquido per la preparazione dei fogli come l'acqua e poi l'essiccamento a 150°C o meno.
- La polpa meta-aramidica quindi non è legata in fase liquida con le fibre come un normale legante. Perciò i fogli prodotti non hanno legame sufficientemente forte per la produzione degli honeycomb aramidici.
- Per ottenere la forza di legame necessaria il trattamento di calandratura ad alta temperatura e alta pressione è necessario associarlo ai processi convenzionali. Infatti i fogli aramidici dopo essere stati prodotti vengono sottoposti a calandratura ad alta pressione (30Mpa) ed alta temperatura (circa 300°C). In tal modo la polpa fluidifica e poi risolidificando fa acquisire al foglio una resistenza tale da renderlo adatto alla produzione di honeycomb.
- In secondo luogo gli honeycomb aramidici vengono prodotti usando fogli aramidici come materiale base mediante un normale processo di espansione, in cui si applica adesivo in linee prestabilite, pressando poi i fogli in modo che si abbia il legame tra i fogli lungo le prestabilite linee e successivamente l'espansione. Gli honeycomb aramidici così ottenuti sono sottoposti poi ad un trattamento in cui le pareti cellulari vengono ricoperte mediante un impregnazione di resina di rinforzo.

○ Problemi risolti da tale invenzione

- Per gli honeycomb aramidici convenzionali i problemi da risolvere sono già stati indicati.
- Primo, nessun miglioramento ha risolto il problema dei difetti tessili della struttura. Le fibre aramidiche sono ancora disposte in modo disuniforme e così si ottengono fogli disuniformi. La polpa meta-aramidica, resa fluida tramite alta temperatura e pressione durante il trattamento di calandratura è usata solamente per riempire gli spazi tra le fibre. Di conseguenza la densità dei fogli è disuniforme. Perciò il rapporto di restringimento del foglio è diverso tra una porzione contenente molte fibre ed una porzione in cui la presenza di polpa è maggioritaria, così che non si ha un restringimento uniforme in seguito al raffreddamento post-calandratura. Quindi i fogli aramidici convenzionalmente usati non sono liscie sono responsabili della rugosità. Dato che i fogli difettano di precisione la loro lavorazione in serie diviene difficoltosa. Inoltre c'è il caso della formazione di "buchi di spillo" interni ai fogli. Ciò comporta che l'adesivo disposto lungo predeterminate linee di unione dei fogli passi attraverso tali porosità quando il foglio viene sottoposto ad alte temperature e pressioni, creando problemi di estensione disuniforme o mancata delle celle.
- Secondo punto è il problema dei costi. Una produzione non automatica è maggiormente costosa di una produzione automatizzata, ma i problemi sopra elencati costringono ad una produzione dell'honeycomb semi-artigianale. Inoltre il trattamento di calandratura dei fogli rende la produzione ancora più costosa.
- Terzo problema è l'insufficiente resistenza degli honeycomb aramidici così ottenuti. I fogli aramidici di base sono sottoposti a pressioni di 30Mpa a temperature prossime ai 300°C e ciò provoca che la maggior parte delle porosità viene meno (le porosità "buone" servono per l'ancoraggio della resina, le porosità "cattive" invece sono quelle passanti). Negli honeycomb convenzionali la resina di rinforzo non deve penetrare attraversando le pareti cellulari, bensì ricoprirle.
- Come risultato si ha che gli honeycomb sono fragili se sottoposti a schiacciamento o forze di taglio. Succede che quando la forza esterna viene applicata lo strato di resina di rinforzo tende ad essere sfogliata dall'interfaccia e così lo strato di resina non agisce effettivamente da rinforzo. Per risolvere il problema dello sfogliamento delle pareti bisogna assumere honeycomb densi, con i problemi che il maggior peso comporta.

○ Riassunto dell'invenzione

- La presente invenzione è stata sviluppata per risolvere i problemi menzionati sopra. Secondo tale invenzione gli honeycomb vengono prodotti mediante fogli para-aramidici comprendenti sia polpa para.aramidica sia leganti. I fogli sono calandratati mediante una pressione lineare di $19.6 \cdot 10^4 \text{ N/m}$ o più ad una temperatura di 150°C o più in modo che i fogli mantengano una porosità dal 20 al 60% del volume. Dopo tale trattamento la resina aderisce alle pareti cellulari e le pareti cellulari sono impregnate, e non solo ricoperte come prima, di resina. I vantaggi tecnici di tale invenzione sono che la consistenza della struttura dei fogli aramidici è migliorata per cui gli honeycomb prodotti sono più lisci, ciò ha come conseguenza la possibile automatizzazione della procedura e quindi minori costi, inoltre resistenza dell'honeycomb risulta migliorata.

○ Mezzo per risolvere i problemi

- **Primo modulo:** secondo il primo modulo di tale invenzione la struttura honeycomb è coposta da un numero notevole di strutture colonnari separate da pareti cellulari in cui un numero di fogli aramidici sono usati come materiale base per le pareti cellulari, e le pareti cellulari contengono polpa para-aramidica e leganti e sono caratterizzate da porosità presenti dopo il trattamento di calandratura, e le pareti cellulari sono impregnate con resina di rinforzo, e le suddette porosità vengono riempite da tale resina.
- **Secondo modulo:** il secondo modulo riflette le stesse cose descritte nel primo modulo, solo che oltre alla polpa meta-aramidica sono presenti anche le fibre.
- **Terzo modulo:** il terzo modulo ripete il secondo modulo ma le fibre para-aramidiche sono presenti in forma staple (graaffette) e in forma fiocco, e rappresentano circa il 40% **by weight or less of the total amount (100%) of the para-aramids pulp and said para-aramids fibers**, e dove il legante viene usato per un importo dal 5 al 20% del peso totale della polpa para-aramidica e delle fibre para-aramidiche.
- **Quarto modulo:** il quarto modulo ripete il primo modulo ma prevede una porosità dal 20 al 60% del volume totale.
- **Quinto modulo:** si ripete il modulo sopra ma il 50% del volume delle porosità, o meno, sono impregnate con resina di rinforzo.
- **Sesto modulo:** il sesto modulo si compone del metodo per la produzione degli honeycomb aramidici. Esso è composto dei seguenti passi:
 - Preparazione dei fogli comprendenti polpa para-aramidica, fibre para-aramidiche e legante;
 - Calandratura dei fogli aramidici mediante la quale vengono prodotte le porosità, tali porosità sono adatte allo scopo di ritenere la resina di rinforzo;
 - Applicazione delle linee di adesivo nelle aree predestinate;
 - Impilaggio dei fogli in modo tale che i fogli siano spostati uno rispetto all'altro di mezzo passo delle linee di adesivo;
 - Pressaggio e riscaldamento dei fogli di fibra aramidica in modo tale che si abbia l'incollaggio lungo le linee precedentemente tracciate;
 - Estensione dei fogli in direzione ortogonale alla direzione della pila in modo da ottenere la forma finita dell'honeycomb;
 - Trattando di adesione della resina di rinforzo sulle pareti cellulari e impregnazione delle porosità con la resina.
- **Settimo modulo:** ripete il sesto modulo ma prevede una calandratura con una forza lineare di $19.6 \cdot 10^4 \text{ N/m}$ o più ad una temperatura di 150°C o più.

○ Struttura dell'invenzione

- Secondo tale invenzione i fogli para-aramidici sono composti dal 60-100% in peso di polpa para-aramidica, 40-0% in peso di fibre para-aramidiche, e dal 5-20% del peso totale di polpa e di fibre. I fogli aramidici vengono calandratati con una forza di $19.6 \cdot 10^4 \text{ N/m}$ o più ad una temperatura maggiore o uguale a 150°C in maniera tale che si abbia la produzione di porosità per il 20-60% di volume totale.
- Le pareti cellulari prodotte dai fogli aramidici sono formate mediante l'applicazione di linee adesive in intervalli predeterminati, in modo tale che i fogli stessi siano uniti in intervalli predeterminati, applicando poi calore e pressione si ha l'unione lungo tali linee dei fogli e poi i fogli vengono espansi in direzione trasversale alla pila. L'honeycomb così ottenuto viene poi sottoposto a trattamento in cui le pareti cellulari sono ricoperte da una resina di rinforzo e le porosità riempite al 50% da tale resina. La resina penetrata nelle pareti cellulari rende più forti i legami tra polpa para-aramidica, fibre para-aramidiche e legante. Inoltre la resina aderisce alle superfici delle pareti cellulari e legata in modo tri-dimensionale con la resina penetrata nelle porosità.

○ Breve descrizione dei disegni

- L'invenzione è spiegata nel dettaglio riferendosi ai disegni:

- FIG. 1A : vista laterale dello sviluppo della carta con spiegazione;
- FIG. 1B : vista piana delle parti essenziali nell'ottenimento della carta aramidica;
- FIG. 1C : vista prospettica del passo della calandratura;
- FIG. 2A : vista piana ingrandimento fogli aramidici;
- FIG. 2B : vista piana ingrandimento sezione fogli aramidici;
- FIG. 3A : vista prospettica dell'applicazione dell'adesivo;
- FIG. 3B : vista prospettica dell'impilamento dei fogli;
- FIG. 3C : vista piana della compressione e riscaldamento dei fogli;
- FIG. 4A : vista prospettica spiegando l'estensione della pila di fogli;
- FIG. 4B : vista prospettica spiegando la ricopertura con resina di rinforzo;
- FIG. 4C : vista prospettica spiegando il passo di essiccazione;
-
- FIG. 5A : vista prospettica dell'honeycomb aramidico;
- FIG. 5B : vista della sezione delle pareti cellulari dell'honeycomb;
- FIG. 6A : grafico spiegativo della relazione tra resistenza a compressione dell'honeycomb aramidico e la porosità dei fogli aramidici;
- FIG. 6B : grafico spiegativo della relazione tra resistenza a compressione degli honeycomb aramidici e porosità dei fogli dei fogli aramidici di composizione differente rispetto a quelli rappresentati in FIG. 6A;
- FIG. 7A : grafico spiegativo della relazione tra resistenza a compressione e contenuto di fibre para-aramidiche.
- FIG. 7B : grafico spiegativo della relazione tra resistenza al taglio in direzione W (2) degli honeycomb aramidici e contenuto di fibre para-aramidiche;
- FIG. 7C : grafico spiegativo la relazione tra resistenza al taglio in direzione L (1) degli honeycomb aramidici e contenuto di fibre para-aramidiche.

○ DESCRIZIONE DELLE FORME PREFERITE

○ Struttura dei fogli aramidici

- Come mostrato in figura 2A e 2B il foglio aramidico 1 usato come materiale base contiene polpa para-aramidica 2 opzionalmente mescolata con fibre para-aramidiche 3 e legante 4. La polpa 2 è ottenuta mediante trattamento delle fibre para-aramidiche con una soluzione di acido solfidrico e altri acidi e successivo sminuzzamento delle fibre così trattate in fibre di lunghezza compresa tra i 3 e i 10 mm. Tali fibrette vengono poi trattate in modo da avere esili legami una con l'altra.
- La polpa para-aramidica è l'ingrediente principale dei fogli aramidici, ed è contenuta nei fogli stessi in una percentuale che varia dal 60 al 100% del peso composto dalla polpa 2 e dalle fibre 3 .
- Le fibre para-aramidiche sono ottenute mediante il pretaglio del materiale fibroso in pezzi sotto forma di fiocchi o graffette. Le fibre sono fini ed arricciate, ed hanno una lunghezza compresa tra i 3 e i 10 mm, ed uno spessore compreso tra i 0.3 e 3 denari (ricordo: il lo spessore di un denaro è lo spessore di un filo lungo 9000m del peso di 1 grammo).
- Le fibre para-aramidiche 3 sono usate nel foglio 1 in un contenuto percentuale che varia dal 0 al 40% del peso totale composto da fibre e polpa.
- Il legante è usato per collegare le fibre con la polpa dopo che il legante stesso è stato liquefatto sotto calore, tale legame ha una forza sufficiente per consentire l'uso del foglio come materiale per l'honeycomb.

- Il legante è di tipo resina. Sono da preferire resine viniliche come la PVA o resine fenoliche, acriliche e altre acqua solubili. Il legante viene emulsionato in un liquido nel quale viene immerso il foglio.
- Il legante viene usato nei fogli in un importo che varia dal 5 al 20% del peso complessivo composto da fibre e polpa, in rapporto rispettivo 100:5 e 100:20.

○ **Fabbricazione dei fogli aramidici**

- Come mostrato in figura 1A e 1B il foglio aramidico è prodotto con le normali tecniche cartiere comprendenti disintegrazione, pigiatura-battitura, cartificazione ed essiccazione usando gli apparati convenzionali.
- Primo la polpa para-aramidica 2, le fibre para-aramidiche 3 ed il legante 4 sono introdotte in una cisterna contenente acqua o una soluzione acquosa di sostanze organiche. Gli ingredienti sono mescolati, dispersi, mixati e disintegrati.
- Il liquido mixato di polpa para-aramidica 2, di fibre para-aramidiche 3 e di legante 4 viene separato mediante un foglio di separazione, come un filtro, in una parte solida costituente il foglio aramidico 1 e la parte liquida.
- In FIG. 1A il foglio di separazione è sotto forma di nastro inclinato verso l'alto. Il foglio di separazione 7 muove dal basso verso l'alto la miscela, dove le parti solide sono assorbite dal foglio 7 mentre la parte liquida passa attraverso al foglio.
- La parte solida 8, ancora bagnata, viene asciugata mediante una stampo a vuoto e poi viene avvolta attorno ad un tamburo riscaldato ad una temperatura tra i 100 e i 150°C in modo da eliminare l'umidità residua.

○ **Calandratura**

- I fogli aramidici, prodotti come sopra, sono sottoposti a calandratura mediante il passaggio tra un paio di rulli riscaldanti, FIG 3C. mediante tale calandratura il legante si ammorbidisce, fonde e risolidifica incrementando la resistenza del foglio. Inoltre il foglio viene appiattito in un film estremamente sottile e liscio. In aggiunta le porosità prodotte sono adatte per ritenere la resina.
- Il processo di calandratura avviene con una forza lineare di $19.6 \cdot 10^4 \text{N/m}$ con dei rulli 5 riscaldati a 150°C o più. La pressione e la temperatura dipendono dalla composizione dei fogli aramidici e da altri fattori. Se la pressione è inferiore ai $19.6 \cdot 10^4 \text{N/m}$ la densità del foglio è ridotta ed il foglio non è adatto alla fabbricazione degli honeycomb. La pressione massima è di $39.2 \cdot 10^4 \text{N/m}$. la temperatura massima è 300°C.
- Come si vede in FIG. 2B la calandratura è effettivamente un modo per mantenere e creare porosità a pressioni relativamente basse e temperature relativamente basse. Le il volume delle porosità è tra il 20 e il 60% del volume totale.
- La porosità A viene calcolata nel seguente modo:
- $A = mM \cdot 100 \quad [\%]$
- Dove
- M = peso foglio esente da porosità = spessore foglio * area foglio * densità totale ingredienti (polpa+fibre+legante). La densità è calcolata seguendo i dettami del JIS P 8111 o ISO 187.
- m = peso foglio affetto da porosità.
- Quando la porosità è inferiore al 20% l'aggrappaggio della resina sulle pareti cellulari è insufficiente ed essa è soggetta a sfogliazione dalle pareti stesse. Se però la porosità eccede il 60% la resistenza viene meno.
- La porosità tra il 20 e il 60% dipende dalla composizione chimica, dalla pressione e dalla temperatura di calandratura.
- Esempio di impostazione della porosità:
- carta:
- composizione : 100 parti di polpa para-aramidica; 20 parti di legante di resina acrilica
- calandratura : pressione $19.6 \cdot 10^4 \text{N/m}$; temperatura 200°C; velocità di lavorazione 50-100m/min
- porosità risultante: dal 20 al 35%.

○

○

○

○

○

○

○

○ **Formazione degli honeycomb aramidici**

○ Gli honeycomb aramidici vengono formati, con fogli prodotti mediante calandratura e sottoposti a stabilizzazione delle porosità, mediante i passi 1) e 4) come illustrato nelle figure 3A ,3B ,3C , 4A .

○ Passo 1)

○ Passo dell'applicazione del film di adesivo, relativo alla figura 3A . Il film di adesivo 12 viene depositato in linee distanziate di un certo passo proporzionale all'esagono finale. L'applicazione dell'adesivo viene eseguita con la tecnica di stampa. L'adesivo può derivare da resine epossidiche, acriliche , fenoliche ed altre.

○ Le linee adesive 12 vengono stampate sul foglio 1 che viene svolto dal rullo 13 mediante i rulli rotanti (muniti di lame longitudinali) 15 e 14. Il rullo 14 pesca lo strato adesivo dalla tanica 16.

○ Passo 2)

○ Il foglio 1 viene tagliato in una lunghezza predeterminata e poi impilato. I fogli tagliati vengono impilati uno sopra l'altro sfasati in modo che l'unione dei fogli dia come risultato l'honeycomb voluto. I fogli vengono impilati in blocchi.

○ Passo 3)

○ Il blocco viene pressato e riscaldato fino a portare a fusione il legante e ottenere l'incollaggio dei fogli. Con il successivo raffreddamento si ottiene un blocco di fogli solidali lungo linee prestabilite.

○ Passo 4)

○ Il blocco di fogli aramidici solidali viene espanso in direzione dell'impilamento mediante la trazione in tale direzione FIG. 4A . le linee dotate di adesivo restano solidali, le zone libere da adesivo si stirano in direzione della tensione.

○ Il risultato di tali passi è una struttura honeycomb formata da una conformazione delle celle colonnare aventi le pareti cellulari comuni.

○ **Tattamento successivo**

○ L'honeycomb aramidico così ottenuto viene sottoposto a un trattamento durante il quale le pareti cellulari vengono ricoperte e in parte penetrate dalla resina di rinforzo. La resina di rinforzo penetra parzialmente nelle porosità in modo da rafforzare il legame con le pareti stesse. FIG. 4B e 4C.

○ La struttura dell'honeycomb formato 11 viene posta in una cisterna 20 contenente la resina di protezione 10. La resina di protezione , che può essere fenolica, epossidica o altro è diluita in soluzione col solvente in una percentuale tra il 15 e il 70% in peso.

○ La resina 10 aderisce alle pareti cellulari 18 e penetra all'interno delle porosità 9. Dopo l'impregnazione l'honeycomb 11 viene prelevato dalla cisterna e messo in un forno per l'essiccazione dove il solvente viene rimosso e la resina solidifica.

○ La resina riempie dal 50 al 100% del volume delle porosità.

○ **Honeycomb aramidici**

○ [...]. Le pareti cellulari hanno solitamente sezione esagonale ma possono avere anche altre forme.

- Gli honeycomb aramidici ed i pannelli che essi compongono sono caratterizzati da ottimo rapporto resistenza/peso, e hanno molta più rigidità di altri pannelli omologhi. Inoltre essi hanno ottima resistenza al fuoco e proprietà di isolamento acustico.

-
-
-
-

○ **Funzione ed effetti**

- [...]. Gli honeycomb vengono testati secondo la normativa MIL-STD-401 ed i risultati mostrano un'eccellente resistenza.

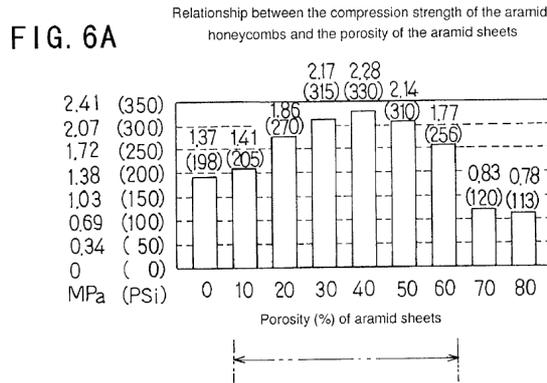
-

○ Prova	○ Valore minimo	○ Valore massimo
○ Resistenza a compressione stabilizzata	○ 21.6 kPa	○ 137.9 kPa
○ Resistenza al taglio specifica direzione L	○ 12.9 kPa	○ 73.3 kPa
○ Resistenza al taglio specifica direzione W	○ 6.4 kPa	○ 38.8 kPa
○ Modulo elastico direzione L mediante plate shear test	○ 863 kPa	○ 5169 kPa
○ Modulo elastico direzione W mediante plate shear test	○ 431 kPa	○ 2588 kPa

-

○ **Resistenza degli honeycomb**

- FIG 6A) grafico che rappresenta la resistenza a compressione di un honeycomb aramidico e la sua variazione al variare della porosità.



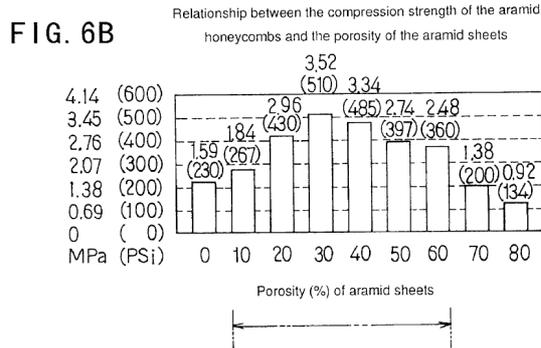
- Composizione honeycomb in esame: 100 parti di polpa para-aramidica, 15 parti di legante di resina acrilica, resina di rinforzo miscela fenolo-metanolo al 40%, viscosità della resina di rinforzo 360 mPa*s.

-
-
-
-

-
-
-

○ FIG 6B) grafico che rappresenta la resistenza a compressione di un honeycomb aramidico e la sua variazione al variare della porosità.

○ Composizione honeycomb in esame: 60 parti di polpa para-aramidica, 40 parti di fibra, 15 parti di legante di resina acrilica, resina di rinforzo miscela fenolo-metanolo al 40%, viscosità della resina di rinforzo 360 mPa*s.

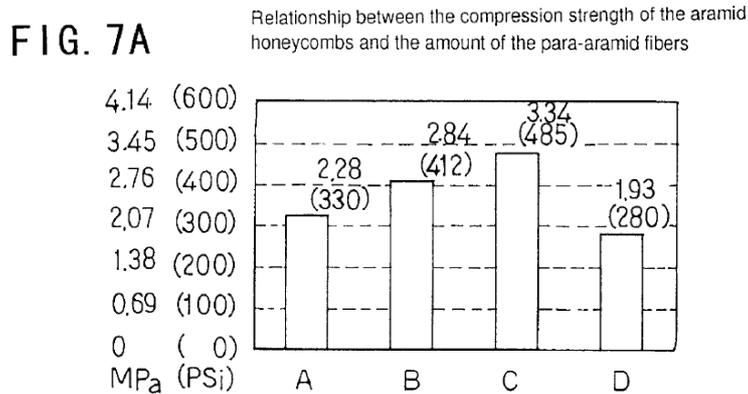


-

-

○ FIG. 7A) - 7C) grafici che rappresentano la resistenza a compressione di un honeycomb aramidico e la sua variazione al variare della quantità di fibra contenuta nei fogli aramidici.

-

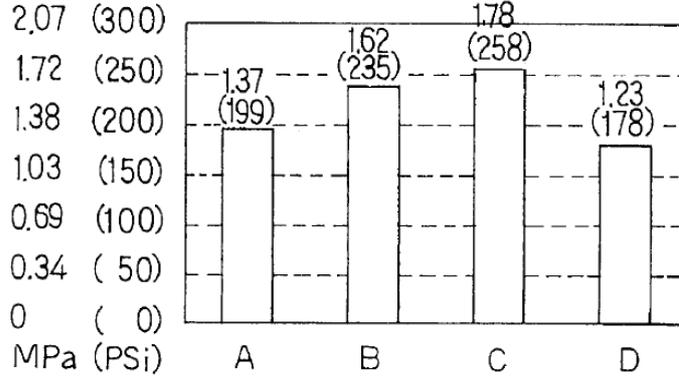


-
-
-
-
-
-
-

-
-

FIG. 7C

Relationship between the shear strength (L direction) of the aramid honeycombs and the amount of the para-aramid fibers



-

- Tipo A) B) C) honeycomb prodotti mediante la procedura di questo brevetto;
- Tipo D) honeycomb prodotti in modo tradizionale;
- Elementi comuni ai Tipo A) B) C): porosità al 40%, resina di rinforzo miscela in soluzione fenolo/metanolo con contenuto solido al 40%, avente viscosità di 360 mPa*s
- Elementi differenzianti Tipo A) B) C)

	○ Contenuto di polpa meta-aramidica	○ Contenuto di fibre
○ Ti	○ 100	○ 0
○ Ti	○ 80	○ 20
○ Ti	○ 60	○ 40

-

- Tipo D) contenuto: 60 parti di fibra para-aramidica, 40 di fibre meta-aramidiche con la funzione di legante.

-

- Dai grafici sopra risulta evidente le maggiori prestazioni dell'honeycomb prodotto mediante la procedura espressa sopra rispetto all'honeycomb prodotto con metodi tradizionali.

-

○ **Riassunto dei vantaggi tecnici di questo brevetto rispetto alla produzione tradizionale**

1. Ottima precisione dei fogli prodotti, con conseguente possibilità di produzione automatizzata;
2. Maggiore resistenza dei fogli aramidici;
3. Migliore aderenza della resina di protezione alle pareti cellulari, non sussiste più il pericolo di sfogliazione della resina dalle pareti cellulari;

4. Dato che la polpa meta-aramidica non è stettamente necessaria è possibile ridurre o eliminare la sua presenza dalla produzione, dato che essa ha costo elevato. La polpa meta-aramidica è invece necessaria nel procedimento tradizionale;

5. Incremento della resistenza a schiacciamento, rottura a schiacciamento e rottura a taglio a parità di densità rispetto a honeycomb tradizionali, è quindi possibile ridurre la densità.

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

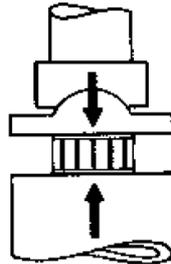
○

○ Secondo normativa invece la tolleranza sulle dimensioni e sul peso deve stare all'interno dello 0.5%. Lo spessore del pannello viene misurato con un accuratezza del 0.001 inch, ovvero del 0.0254mm, in accordo con la normativa ASTM C366 metodo B.

○

○ **Resistenza alla compressione stabilizzata o resistenza alla compressione trasversalmente al piano (ASTM C365-94)**

○ La resistenza a compressione stabilizzata rappresenta la resistenza ultima a compressione dell' honeycomb caricato in direzione T o 3, come indicato nell'analisi meccanica.



○ Per resistenza alla compressione stabilizzata si intende che l'honeycomb in prova è dotato lamine superficiali rese solidali con l'honeycomb, ovvero il test di compressione viene eseguito sul pannello sandwich completo, non solo sull'honeycomb. Naturalmente tali lamine superficiali stabilizzano l'honeycomb, ecco il perchè del nome.

○ Solitamente l'honeycomb viene stabilizzato mediante due lamine di alluminio (solitamente lega 5052, spessore 0.8mm)

○ Il provino sottoposto a test ha dimensioni normate di :

○

○	○ Honey in Al		○ Honey altro	
	○ l	○ m	○ l	○ M
○ L - 1	○ 3	○ 7	○ 3	○ 7
○ W - 2	○ 3	○ 7	○ 3	○ 7
○ T - 3	○ 0	○ 1	○ 0	○ 1

○

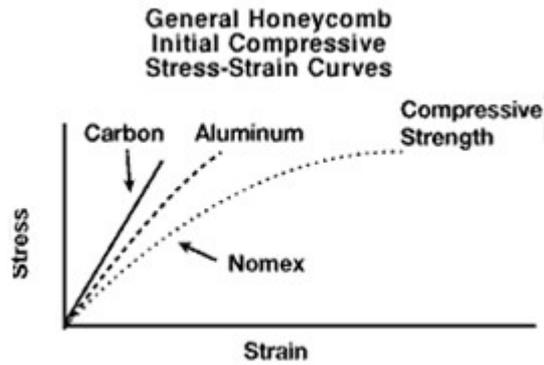
○

○ Le dimensioni notevoli del provino hanno lo scopo di ridurre l'incidenza di eventuali imperfezioni presenti nel pannello stesso.

○ Il carico di compressione viene incrementato fino a che si incorre nel cedimento nel materiale. Il carico di compressione ha una velocità di incremento di 25 kg al secondo partendo da un carico base di 12 kg/cella fino ad un massimo di 2400 kg/cella.

○

○



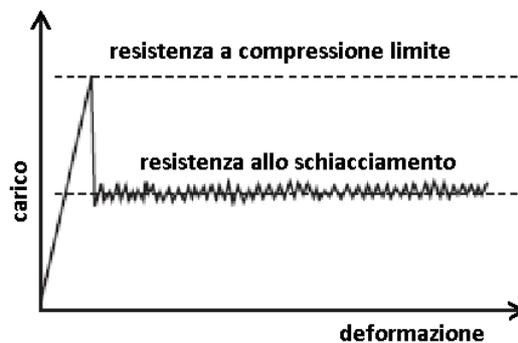
- Il modulo di elasticità longitudinale, a compressione stabilizzata, del pannello è ovviamente proporzionale alla pendenza della curva nel tratto iniziale lineare elastico.
- Alcuni materiali esibiscono un grafico sforzo-deformazione lineare, altri non lineari.
- Ciò posso supporre che derivino dalle modalità di deformazione dell'honeycomb stesso, ovvero per i materiali che presentano caratteristica lineare la deformazione sia legata soprattutto alla deformazione del materiale stesso, non al cambiamento di geometria del pannello, mentre per i materiali aventi caratteristica non lineare la deformazione è frutto della combinazione della deformazione a livello microscopico, ovvero alla deformazione del materiale, ed alla deformazione a livello macroscopico, ovvero al cambiamento di geometria delle celle durante la prova. Si può affermare ancora che i pannelli aventi caratteristica purmente lineare abbiano caratteristica elastica, ovvero che alla cessazione della sollecitazione il pannello torni alle geometrie originali (cioè grazie al fatto che non si hanno cambiamenti geometrici del materiale), mentre per caratteristiche non lineari il comportamento è elasto-plastico, ovvero a meno del primo tratto elastico iniziale, quando si entra in campo plastico la cessazione del carico non comporta il ritorno alle geometrie iniziali, bensì il pannello conserva le geometrie acquisite.
- Altro aspetto legato a tale test è la deformazione ultima a rottura e l'assorbimento di energia: maggiore è la deformazione e maggiore è l'area sottostante la curva, maggiore sarà la deformazione e l'energia assorbita durante la sollecitazione.

-
-
-

○ Resistenza allo schiacciamento

-
- Dopo che il materiale ha cominciato a cedere, se la sollecitazione di compressione continua ad esercitarsi il materiale continua a deformarsi plasticamente e a "frantumarsi". Una tipica curva che descrive lo schiacciamento di un pannello sandwich è la seguente:

-



-

- I materiali aventi nel grafico la zona di resistenza allo schiacciamento lineare sono i materiali ideali per applicazioni in cui la capacità di assorbimento degli urti sia fondamentale.
- La resistenza allo schiacciamento e l'energia assorbita durante lo schiacciamento dipende dal materiale di cui è composto il core e dalla densità del core stesso: maggiore è la densità del pannello maggiore è la resistenza allo schiacciamento e maggiore sarà l'assorbimento ultimo di energia.
- Quando il materiale viene usato con lo scopo di assorbimento urti esso viene spesso pre-schiacciato, in modo tale da rimuovere il picco nella curva sforzo-deformazione (infatti l'energia cinetica acquisita dalla massa deve essere dissipata in modo controllato, non impulsivamente, in modo da far decrescere la decelerazione a cui viene sottoposto il meccanismo in esame. Per fare un parallelo automobilistico è noto che una decelerazione pari a 17 m/s^2 è sufficiente a far distaccare il cervello dalle sue connessioni nervose alla scatola cranica. Se l'energia non viene assorbita dalla carrozzeria viene assorbita dal suo occupante, con devastanti effetti traumatici).
- La resistenza allo schiacciamento e l'assorbimento di energia decresce con lo spostarsi dell'angolo di impatto dalla direzione ortogonale al pannello, ciò perché l'inclinazione differente dai 90° del carico provoca momento flettente sulle pareti cellulari e ciò comporta una minor resistenza.
- Se i dati forniti derivano da prove cosiddette statiche, ovvero eseguite in un periodo di tempo e non in modo impulsivo, per gli usi dinamici o impulsivi i dati possono essere incrementati del 30%.

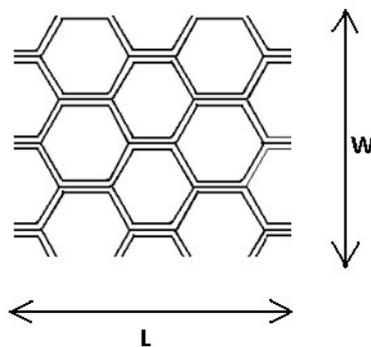
○

○

○ Resistenza al taglio in direzione L e W (1 e 2)

○ Plate Shear Test Method

- Il test per la resistenza a trazione più diffusamente usato è il Plate Shear Test Method
- In tale test la resistenza al taglio viene eseguita semplicemente sottoponendo a trazione le due lamine solidali con l'honeycomb nella stessa direzione ma con verso opposto. La resistenza al taglio è diversa a seconda della direzione lungo cui viene sollecitato il pannello e macroscopicamente si può dire che la resistenza in direzione L è maggiore della resistenza in direzione W



- Tale fatto è dovuto ovviamente alla geometria della cella stessa: in direzione L il materiale è presente a maggior distanza dal baricentro della cella rispetto alle pareti in direzione W, e dato che l'azione macroscopica di trazione si trasforma in un'azione microscopica di momento flettente a maggior distanza corrisponde un maggior momento resistente a parità di sforzo resistente; inoltre la geometria delle celle in direzione L compiono un'azione antisbandamento maggiormente efficace che in direzione W, ciò è dovuto al fatto che le pareti sono parallele alla direzione di applicazione del carico, mentre in direzione W non vi è alcuna parete parallela.

○

○

○

Tensile Plate Shear



Nel Plate Shear Test Method vi sono due piatti che vengono incollati alle facce dell'honeycomb e sottoposti a tiro. Ciò provoca una sollecitazione di taglio sul pannello (ma anche di flessione data la cospicua distanza tra i piatti).

Le dimensioni dei provini sono:

<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Honey in Al		<input type="radio"/> Honey altro	
	<input type="radio"/> l	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> l	<input type="radio"/> M
<input type="radio"/> L - 1	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 1
<input type="radio"/> W - 2	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 5
<input type="radio"/> T - 3	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 1

La velocità di spostamento dei due piatti, e quindi di incremento della sollecitazione di taglio, è di 2 inch al minuto, ovvero di 0.8767mm/sec.

- Dato che alcuni materiali non hanno una curva di taglio con inizio lineare (ricordo, il modulo di resistenza a taglio G è proporzionale alla tangente alla curva nel tratto iniziale), il modulo di taglio viene calcolato normalmente dalla forma iniziale della curva.

-

- Per honeycomb di densità elevata, pari o maggiore ai 8pfc (libbre per piede), e quindi 5.8512 kg/m^2 alcune volte non si giunge a rottura per taglio mediante tale metodo perché si raggiungono legami adesivi molto forti tra il core ed i piatti di test. In questi casi i dati raggiunti mediante tale metodo non sono affidabili.

-

- È però disponibile anche un altro metodo di test

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

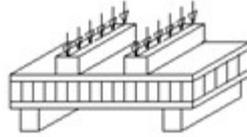
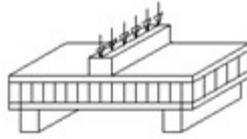
- **Beam-Flexure Test Method**

-

- Sebbene il plate shear sia il metodo preferito per ricavare la resistenza al taglio degli honeycomb ed il modulo risultante, il Beam-Flexure viene spesso usato per valutare le performance globali del pannello. È una prova quasi per esperienza, più che sperimentale vera e propria. I risultati di tale prova dipendono dalle lamine superficiali, dallo spessore di tali lamine e dalle condizioni di carico.

- Esistono molti tipi di prove secondo il beam flexure test method, a seconda della condizione di carico (che possono essere infinite).

-

Beam Flexure

○

○ Dimensioni provino:

○ $L = 8'' = 203.2 \text{ mm}$ ○ $W = 3'' = 76.2 \text{ mm}$

○

○ Distanza tra i supporti = $6'' = 152.4 \text{ mm}$

○

○ Distanza tra i supporti e i punti di applicazione del carico = $1/3$ della campata

○

○ Per maggiori dettagli bisogna consultare la norma ASTM C393.

○

○ Bisogna sottolineare che il risultato del beam-flexure può essere considerato un test per le lamine superficiali, per lo strato adesivo e per il core che agiscono nelle strutture sandwich.

○

○

○ È possibile ricondurre i risultati del test Beam-Flexure ai risultati del test Plate-Shear.

○

○

○

○ **Resistenza a trazione**

○

○ Per rilevare la resistenza a trazione si usa il Flatwise Tensile Method, il quale rileva la resistenza del legame tra lamina ed honeycomb e la resistenza a trazione dell'honeycomb stesso in direzione ortogonale al piano dell'honeycomb (direzione 3 o Z).

○

○ Tale test viene spesso utilizzato per determinare le condizioni di incollaggio delle lamine.

○

○ Per maggiori dettagli bisogna consultare la norma ASTM C297.

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ **16 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI HONEYCOMB IN NOMEX**

○

○ **Tavole delle proprietà meccaniche degli honeycomb in Nomex**

○

○ Le principali misure che vengono effettuate sugli honeycomb sono:

- Resistenza a compressione;
- Resistenza a compressione stabilizzata e modulo;
- Resistenza allo schiacciamento;
- Resistenza al taglio in direzione L e W (risp 1 e 2) ed i relativi moduli.

○

○ Di seguito vi sono le tavole dei principali produttori di honeycomb riferiti specificamente agli honeycomb composti di fibra aramidica quale il Nomex ed avente come resina di rinforzo dei fogli la resina fenolica.

○

○ Bisogna fare delle precisazioni:

- Le resistenze elencate sono quelle garantite dai costruttori, non quelle medie;
- I dati forniti dai costruttori sono in psi, le ho convertiti io in Mpa;
- La sollecitazione di taglio è stata creata mediante il shear plate test;
- Per materiale stabilizzato si intende il core solidale con due lamine in alluminio, serie 5000, di spessore 2mm;

○

○ Premessa: dopo aver esaminato i prodotti dei maggiori produttori è stato riscontrato un dominio quasi totale della forma esagonale normale, con presenza anche della forma sovraespansa, e l'assenza totale di altre forme. Ciò ci può spiegare con il fatto che la forma sovraespansa viene prodotta con le stesse procedure della forma esagonale normale, la sola differenza è nello stiramento finale che avviene in modo più intensivo. Le altre forme invece necessitano di processi differenti in larga parte dai processi usuali.

○

○ Sono stati analizzati honeycomb in fibra aramidica e honeycomb esclusivamente in NOMEX[®], e successivamente sono state confrontate le loro caratteristiche di resistenza strutturale e di altra natura.

○

○ 1° PRODOTTO IN ESAME

○

○ materiale base: carta aramidica	○ Tipologia celle: esagonale	○ Produttore: Hexcel composites	○ Tipologia prodotti: commerciale
--	-------------------------------------	--	--

○ Designazione	○ de	○ Sollecitazione di compressione	○ Sollecitazione di taglio direzione L	○ Sollecitazione di taglio direzione W
-----------------------	------	----------------------------------	--	--

○ Mat dim celle [in]	○	○ R e s i s t e n z a m a t e r i a l e s c o p e r t o	○ R e s i s t e n z a m a t e r i a l e s t a b i l i z z a t o	○ Mo	○ R e s i s t e n z a	○ mo	○ R e s i s t e n z a	○ mo
-------------------------------	---	---	---	------	--	------	--	------

○ U.M	○ kg	○ M p a	○ M p a	○ Mp	○ M P a	○ MP	○ M P a	○ Mp
○ HRH-10 1/16	○ 54	○ 1. 1 0 2	○ 1. 1 7 1	○ 13	○ . 8 6 1	○ 41.	○ . 4 4 8	○ 19.
○ HRH-10 1/8	○ 28	○ . 5 8 6	○ . 6 5 5	○ 55.	○ . 5 1 7	○ 26	○ . 2 7 6	○ 10.
○ HRH-10 1/8	○ 48	○ 1. 6 1 9	○ 1. 8 6 0	○ 13	○ 1. 0 6 8	○ 44	○ . 5 8 6	○ 24.
○ HRH-10 1/8	○ 64	○ . 7 5 6	○ . 2 3 8 9	○ 19	○ 1. 5 5 0	○ 59	○ . 7 9 2	○ 32.
○ HRH-10 1/8	○ 80	○ . 8 5 9	○ . 2 7 2	○ 25	○ 1. 8 9 5	○ 70	○ 1. 0 3 4	○ 37.
○ HRH-10 3/16	○ 24	○ . 4 8 2	○ . 5 5 1	○ 41.	○ . 3 4 5	○ 20	○ . 9 3	○ 11.
○ HRH-10 3/16	○ 28	○ . 6 5 5	○ . 7 2 3	○ 55.	○ . 5 1 7	○ 26	○ . 2 7 6	○ 13.
○ HRH-10 3/16	○ 32	○ . 7 5 8	○ . 8 9 6	○ 75.	○ . 5 5 1	○ 29	○ . 3 1 0	○ 14.
○ HRH-10 3/16	○ 48	○ 1. 6 1 9	○ 1. 8 6 0	○ 13	○ 0 .9 6 5	○ 44	○ 0 .5 9 6	○ 23.
○ HRH-10 1/4	○ 24	○ . 4 4	○ . 5 1	○ 41.	○ . 3 7	○ 20	○ . 7 2	○ 8.0

<input type="radio"/>	HRH-10 ¼	<input type="radio"/>							
	32	0	0	0	75.	0	28	0	13.
		6	7	5		5		2	
		8	2	5		5		4	
		9	3	1		1		8	
<input type="radio"/>	HRH-10 ¼	<input type="radio"/>							
	49	1.	1.	14	1	44	0	20.	
		6	8	0	1	5	0		
		5	2	2	0	1	5		
		4	6	2	2	7	1		
<input type="radio"/>	HRH-10 ¼	<input type="radio"/>							
	64	2	2	19	4	55	0	24.	
		.	.		1		.		
		4	6		2		6		
		8	8		2		8		
		0	7				9		
<input type="radio"/>	HRH-10 3/8	<input type="radio"/>							
	24	0	0	41.	0	20	0	10.	
			
		5	5		3		0		
		1	5		7		1		
		7	1		9		0		
<input type="radio"/>	HRH-10 3/8	<input type="radio"/>							
	32	0	0	75.	0	25	0	16.	
			
		7	8		4		0		
		9	6		9		1		
		2	1		6		7		
<input type="radio"/>	HRH-10 3/8	<input type="radio"/>							
	48	1.	1.	117	1.	44	0	20.	
		4	5		7		.		
		4	5		9		0		
		7	0		1		2		
<input type="radio"/>	HRH-10 ¾	<input type="radio"/>							
	24	0	0	117	0	23	0	11.	
			
		3	3		9		0		
		4	7		3		1		
		5	9		7		2		

CARATTERISTICHE PARTICOLARI PRODOTTO:

carta aramidica, quindi presenza di fibre para-aramidiche (Kevlar) e meta-aramidiche(Nomex)

2° PRODOTTO IN ESAME:

<input type="radio"/>	materiale base: carta Nomex	<input type="radio"/>	Tipologia celle: esagonale	<input type="radio"/>	Produttore: Hexcel composites	<input type="radio"/>	Tipologia prodotti: commercial e
<input type="radio"/>	Designazione	<input type="radio"/>	Sollecitazione di compressione	<input type="radio"/>	Sollecitazione di taglio direzione L	<input type="radio"/>	Sollecitazione di taglio direzione W
<input type="radio"/>	Mat	<input type="radio"/>	R e	<input type="radio"/>	R e Mo	<input type="radio"/>	R e Mo

dim
celle
[in]

si
st
e
n
z
a
m
at
er
ia
le
s
c
o
p
er
to

si
st
e
n
z
a
m
at
er
ia
le
st
a
bi
liz
z
at
o

si
st
e
n
z
a

si
st
e
n
z
a

○ U.M	○ kg	○ M p a	○ M p a	○ Mp	○ M P a	○ Mp	○ M P a	○ Mp
○ HRH-78 1/8	48	○ 1. 9 3 2	○ 2 .1 7 0	○ 12	○ 1. 1 0 2	○ 36	○ 0 .6 2 0	○ 21.
○ HRH-78 1/8	12	○ 11 .0 4	○ 1 2 .0 5 8	○ 41	○ 3 .2 3 8	○ 10	○ 1. 7 2 2	○ 53.
○ HRH-78 3/16	48	○ 1. 8 6 3	○ 2 .3 3 6	○ 12	○ 0 .8 5 4	○ 31.	○ 0 .5 5 8	○ 24.
○ HRH-78 3/16	96	○ 7 .7 6 4	○ 8 .2 6 8	○ --	○ 3 .1 0 1	○ 89	○ 1. 6 1 9	○ 37.
○ HRH-78 1/4	48	○ 1. 8 2 9	○ 1. 9 6 4	○ 13	○ 0 .8 2 7	○ 31.	○ 0 .5 5 1	○ 20.
○ HRH-78 3/8	24	○ 0 .5 8 7	○ 0 .6 5 5	○ 41.	○ 0 .4 1 3	○ 17.	○ 0 .2 2 7	○ 10.

○

○ CARATTERISTICHE PARTICOLARI PRODOTTO:

○

○ carta composta da fibre meta-aramidiche, ovvero Nomex

○

○

○

○

○

-
-
-
-
-
- 3°PRODOTTO IN ESAME
-

<input type="radio"/> materiale base: Nomex	<input type="radio"/> Tipologia celle: null:esagonale; OX:sovraespansa	<input type="radio"/> Produttore: Amber Composites	<input type="radio"/> Tipologia prodotti: commerciale
--	---	---	--

<input type="radio"/> Designazione	<input type="radio"/> de	<input type="radio"/> Sollecitazione di	<input type="radio"/> compressione	<input type="radio"/> Sollecitazione di	<input type="radio"/> taglio	<input type="radio"/> direzione	<input type="radio"/> Sollecitazione di	<input type="radio"/> taglio	<input type="radio"/> direzione
<input type="radio"/> Mat dim celle[m]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> M _o	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> m _o	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> m _o
<input type="radio"/> U.M	<input type="radio"/> kg	<input type="radio"/> M _p	<input type="radio"/> M _P	<input type="radio"/> M _p	<input type="radio"/> M _P	<input type="radio"/> M _P	<input type="radio"/> M _P	<input type="radio"/> M _P	<input type="radio"/> M _p
<input type="radio"/> ANC 3,2	<input type="radio"/> 48	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 13	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/> 40	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> ANC 4,8	<input type="radio"/> 32	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/> 75	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 29	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 19	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> ANC 4,8	<input type="radio"/> 48	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 14	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/> 40	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> ANC 4,8 OX	<input type="radio"/> 48	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 12	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 20	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 35	<input type="radio"/>

-
- CARATTERISTICHE PARTICOLARI PRODOTTO:
-

- tolleranze spessore:
- da 1,5mm a 100mm:±0,125mm
- da 100mm in poi:±0,250mm
-
- tolleranze densità: ±10%
-
- adatto a usi fino a massimo 180°C
-
-
-
-
-
-
-
-
-
- 4°PRODOTTO IN ESAME
-

<input type="radio"/> materiale base: Nomex	<input type="radio"/> Tipologia celle: null:esagonale; OX:sovraespansa	<input type="radio"/> Produttore: Amber Composites				<input type="radio"/> Tipologia prodotti: aereospaziale					
<input type="radio"/> Designazione	<input type="radio"/> de	<input type="radio"/> Sollecitazione di	<input type="radio"/> compressione			<input type="radio"/> Sollecitazione di	<input type="radio"/> taglio direzione		<input type="radio"/> Sollecitazione di	<input type="radio"/> taglio direzione	
<input type="radio"/> Mat dim celle[m m]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> Mo	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> mo	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> mo	<input type="radio"/> R	<input type="radio"/> mo	
<input type="radio"/> U.M	<input type="radio"/> kg	<input type="radio"/> M	<input type="radio"/> M	<input type="radio"/> Mp	<input type="radio"/> M	<input type="radio"/> MP	<input type="radio"/> M	<input type="radio"/> MP	<input type="radio"/> M	<input type="radio"/> Mp	
<input type="radio"/> ANA 3,2	<input type="radio"/> 29	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 60	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 17	
			<input type="radio"/> 9	<input type="radio"/> 0		<input type="radio"/> 5			<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 5	

<input type="radio"/>	ANA 3,2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	0	<input type="radio"/>
		48			.	13		2	40		.	25
					4			5			7	
					0						3	
<input type="radio"/>	ANA 3,2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1.	<input type="radio"/>
		64			.	19		.	63		0	35
					9			0			0	
					0			0				

CARATTERISTICHE PARTICOLARI PRODOTTO:

tolleranze spessore:

da 1,5mm a 100mm: $\pm 0,125$ mm

da 100mm in poi: $\pm 0,250$ mm

tolleranze densità : $\pm 10\%$

Adatto a usi a temperatura superiore ai 180°C

5°PRODOTTO IN ESAME

<input type="radio"/>	materiale base:	<input type="radio"/>	Tipologia celle:	<input type="radio"/>	Produttore:	<input type="radio"/>	Tipologia prodotti:
	Nomex		esagonale		CML		commerciale
							e

<input type="radio"/>	Designazione	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Sollecitazione di	compressione	<input type="radio"/>	Sollecitazione di	direzione	<input type="radio"/>	Sollecitazione di	direzione
		de				L			W		
			<input type="radio"/>	R	<input type="radio"/>	R	<input type="radio"/>	R	<input type="radio"/>	R	<input type="radio"/>
				e		Mo		mo		mo	
				si							
				st							
				e							
				n							
				z							
				a							

mat
er
ia
le
s
c
o
p
er
to

mat
er
ia
le
st
a
bi
liz
z
at
o

U.M	kg	Mpa	MPa	Mp	Mpa	MP	Mpa	Mpa	Mp
3,2 40	-	26	1. 7 4			1. 3 4	13	0 .7 4	48
3,2 48	-	26	2. .6 7			1. 9 5	13	0 .9 3	59
3,2 64	-	26	3. .8 4			2. .4 8	13	1. 4 3	67
3,2 96	-	35	8. .8 2			3. .1 1	19	2 .2 3	96
4,0 72	-	35	5. .2 3			2. .6	14	1. 9	88
4,0 96	-	52	8. .3			4. .4 5	22	2 .8 3	119
4,8 28	-	26	0. 9 4			0. 7 2	72	0 .4 6	36
4,8 32	-	26	0. 9 8			0. 8 4	80	0 .5 2	39
4,8 37	-	26	1. 4 5			1. 2 8	89	0 .6 3	41
4,8 48	-	35	2. .2			1. 6 3	114	0 .9 1	59
9,6 40	-	35	1. 1 4			1. 1 9	82	0 .7 5	43

○

○

○ CARATTERISTICHE PARTICOLARI PRODOTTO:

○

○

	4120	12	.	.	.	89	3	44.
	1/8		5	6	7		7	
			7	1	5		8	
			9	3	6			
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/8	14	.	.	.	10	1.	55.
			6	0	9		6	
			4	2	2		5	
			6	4	8		4	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/16	24	.	.	.	20	.	11.
			5	5	4		2	
			1	8	1		2	
			7	6	3		0	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/16	32	.	.	.	29	.	13.
			6	7	4		2	
			2	2	9		7	
			0	7	6		6	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/16	48	1.	1.	.	31.	.	17.
			2	8	9		4	
			4	6	6		6	
			0	0	5		2	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/16	64	.	.	5	48	.	26.
			2	2	5		7	
			0	3	0		7	
			5	8			2	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/16	96	3	4	.	89	1.	31
			.	.	4		3	
			9	4	4		7	
			9	7	8		8	
			6	9	0			
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/4	24	.	.	.	14.	.1	8.9
			3	3	3		5	
			1	7	1		8	
			0	2				
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/4	32	.	.	.	15.	.	12.
			5	7	4		2	
			5	2	9		6	
			1	3	6		2	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/4	48	1.	1.	.	31.	.	17.
			1	5	8		4	
			0	5	7		4	
			2	0	5		1	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/4	49	1.	1.	.	38	.	20.
			2	6	9		5	
			4	5	3		1	
			9	4	0		7	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/4	64	.1	.	3	44	.	24.
			3	4	7		6	
			6	8	8		6	
				0			5	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	1/4	76	2	.1	5	50	.	27.
			2	0	5		9	
			0	1	0		6	
			5				5	
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/8	24	.	.	.	14.	.1	6.8
			3	3	3		5	
			1	7	1		8	
			0	9	0			
○	AHN	○	○	○	○	○	○	○
	4120	○	○	○	○	○	○	○
	3/8	32	.	.	.	15.	.	8.9
			5	7	4		2	

			5	2		9		4	
			1	3		6		8	
<input type="radio"/>	AHN	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>
	4120	48	2	4		.	26	.	17.
	3/8		0	4		7		3	
			6	7		5		7	
						8		9	
<input type="radio"/>	AHN	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>
	4120	28	.	.		.	10.	.	15.
	3/16		4	5		3		8	
	OX		8	1		1		8	
			2	7		0		9	
<input type="radio"/>	AHN	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/> 1.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>
	4120	48	5	9		.	15.	.	31
	3/16		8	2		4		6	
	OX		5	9		9		2	
						6		0	
<input type="radio"/>	AHN	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0	<input type="radio"/>
	4120	64	.	.		.	29	.	55.
	3/16		4	7		7		8	
	OX		4	9		9		9	
			5	0		2		6	

*Typ: modulo di resistenza medio, rilevato sui pannelli. Valore non garantito

	3,2			5			5		2	
				4			2		8	
○	ECA		○	○	1.	○	○	1.	○	○
	3,2		48		9		1	38		24
					0		6		6	
									2	
○	ECA		○	○	3	○	○	1.	○	○
	3,2		64		.		4	50		30
					7		8		.	
					0				8	
									2	
○	ECA		○	○	3	○	○	1.	○	○
	3,2		64		.1		6	60		38
					0		0		.	
									9	
									4	
○	ECA		○	○	4	○	○	1.	○	○
	3,2		80		.		9	68		38
					7		5		0	
					0				5	
○	ECA		○	○	6	○	○	2	○	1.
	3,2		96		.		.	86		56
					6		4		4	
					0		5		2	
○	ECA		○	○	1	○	○	2	○	1.
	3,2		12		0		.	98		71
					.		9		7	
					0		0		6	
					0					
○	ECA		○	○	11	○	○	2	○	1.
	3,2		12		.		.	10		74
					3		9		7	
					0		5		8	
○	ECA		○	○	1	○	○	3	○	1.
	3,2		14		3		.	110		80
					.		0		9	
					2		5		0	
					0					
○	ECA		○	○	2	○	○	3	○	2
	3,2		20		3		.	12		84
					.		6		.	
					0		0		2	
					0				0	
○	ECA		○	○	0	○	○	0	○	0
	4,0		29		.		.	18		11
					6		4		.	
					0		5		2	
									6	
○	ECA		○	○	2	○	○	1.	○	○
	4,0		48		.		0	34		22
					2		6		.	
					6				5	
									6	
○	ECA		○	○	3	○	○	1.	○	○
	4,0		64		.		4	48		30
					9		4		.	
					0				8	
									0	
○	ECA		○	○	5	○	○	1.	○	○
	4,0		80		.1		9	66		36
					0		0		.	
									9	
									8	
○	ECA		○	○	9	○	○	3	○	1.
	4,0		12		.		.	110		58
					3		4		8	
					0		0		6	
○	ECA		○	○	1	○	○	3	○	1.
	4,0		12		0		.	115		60
					.		5		9	
					0		0		0	
○	ECA		○	○	1	○	○	3	○	2
	4,0		14		3		.	12		70
					.		6		.	
					0		0		0	
					0				0	

○ ECA 4,8	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 23	○ 0	○ 16
		.9	.0	.5	.8	.23	.3	.6	
○ ECA 4,8	○ 48	○ 2	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 34	○ 0	○ 22
		.6	.0	.9	.8	.34	.5	.6	
○ ECA 4,8	○ 64	○ 3	○ 0	○ 1.	○ 7	○ 52	○ 0	○ 34	
		.4	.0	.7	.0	.52	.9	.2	
○ ECA 4,8	○ 96	○ 8	○ 0	○ 2	○ 2	○ 78	○ 1.	○ 46	
		.4	.0	.2	.6	.78	.3	.2	
○ ECA 4,8	○ 96	○ 7	○ 0	○ 2	○ 2	○ 88	○ 1.	○ 56	
		.3	.0	.5	.2	.88	.4	.4	
○ ECA 4,8	○ 12	○ 9	○ 0	○ 3	○ 3	○ 110	○ 1.	○ 58	
		.3	.0	.4	.0	.110	.8	.6	
○ ECA 6,4	○ 24	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 14	○ 0	○ 11	
		.5	.4	.3	.4	.14	.1	.8	
○ ECA 6,4	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 22	○ 0	○ 12	
		.8	.0	.5	.4	.22	.3	.0	
○ ECA 6,4	○ 50	○ 2	○ 0	○ 1.	○ 0	○ 30	○ 0	○ 20	
		.1	.5	.0	.0	.30	.5	.6	
○ ECA 6,4	○ 64	○ 3	○ 0	○ 1.	○ 5	○ 54	○ 0	○ 32	
		.4	.0	.4	.9	.54	.7	.9	
○ ECA 9,6	○ 24	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 13	○ 0	○ 9	
		.5	.2	.3	.2	.13	.1	.6	
○ ECA 9,6	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 18	○ 0	○ 11	
		.6	.8	.5	.6	.18	.2	.9	
○ ECA 9,6	○ 48	○ 1.	○ 0	○ 1.	○ 1	○ 30	○ 0	○ 20	
		.8	.0	.5	.6	.30	.6	.6	
○ ECA 12,8	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 16	○ 0	○ 9	
		.7	.5	.4	.6	.16	.2	.6	
○ ECA 12,8	○ 64	○ 2	○ 0	○ 1.	○ 6	○ 52	○ 0	○ 26	
		.8	.0	.6	.0	.52	.8	.8	
○ ECA 19,2	○ 24	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 11	○ 0	○ 9	
		.5	.0	.5	.0	.11	.2	.2	
○ ECA 19,2	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 18	○ 0	○ 14	
		.7	.0	.6	.0	.18	.3	.2	
○ ECA 4,8 OX	○ 29	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 9	○ 0	○ 14	
		.6	.3	.9	.3	.9	.3	.14	

z
a
m
a
t
e
r
i
a
l
e
s
c
o
p
e
r
t
o

z
a
m
a
t
e
r
i
a
l
e
s
t
a
b
i
l
i
z
z
a
t
o

z
a

z
a

○ U.M	○ kg	○ M p a	○ M P a	○ Mp	○ M p a	○ Mp	○ M p a	○ Mp
○ ECA-I 3,2	48	○ 1. 9 0	○	○	○ 1. 1 6	○	○ 0 . 6 2	○
○ ECA-I 3,2	64	○ 3 .1 0	○	○	○ 1. 4 8	○	○ 0 . 8 2	○
○ ECA-I 3,2	80	○ 4 . 7 0	○	○	○ 1. 9 5	○	○ 1. 0 5	○
○ ECA-I 3,2	96	○ 6 . 6 0	○	○	○ 2 . 4 5	○	○ 1. 4 2	○
○ ECA-I 3,2	12	○ 11 . 3 0	○	○	○ 4 . 9 5	○	○ 1. 7 8	○
○ ECA-I 3,2	14	○ 1 3 . 2 0	○	○	○ 3 . 0 5	○	○ 1. 9 0	○
○ ECA-I 4,0	29	○ 0 . 6 0	○	○	○ 0 . 4 5	○	○ 0 . 2 6	○
○ ECA-I 4,0	80	○ 5 .1 0	○	○	○ 1. 9 0	○	○ 0 . 9 8	○
○ ECA-I 4,8	32	○ 0 . 9 0	○	○	○ 0 . 5 8	○	○ 0 . 3 6	○
○ ECA-I 4,8	48	○ 2 . 6 0	○	○	○ 0 . 9 8	○	○ 0 . 5 6	○
○ ECA-I 4,8	64	○ 3 . 4 0	○	○	○ 1. 7 0	○	○ 0 . 9 2	○
○ ECA-I 4,8	80	○ 6 . 0 0	○	○	○ 1. 9 5	○	○ 1. 1 0	○
○ ECA-I 4,8	96	○ 7 . 3 0	○	○	○ 2 . 2 6	○	○ 1. 3 2	○
○ ECA-I 6,4	24	○ 0 .	○	○	○ 0 .	○	○ 0 . 1	○

			5			3		8	
			4			4			
○ ECA-I 6,4	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.			.		.	
			8			5		3	
			0			4		0	
○ ECA-I 6,4	○ 48	○ 2	○ 0	○ 0	○ 1.	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		0			.	
			0		0			5	
			5					6	
○ ECA-I 6,4	○ 64	○ 3	○ 0	○ 0	○ 1.	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		5			.	
			4		4			7	
			0					9	
○ ECA-I 9,6	○ 24	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			5		3			.1	
			2		2			6	
○ ECA-I 9,6	○ 32	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			6		5			2	
			8		6			9	
○ ECA-I 9,6	○ 48	○ 1.	○ 0	○ 0	○ 1.	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			8		1			.	
			0		5			6	
								6	
○ ECA-I 4,8 OX	○ 29	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			6		3			3	
			0		1			2	
○ ECA-I 4,8 OX	○ 48	○ 2	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			3		6			7	
			0		0			2	
○ ECA-I 4,8 OX	○ 64	○ 3	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			8		7			9	
			0		2			0	
○ ECA-I 4,8 OX	○ 72	○ 4	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			0		7			9	
			0		5			2	
○ ECA-I 4,8 OX	○ 80	○ 5	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 1.	○ 0
			.		.			1	
			3		8			7	
			0		8				
○ ECA-I 4,8 OX	○ 96	○ 6	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 1.	○ 0
			.		.			2	
			7		9			8	
			0		2				
○ ECA-I 6,4 OX	○ 48	○ 2	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			3		6			7	
			0		0			2	
○ ECA-I 6,4 OX	○ 64	○ 3	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0
			.		.			.	
			2		7			9	
			0		2			0	

-
-
-
-
-
-

		per to	liz z at o							
<input type="radio"/> U.M	<input type="radio"/> kg	<input type="radio"/> M p a	<input type="radio"/> M P a	<input type="radio"/> Mp						
<input type="radio"/> C 1/8	48	3 0 6 7		12	1. .1 0 2	36		0 6 2 0		21.
<input type="radio"/> C 1/8	64	3 5 8 3		17	1. 5 8 5	56		0 . 8 2 6		28.
<input type="radio"/> C 1/8	80	11 . 0 2 4		41	3 . 2 3 8	101		1. 7 2 3		53.
<input type="radio"/> C 3/16	32	1. 0 3 4		75.	0 . 6 8 9	29		0 . 3 7 9		14.
<input type="radio"/> C 3/16	48	0 5 1 7		13	0 . 8 5 4	31.		0 . 5 5 8		23.
<input type="radio"/> C 1/4	48	1. 8 9 5		12	0 . 8 2 7	31.		0 . 5 5 1		20.
<input type="radio"/> C 3/8	24	0 6 2 0		41.	0 . 4 1 3	17.		0 . 2 2 7		10.
<input type="radio"/> A 1/8	48	2 .1 0 2		13	1. 2 0 6	44		0 . 6 8 9		24.
<input type="radio"/> A 1/8	28	0 . 7 5 8		55.	0 . 5 8 6	26		0 . 3 1 0		10.

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

○ Confronto tra i prodotti in NOMEX® di densità simile (48kg/m³)

○ pr o d u t t o r e	○ Prod o t t o	○ A,C	○ Compressione			○ Taglio in direzio ne L		○ Taglio in direzio ne W	
			○ R e s. M · S c o p. [M P a]	○ R e s. M · S t a b [M P a]	○ Mo [M	○ Resist [MPa	○ Mo [M	○ Resist [MPa	○ Mod [MP
○ A m b e r	○ ANA - 3,2 -48	○ A	○ 2 , 4 0	○	○ 13	○ 1,25	○ 40	○ 0,73	○ 25
	○ ANA - 4,8 -48	○ C	○ 2 , 4 0	○	○ 14	○ 1,20	○ 40	○ 0,70	○ 25
	○ ANC - 4,8 -48 OX	○ C	○ 2 , 9 0	○	○ 12	○ 0,80	○ 20	○ 0,85	○ 35
○ I. M a. T e c h	○ C- 1/8	○	○ 2 , 6 7	○	○ 12	○ 1,102	○ 37	○ 0,62	○ 21,3
	○ C- 3/1 6	○	○ 0 , 5 1 7	○	○ 12	○ 0,85	○ 31,	○ 0,551	○ 23,4
	○ C- 1/4	○	○ 1, 8 9 5	○	○ 12	○ 0,82	○ 31,	○ 0,551	○ 20,
	○ A- 1/8	○	○ 2 , 1 0 2	○	○ 13	○ 1,206	○ 44	○ 0,68	○ 24,1
○ H e x c e l	○ HRH - 10- 1/8	○	○ 1, 6 1 9	○ 1, 8 6 0	○ 13	○ 1,07	○ 44	○ 0,59	○ 24,1
	○ HRH - 10- 3/1 6	○	○ 1, 6 1 9	○ 1, 8 6 0	○ 13	○ 0,96	○ 44	○ 0,60	○ 23,4
	○ HRH - 10- 3/8	○	○ 1, 4 4 7	○ 1, 5 5 0	○ 117	○ 1,719	○ 44	○ 0,021	○ 20,
○ A H	○ AHN 412	○ A	○ 1, 2	○ 1, 8	○	○ 1,116	○ 35	○ 0,58	○ 17,2

T		0- 1/8		4 0	6					
	○	AHN 412 0- 3/1 6	○ A	○ 1, 2 4 0	○ 1, 8 6	○	○ 0,96	○ 31	○ 0,46	○ 17,2
	○	AHN 412 0- 1/4	○ A	○ 1, 1 0 2	○ 1, 5 5	○	○ 0,87	○ 31	○ 0,441	○ 17,2
	○	AHN 412 0- 3/8	○ A	○ 1, 2 0 6	○ 1, 4 4 7	○	○ 0,75	○ 26	○ 0,37	○ 17,2
	○	AHN 412 0- 3/1 6	○ A	○ 1, 5 8 5	○ 1, 9 2 9	○	○ 0,49	○ 15,	○ 0,62	○ 31
	○	AHN 780 0- 1/8	○ C	○ 1, 8 9 5	○ 2 , 0 6 7	○	○ 1,034	○	○ 0,62	○
	○	AHN 780 0- 3/1 6	○ C	○ 1, 5 1 6	○ 2 , 2 7 4	○	○ 0,82	○	○ 0,517	○
	○	AHN 780 0- 1/4	○ C	○ 1, 7 2 3	○ 1, 8 9 5	○	○ 0,82	○	○ 0,551	○
	○	AHN 780 0- 3/1 6 OX	○ C	○ 1, 9 6 4	○ 2 ,1 7 0	○	○ 0,65	○	○ 0,65	○
○	E	○ 3,2 -48	○	○ 1, 9 0	○	○	○ 1,16	○ 38	○ 0,62	○ 24
	○	○ 4,2 -48	○	○ 2 , 2 6	○	○	○ 2,06	○ 34	○ 0,56	○ 22
	○	○ 4,8 -48	○	○ 2 , 6 0	○	○	○ 0,98	○ 34	○ 0,56	○ 22
	○	○ 9,6 -48	○	○ 1, 8 0	○	○	○ 1,15	○ 30	○ 0,66	○ 20
	○	○ 4,8 -48 OX	○	○ 2 , 3 0	○	○	○ 0,66	○ 18	○ 0,72	○ 36
	○	○ 6,4 -48 OX	○	○ 2 , 3 0	○	○	○ 0,66	○ 15	○ 0,72	○ 33
○	C M L * * *	○ 4,0 -96	○	○ 8 , 3	○	○	○ 4,45	○ 22	○ 2,33	○ 117

○

	ANC 4,8	ANC 4,8 OX	Differe nza
Res. Comp. stab	2,40 Mpa	2,90 Mpa	-20%
Modulo comp.	140 Mpa	120 Mpa	+14,3%
Res. Taglio L	1,20	0,80	+33,3%
Modulo taglio L	40	20	+50%
Res. Taglio W	0,70	0,85	-21,4%
Modulo taglio W	25	35	-40%

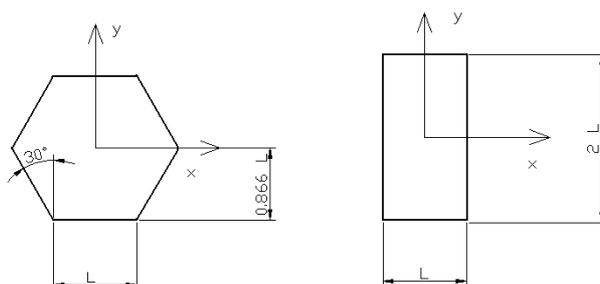
○

○

Le sovraespansione della geometria esagonale in geometria rettangolare porta un incremento della resistenza al taglio in direzione W del 20%, ma una diminuzione in direzione L del 50%. Ciò è ovviamente causa della variazione del momento statico d'inerzia S_{xx} ed S_{yy} .

○

○



○

○

$$S_{xx} \text{ esag} = \sqrt{3} l^2 s$$

○

$$S_{xx} \text{ rett} = 2 l s^2$$

○

$$\text{Diff \%} = 15$$

○

○

$$S_{yy} \text{ esag} = \sqrt{3} l^2 s$$

○

$$S_{yy} \text{ rett} = s l^2$$

○

$$\text{Diff \%} = 42$$

○

○

○

○

Si vede come la variazione % dell S_{xx} - S_{yy} sia simile alla variazione percentuale della resistenza a taglio rilevata. Oltre ad essa entrano in gioco anche fattori costruttivi ed ambientali

per spiegare la differenza tra il valore geometrico e quello riscontrato.

La cosa strana è la maggior resistenza a compressione longitudinale, lungo l'asse della cella, della sezione rettangolare rispetto alla sezione esagonale, essendo quest'ultima caratterizzata da reggio di inerzia maggiore.

2) Oggetto del confronto: materiale tipologia aereospaziale – materiale tipologia commerciale

○

○
I.Ma.Tech ;

1°) Produttore in esame:

○
vs A 1/8 :

prodotti a confronto: C 1/8

○

○	○ C 1/8 ○ [MPa]	○ A 1/8 ○ [MPa]	○ Differe nza %
○ Res. Comp. stab	○ 2,067	○ 2,102	○ + 1,69
○ Modulo comp.	○ 127,5	○ 131	○ +2,74
○ Res. Taglio L	○ 1,102	○ 1,206	○ +9,44
○ Modulo taglio L	○ 37	○ 45	○ +21,62
○ Res. Taglio W	○ 0,62	○ 0,69	○ +11,29
○ Modulo taglio W	○ 21,35	○ 24,12	○ +12,97

○

○
garantiti dal costruttore;

Confronto fatto sui valori minimi

○

○
Advanced Honeycomb Technologies

2°) Produttore in esame :

○

○
dal costruttore, non sui valori garantiti, presenti solo nel prodotto 4120 aereospaziale;

Confronto fatto sui valori medi forniti

○

○
7800-1/8-3.0 vs AHN 4120-1/8-3.0

Prodotti a confronto: AHN

○

○	○ AHN 7800- 1/8-3.0 ○ [MPa]	○ AHN 4120- 1/8-3.0 ○ [MPa]	○ Differe nza %
○ Res. Comp. stab	○ 275	○ 300	○ +9
○ Modulo comp.	○	○	○
○ Res. Taglio L	○ 150	○ 175	○ +16
○ Modulo taglio L	○	○	○

○ Res. Taglio W	○ 90	○ 100	○ +11
○ Modulo taglio W	○	○	○

○

○

○

7800-3/16-3.0 vs AHN 4120-3/16-3.0

Prodotti a confronto: AHN

○

○	○ AHN 7800-3/16-3.0 [MPa]	○ AHN 4120-3/16-3.0 [MPa]	○ Differenza %
○ Res. Comp. stab	○ 220	○ 300	○ +36
○ Modulo comp.	○	○	○
○ Res. Taglio L	○ 120	○ 175	○ +45
○ Modulo taglio L	○	○	○
○ Res. Taglio W	○ 75	○ 100	○ +33
○ Modulo taglio W	○	○	○

○

○

3.0 vs AHN 4120-1/4-3.0

Prodotti a confronto: AHN 7800-1/4-

○

○	○ AHN 7800-1/4-3.0 [MPa]	○ AHN 4120-1/4-3.0 [MPa]	○ Differenza %
○ Res. Comp. stab	○ 250	○ 200	○ -20
○ Modulo comp.	○	○	○
○ Res. Taglio L	○ 120	○ 175	○ +45
○ Modulo taglio L	○	○	○
○ Res. Taglio W	○ 80	○ 80	○ 0
○ Modulo taglio W	○	○	○

○

○ Dal confronto fatto sui dati forniti dal produttore sui prodotti, di medesima densità di 48kg/m^3 , si rileva che la resistenza della tipologia aereospaziale è maggiore di quella della tipologia commerciale per valori di oltre il 9%. Prendo in considerazione solo i valori garantiti dai produttori perché alla luce dei risultati ottenuti l'incremento di resistenza per il materiale aereospaziale è notevole e mutevole in ampia misura al variare delle misurazioni, o al mantenere costante delle misurazioni su materiali diversi. Inoltre la tipologia aereonautica è espressamente garantita dal produttore per usi a temperature superiori ai 180°C , quindi il materiale usato nella tipologia aereonautica è di miglior qualità (e maggior costo) rispetto alla tipologia commerciale, ovvero la fibra è caratterizzata da miglior cristallinità (vedere capitolo sul Nomex) e le lavorazioni vengono effettuate con maggior accuratezza.

○

3) Dall'analisi dei dati del CML si verifica che essi non possono essere veritieri se attribuiti a fibra meta-aramidica quale il NOMEX. Da confronti effettuati ho stabilito con ottime probabilità che i dati si riferiscono a carta di fibra para-aramidica, quale il kevlar, e non il NOMEX. Quindi le caratteristiche tabellate sono riferite al materiale sbagliato, non NOMEX, bensì Kevlar.

○

4) Il confronto fatto con l'honeycomb di carta aramidica (ovvero vi è la presenza sia di fibre para che meta-aramidiche) da come risultato che le caratteristiche sono simili se non inferiori rispetto alle fibre di solo NOMEX. Dato che la fibra para-aramidica KEVLAR ha migliori caratteristiche di resistenza rispetto alla fibra NOMEX, suppongo che la compresenza di NOMEX e KEVLAR sia però affetta da difetti strutturali nella costruzione della carta, tale da causare le uguali caratteristiche pur in presenza della fibra kevlar. A ciò probabilmente si associa però una maggior facilità di lavorazione dei fogli e del materiale honeycomb stesso, in modo da permettere costi minori rispetto agli honeycomb in monofibra NOMEX.

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

-
-
-

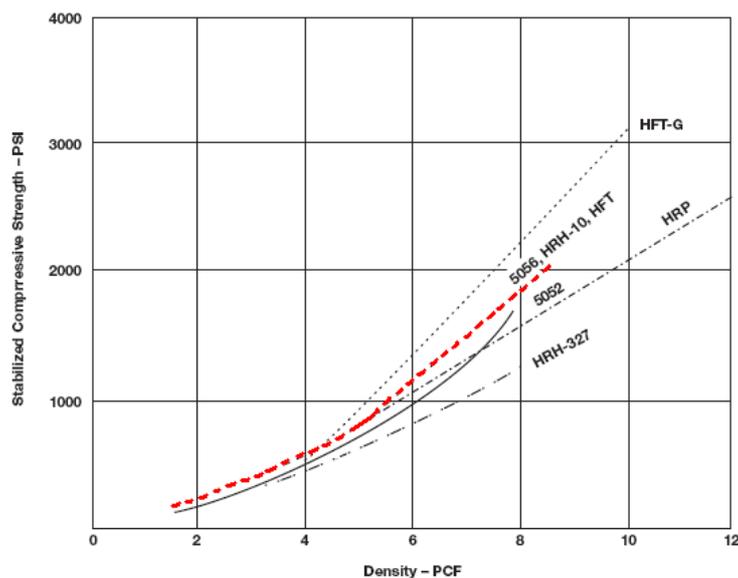
- *Prima di esplicitare i grafici seguenti devo fare una premessa: durante lo sviluppo della tesi ho avuto informazioni contrastanti da più di una fonte su vari aspetti. Uno di questi è la natura del prodotto denominato HRH-10 della HEXCEL, poiché il produttore lo classifica come honeycomb in fibra aramidica, riservando l'Honeycomb in Nomex per il prodotto HRH-78, mentre lo studioso Tom Bitzer, autore del libro consultato, dopo non poche difficoltà di reperimento, 'honeycomb technology, materials, manufacturing, applications and testing, classifica proprio l'HRH-10 come honeycomb in Nomex e su di esso sviluppa grafici relativi all'honeycomb in Nomex. Dato che l'honeycomb in Nomex è l'oggetto di questa tesi e data la disponibilità molto limitata di materiale in materia, suppongo che l'HRH-10 sia in Nomex e si differenzi dall'HRH-78 solo per il tipo di fibra Nomex impiegata.*

- **Legenda grafici:**

- HRH-327= honeycomb in fibra di vetro rinforzato con resina poliammidica
- HRP=honeycomb in fibra di vetro rinforzato con resina fenolica
- 5052 e 5056=honeycomb in alluminio in lega risp 5052 e 5056
- HRH-10=honeycomb in Nomex
- HFT=honeycomb speciale in fibra di vetro rinforzato con resina fenolica
- HFT-10=honeycomb speciale in fibra di carbonio

- **Grafico confronto resistenza a compressione stabilizzata**

- **NOMEX = HRH-10** - - - -



-

- Conversioni ANSI-ISO

- **Kg/m³=16,0187 pfc**

<input type="radio"/> P	<input type="radio"/> Kg/ m ³
<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 32,03 7
<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 64,07 5
<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 96,11 0
<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 128,1 50
<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 160,1 87

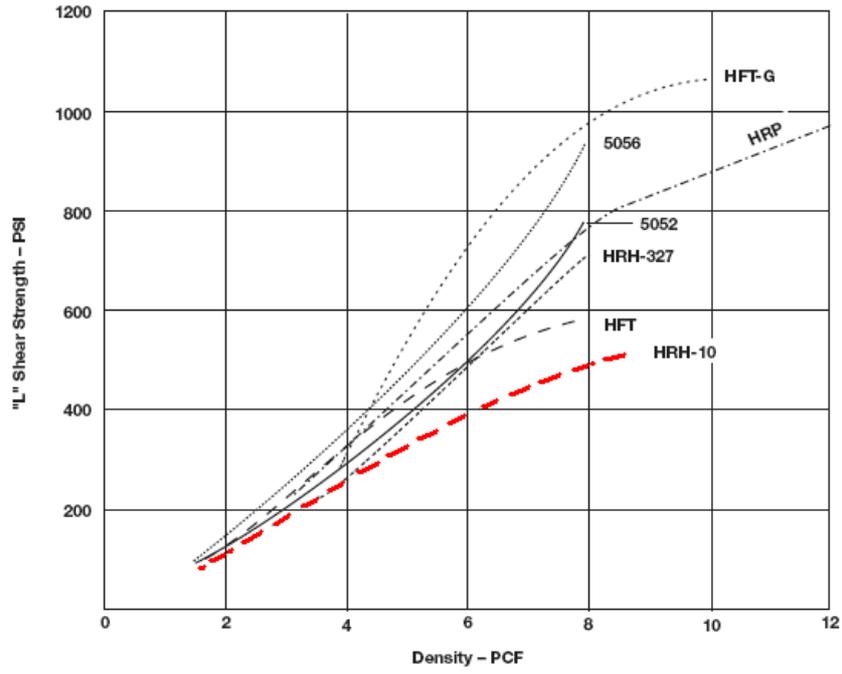
Mpa =0,145134 ksi

<input type="radio"/> ks i	<input type="radio"/> M p a
<input type="radio"/> 10 0 0	<input type="radio"/> 6,8 9
<input type="radio"/> 20 0 0	<input type="radio"/> 13, 7 8
<input type="radio"/> 30 0 0	<input type="radio"/> 20, 6 7
<input type="radio"/> 40 0 0	<input type="radio"/> 27, 5 6

Confronto: l'honeycomb in Nomex ricopia i valori dell'honeycomb in alluminio 5056, resistenza relativamente elevata in rapporto al peso, maggiore dell'honeycomb in fibra di vetro HRP e HRH-327 e dell'honeycomb in alluminio 5052.

Grafico confronto resistenza al taglio direzione L

NOMEX = HRH-10 -----



○

○ Conversioni ANSI-ISO

○ $\text{Kg/m}^3 = 16,0187 \text{ pfc}$

○ P	○ K g / m ³
○ 2	○ 3 2 , 0 3 7
○ 4	○ 6 4 , 0 7 5
○ 6	○ 9 6 , 1 1 0
○ 8	○ 1 2 8 , 1 5 0
○ 1	○ 1 6 0 , 1 8 7

○

○ Mpa =145,134 psi

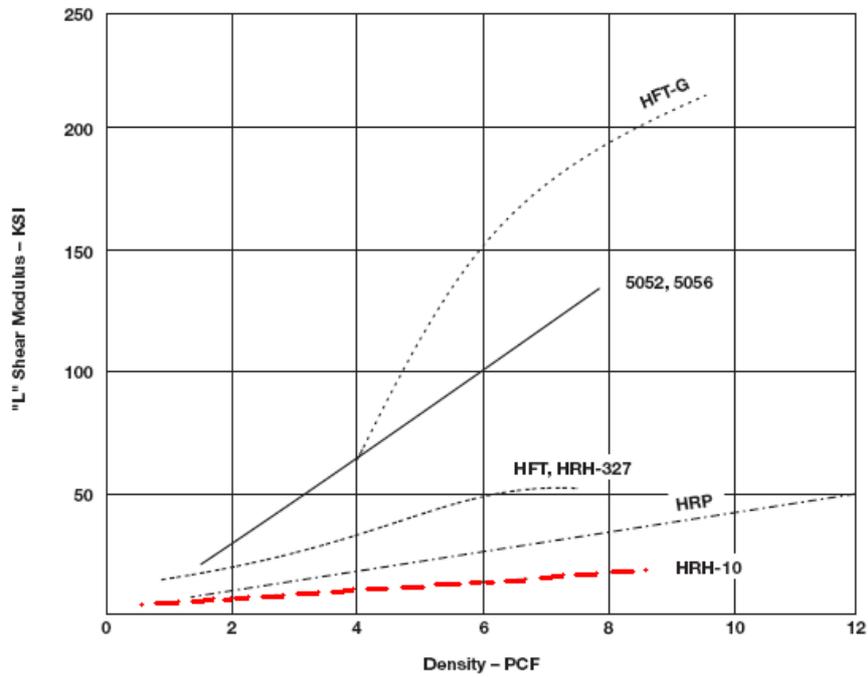
○ Psi	○ Mpa
○ 200	○ 1,378
○ 400	○ 2,756
○ 600	○ 4,134
○ 800	○ 5,512
○ 1000	○ 6,890

○

○ Confronto: l'honeycomb in Nomex è quello che presenta minor resistenza al taglio in direzione L in rapporto alla densità.

○ **Grafico confronto modulo di taglio in direzione L**

○ **NOMEX = HRH-10 -----**



○ Conversioni ANSI-ISO

○ **Pfc = 16,0187 Kg/m³**

○ P	○ K g / m ³

<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3 2 , 0 3 7
<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 6 4 , 0 7 5
<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 9 6 , 1 1 0
<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 1 2 8 , 1 5 0
<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1 6 0 , 1 8 7

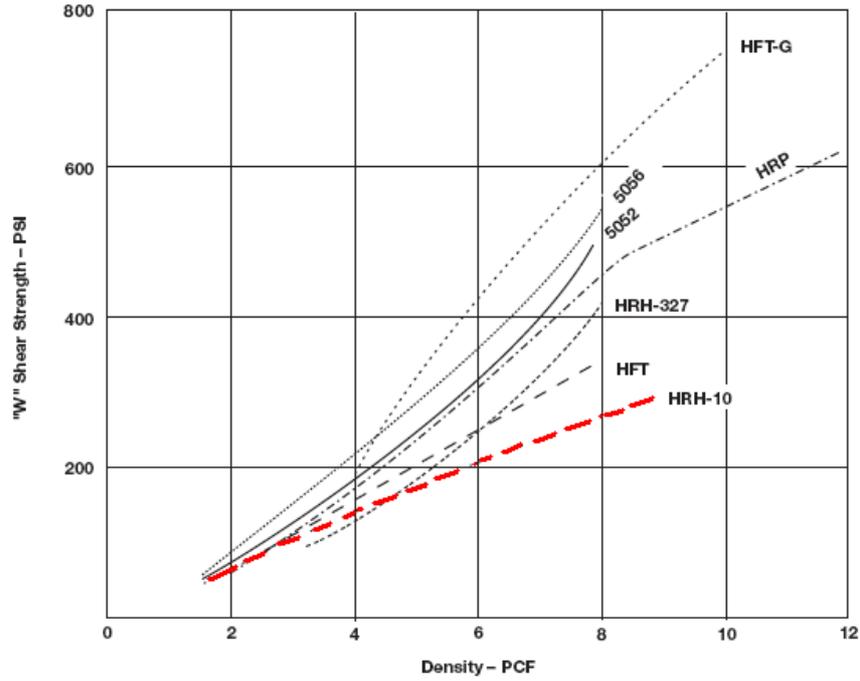
Mpa =145,134 psi

<input type="radio"/> K s i	<input type="radio"/> Mp a
<input type="radio"/> 50	<input type="radio"/> 334
<input type="radio"/> 10 0	<input type="radio"/> 689
<input type="radio"/> 15 0	<input type="radio"/> 103 3
<input type="radio"/> 20 0	<input type="radio"/> 137 8
<input type="radio"/> 25 0	<input type="radio"/> 172 2

-
-
- Confronto= come per la resistenza, l'honeycomb in NOMEX è quello di modulo minore in rapporto al peso.
-

○ **Grafico resistenza al taglio direzione W**

- **NOMEX = HRH-10 -----**



- CONVERSIONI ANSI-ISO

- **Pfc = 16,0187 Kg/m³**

○ P f c	○ Kg/ m ³
○ 2	○ 32,0 37
○ 4	○ 64,0 7
○ 6	○ 96,11
○ 8	○ 128,1 5
○ 1 0	○ 160,1 87
○ 1 2	○ 192, 22

-

- **Mpa =145,134 psi**

○ Ps i	○ M p a
○ 20	○ 1,3

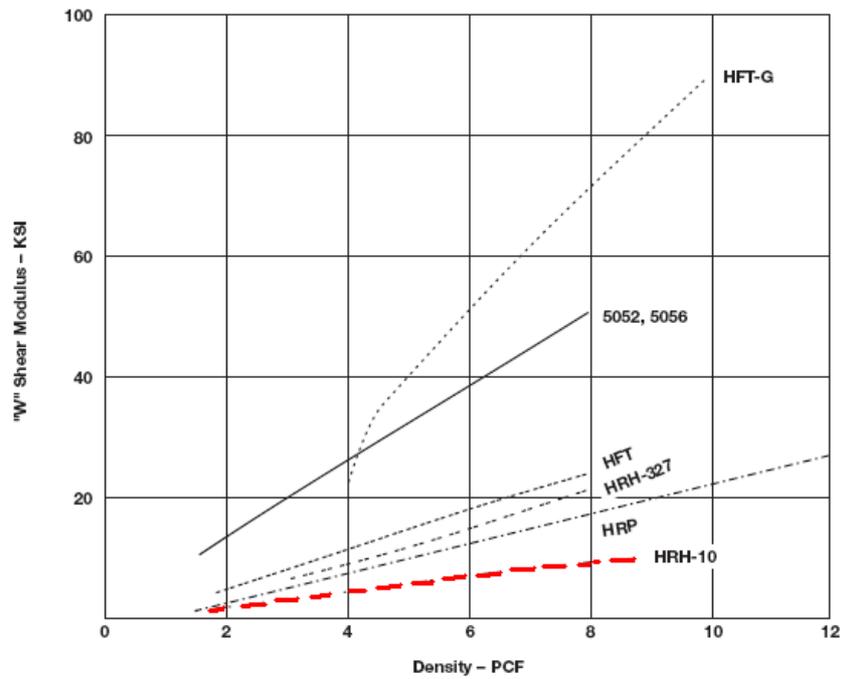
0	7
0	8
○ 40	○ 2,7
0	5
	6
○ 60	○ 4,1
0	3
	4
○ 80	○ 5,5
0	12
○ 10	○ 6,8
0	9
0	0

○

○ Confronto: ripetizione di quanto visto sopra.

○ Modulo al taglio direzione W

○ **NOMEX = HRH-10** -----



○ CONVERSIONI ANSI-ISO

○ **Pfc = 16,0187 Kg/m³**

○	○
P	K
	g
	/
	m
	3
○	○
2	3
	2
	,
	0
	3
	7
○	○
4	6
	4
	,
	0

		7 5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	9 6 , 1 1 0
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1 2 8 , 1 5 0
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1 6 0 , 1 8 7

Mpa =145,134 psi

<input type="radio"/> K s i	<input type="radio"/> Mpa
<input type="radio"/> 2 0	<input type="radio"/> 137, 80
<input type="radio"/> 4 0	<input type="radio"/> 275, 61
<input type="radio"/> 6 0	<input type="radio"/> 413, 41
<input type="radio"/> 8 0	<input type="radio"/> 551, 21
<input type="radio"/> 1 0 0	<input type="radio"/> 689

Confronto= ripetizione di sopra

17 PROPRIETA' TERMICHE HONEYCOMB IN NOMEX

Gli honeycomb in NOMEX sono stati sviluppati per ottenere materiali aventi ottime proprietà meccaniche coniugate ad un altrettanto ottima resistenza alle alte temperature ed isolamento termico.

La trattazione specifica delle caratteristiche termiche di honeycomb in NOMEX è lunga e dispersiva, tuttavia di seguito vi è un riassunto delle loro caratteristiche termiche.

La trattazione del NOMEX e delle caratteristiche termiche di questo è stato trattato estesamente precedentemente, per cui mi riferirò ai soli honeycomb in NOMEX.

Tabella delle caratteristiche di resistenza all'infiammabilità di honeycomb in NOMEX:

Infiammabilità a 60 sec di esposizione alla fiamma, metodo BSS 7230

<input type="radio"/> Dimensione celle	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 3
	m	, 1 7 5	, 7 6 2	, 7 6 2	, 2 7 5	, 1 7 5	, 1 7 5
<input type="radio"/> Dimensione celle	<input type="radio"/> in	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 1/	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1/
	c h	/	/	/	8	/	8
		8	1 6	1 6		8	
<input type="radio"/> Densità	<input type="radio"/> K	<input type="radio"/> 12	<input type="radio"/> 14	<input type="radio"/> 9	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 6
	g	8	4	6	8	8	4
	/	,	,	,	,	,	,
	m	1	1	1	8	0	0
	³	4	6	1	3	5	7
		9	8	3	4	6	5
<input type="radio"/> Tempo autoestinguinto	<input type="radio"/> s	<input type="radio"/> 1, 3	<input type="radio"/> 0, 1	<input type="radio"/> 1, 9	<input type="radio"/> 0, 1	<input type="radio"/> 1, 6	<input type="radio"/> 1, 1
<input type="radio"/> Lunghezza della fiamma	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 7 4	<input type="radio"/> 13	<input type="radio"/> 41	<input type="radio"/> 2 5	<input type="radio"/> 4 8	<input type="radio"/> 6 9
<input type="radio"/> Tempo di fine gocciolamento	<input type="radio"/> s	<input type="radio"/> 0					

Come logico dato che il NOMEX è una fibra meta-aramidica , termoundurente, essa non gocciola anche se sottoposta alla fiamma, bensì degrada ed aumenta di volume aggravigliandosi come scritto nella sezione che tratta il NOMEX.

La trasmissione del calore da parte del pannello sandwich, ovvero dell'honeycomb ricoperto da lamina, è attribuibile a tre fenomeni:

- Conduzione della parete cellulare;
- Radiazione nel pannello;
- Convezione nel pannello.

La trasmissione di calore nei pannelli sandwich è definita mediante un coefficiente di conduttività termica K [Btu-inchh*ft2*°F]

Coefficiente di conduttività termica degli honeycomb K

<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Celle vuote	<input type="radio"/> Celle riempite
<input type="radio"/> Honeycomb in fibra di vetro	<input type="radio"/> 0,60	<input type="radio"/> 0,35
<input type="radio"/> Honeycomb in Nomex	<input type="radio"/> 0,50	<input type="radio"/> 0,30
<input type="radio"/> Honeycomb in alluminio	<input type="radio"/> 75	<input type="radio"/> -----

Per celle riempite si intendono celle riempite di resina. Se le celle vengono riempite di resina viene meno la trasmissione del calore per convezione all'interno della cella stessa, però si ha trasmissione di calore per conduzione della resina ed un aumento notevole della densità.

Caratteristica importante che descrive la conducibilità termica di un materiale è il suo calore specifico, ovvero la quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura di un grammo di materiale di un grado , tradotto la facilità o meno che un materiale ha di riscaldarsi.

Calore specifico Q [cal/g°C]

<input type="radio"/> Q[ca l/g °C]	<input type="radio"/> 0,23	<input type="radio"/> 0,12	<input type="radio"/> 0,58	<input type="radio"/> 0,68	<input type="radio"/> 0,4	<input type="radio"/> 0,5	<input type="radio"/> 0,31
<input type="radio"/> Materiale	<input type="radio"/> Al	<input type="radio"/> Fibra di vetr	<input type="radio"/> NOM EX	<input type="radio"/> KEV LA R	<input type="radio"/> Res. fen olic	<input type="radio"/> Res. epo ss	<input type="radio"/> Res. poli am

		o			a		m
--	--	---	--	--	---	--	---

○

○ Si vede come il NOMEX abbia una capacità di assorbire calore senza alterare la sua temperatura molto maggiore rispetto all'alluminio e maggiore rispetto alla fibra di vetro

○ Con un facile calcolo è possibile calcolare il calore specifico di un pannello honeycomb

○ $\text{Calore specifico del pannello} = \text{peso web} \times \text{coeff cond termica web} + \text{peso resina} \times \text{coeff cond termica resin}$
 $\text{peso pannello honeycomb}$

○ Tabella calore specifico pannello honeycomb

○ Pannello	○ Calore specifico
○ HRH-10	○ 0,32
○ HRP	○ 0,31
○ HRH-327	○ 0,24
○ HRH-49	○ 0,39

○

○ Conclusioni

○ Tale fatto accompagnato dal fatto che la conducibilità termica del pannello in NOMEX è inferiore rispetto ai pannelli in altri materiali comporta una migliore adattabilità a condizioni di lavoro in cui il calore debba essere isolato oppure rallentato nella sua diffusione. A ciò bisogna aggiungere le caratteristiche proprie del NOMEX come materiale besa, prima che in natura di pannello, cioè della sua resistenza a temperatura ambiente e alle alte temperature e della sua non tossicità in seguito all'esposizioni a temperature estreme (a differenza del kevlar che se soggetto a temperature estreme emette gas altamente nocivi)

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ *Lo spessore delle pareti cellulari è stato dato dal fornitore. Se non vi fosse l'aggravio di peso dato dalla resina e dal collante si potrebbe ricavare lo spessore delle pareti cellulari avendo il peso di 1m³ di honeycomb, il peso della carta di Nomex al m³ e la geometria della cella. Tale calcolo effettuato porta a risultati fuorvianti proprio per la presenza delle resine*

○ Caratteristiche meccaniche honeycomb

○ materiale base: ○ carta Nomex ○	○ Tipologia celle: ○ esagonale ○	○ Produttore: Hexcel composites ○ ○	○ Tipologia prodotti: ○ commerciali ○					
○ Designazione	○ de	○ Sollecitazione di compressione	○ Sollecitazione di taglio direzione L	○ Sollecitazione di taglio direzione W				
○ Mat dim celle [in]	○	○ R e s i s t e n z a m a t e r i a l e s c o p e r t o	○ R e s i s t e n z a m a t e r i a l e s t a b i l i z z a t o	○ M o	○ R e s i s t e n z a	○ M o		
○ U.M	○ kg	○ M p a	○ M p a	○ M p	○ M P a	○ M p	○ M P a	○ M p
○ HRH-78 1/8	○ 12	○ 11, 0 4	○ 1 2, 0 5 8	○ 41	○ 3, 2 3 8	○ 10	○ 1, 7 2 2	○ 53,

○

○ Caratteristiche meccaniche carta di Nomex che compone l'honeycomb

○	○ Proprietà	○ Unità di misura	○ T410
○ Fisiche		○	○
○	○ Spessore	○ Mm	○ 0.05
○	○ Peso	○ g/m ²	○ 41
○	○ Carico di rottura longitudinale	○ Mpa	○ 86
○	○ Carico di rottura trasversale	○ Mpa	○ 36
○	○ Allungamento a rottura longitudinale	○ %	○ 11
○	○ Allungamento a rottura trasversale	○ %	○ 8
○	○ Resistenza allo strappo	○ N	○ 11

longitudinale

Resistenza allo strappo
trasversale N 6

 Caratteristiche elettriche carta di Nomex

<input type="radio"/> Spessore nominale	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 0,05	<input type="radio"/> 0,08	<input type="radio"/> 0,13	<input type="radio"/> 0,18	<input type="radio"/> Normativa
<input type="radio"/> Spessore medio	<input type="radio"/> m	<input type="radio"/> 0,06	<input type="radio"/> 0,08	<input type="radio"/> 0,13	<input type="radio"/> 0,18	<input type="radio"/> ASTM D374
<input type="radio"/> Resistenza rapida impulso elettrico	<input type="radio"/> k	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 28	<input type="radio"/> 34	<input type="radio"/> ASTM D149
<input type="radio"/> Resistenza impulso elettrico	<input type="radio"/> k	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> 55	<input type="radio"/> 55	<input type="radio"/> ASTM D3426
<input type="radio"/> Costante dielettrica a 60 hz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 1,6	<input type="radio"/> 1,6	<input type="radio"/> 2,4	<input type="radio"/> 2,4	<input type="radio"/> ASTM D150
<input type="radio"/> Fattore di dissipazione a 60 hz	<input type="radio"/> x	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> ASTM D150

 Caratteristiche termiche honeycomb

<input type="radio"/> Caratteristica termica	<input type="radio"/> Normativa	<input type="radio"/> Valore
<input type="radio"/> Temperatura massima di servizio continuativo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 175°C
<input type="radio"/> Temperatura massima di servizio per brevi periodi	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Dipendente dalla tipologia di resina fenolica
<input type="radio"/> Conducibilità termica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> Bassa
<input type="radio"/> Temperatura di carbonizzazione dell'honeycomb	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 177°C* <input type="radio"/> 435°C**
<input type="radio"/> Limiting Oxygen Index	<input type="radio"/> ASTM D2863	<input type="radio"/> 28
<input type="radio"/> Calore di combustione	<input type="radio"/> ASTM D2015	<input type="radio"/> 2.8x10 ⁶ J/kg
<input type="radio"/> Calore specifico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> 0.30 cal/kg°C

 *: temperatura di degrado della resina fenolica; **:temperatura di carbonizzazione del Nomex;

○ $C_y = \delta \cos \theta h + l \sin \theta = \sigma_y b l^4 \cos^3 \theta / 12 E s l (h + l \sin \theta) = 13.859 \sigma_y / E s$ (9)

○ Rapporto modulo elastico relativo in direzione x:

○ $E_x^* E_s^* = E_y^* E_s^* = 23 t l^3 = 0,020829$ (11)

○ Modulo elastico:

○ $E_x = E_y = 0,020829^* E_s^*$

○ Rapporto di Poisson per esagoni regolari: $\nu_{xy}^* = \nu_{yx}^* = 1$ (14)

○ Modulo di resistenza allo scorrimento:

○ $G_{12}^* E_s = t l^3 \cdot 0.57 = 0.25^* E E s$ (18)

○ $G_{12} = 0.25^* E_s$

○

○

○ Instabilità elastica

○ Carico critico di instabilità elastica per ogni cella (colonna):

○ $P_{cr} = n^2 \pi^2 E s l h^2 = 1^* \pi^2^* E s^* l^4 \cdot 0.158752 = 0.0013^* E s$ (20)

○ Carico limite per colonna:

○ $P = 2 \sigma_y^* l^* b^* \cos \theta = 0.275^* \sigma^2^* b$

○ Valore di collasso elastico:

○ $P_{crit} E_s^* Area = (\sigma_{el})^2 E_s = n^2 \pi^2 h^2 \cdot 1^* 12 b t^3 \cdot 12^* l^* \cos^2 \theta \cdot b = \pi^2 \cdot n^2 \cdot t^3 \cdot 24^* l^* h^2 \cdot \cos^2 \theta = 0.22^* t l^3 = 0.006874$ (22)

○ Il collasso elastico quindi sopravviene quando:

○ $\sigma_{el} = 0.006874 E_s$

○ Deformazione di collasso elastico = 10%

○ Collasso plastico

○ Limite di collasso plastico:

○ $(\sigma_{pl})_x = \sigma_{pl} \sigma_y = t l^2 \cdot 23 = 0.06613$ (27-30)

○ Limite di taglio nel piano

○ $(\tau_{pl})_{xy} \sigma_y = 12^* \sqrt{3}^* t l^2 = 0.02864$ (32)

○ Tensione limite di taglio nel piano:

○ $(\tau_{pl})_{xy} = 12^* \sqrt{3}^* t l^2 = 0.02864^* \sigma_y$

○ Rottura fragile

○ Limite di rottura fragile a schiacciamento:

$$\sigma_{crx\sigma fs} = \sigma_{cry\sigma fs} = 49t/l^2 = 0.1399 \quad (38)$$

○ Limite di frattura fragile a trazione:

$$\sigma_f^* \sigma fs = 0.3 * l_c * t/l^2 \quad (38)$$

○ c = lunghezza difetto strutturale presente nel honeycomb

○ Tenacità a rottura dell'honeycomb:

$$K1c = 0.3 * \sigma fs * \pi l^* t/l^2 = 0.021 \sigma fs \quad (39)$$

○

○

○

○ CARICHI BIASSIALI

○ L'analisi del limite dei carichi biassiali è tutt'altro che facile, nel caso biassiale non vi è l'indicazione del limite preciso della tensione in una direzione o nell'altra direzione, vi è invece l'indicazione della combinazione limite delle due tensioni aventi direzione perpendicolate e verso qualunque.

○ **Deformazione elastica:**

$$\epsilon = \sigma E (1 - \nu) \quad (72)$$

$$\epsilon = 3 * \sigma E t/l \quad (73)$$

○ **Collasso plastico**

○ Equazione limite del collasso plastico:

$$\pm \sigma_1 \sigma ys - \sigma_2 \sigma ys = 1 - 32 \sigma_1 \sigma pl^* + 13 \sigma_2 \sigma pl^* t/l^2 \quad (84)$$

$$\sigma pl = 23 \sigma ys t/l^2$$

○ **Frattura fragile**

○ Equazione limite della frattura fragile:

$$\pm \sigma_1 \sigma ys - \sigma_2 \sigma ys = 49 t/l^2 - 334 (t/l) \sigma_1 \sigma fs + 13 \sigma_2 \sigma fs \quad (88)$$

○

○

○

○

○

○

○

-
-
-
-
-
-

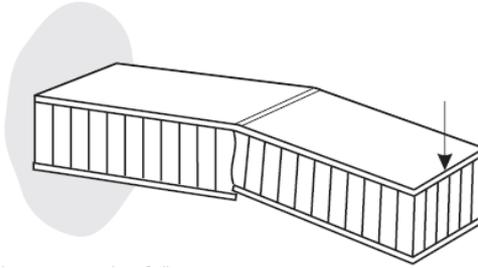
○

○ 19 MODALITA' DI DEFORMAZIONE-CEDIMENTO DI UN PANNELLO SANDWICH

- Di seguito sono riassunte le modalità di cedimento-rottura di un pannello sandwich tipico, dall'osservazione delle modalità di rottura è possibile spiegare le caratteristiche che deve avere un pannello se sottoposto a determinate sollecitazioni onde non giungere a rottura:

○ Rottura per Resistenza:

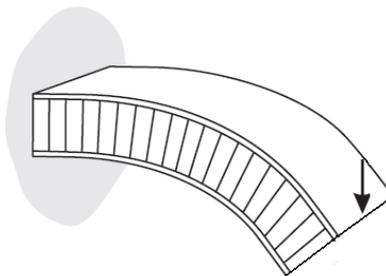
-



- si ha il cedimento delle lamine esterne sottoposte al carico.

-
-
-
-
-
-
-
-
-

○ Rottura per insufficiente rigidezza:

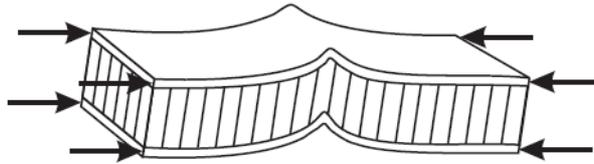


- si ha un'eccessiva deformazione provocata da un'insufficiente rigidezza. Ciò può essere la conseguenza di tre fattori:

1. Scorrimento del core rispetto alle lamine (l'adesivo permette lo scorrimento), che porta ad un decremento notevolissimo del momento di inerzia del pannello;
2. Momento di inerzia iniziale troppo ridotto rispetto al carico;
3. Il core non redistribuisce lo sforzo tra le due lamine.

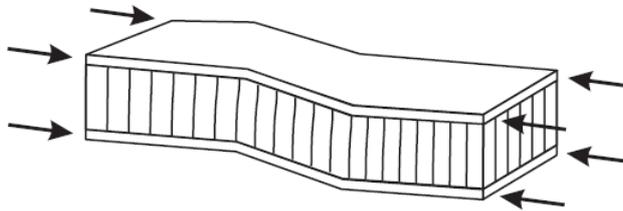
○

○

○ **Rottura per instabilità del pannello**

- Il pannello cede per instabilità ai carichi di punta. Per ovviare a ciò o si riduce il carico di punta (semplice ma a volte impossibile) oppure occorre aumentare il raggio di inerzia del pannello (aumentando lo spessore del core), oppure ancora applicare al pannello stesso dei rinforzi antisbandamento.

○

○ **Rottura per sollecitazione di taglio deviata**

- Può accadere che invece di cedere per instabilità, se il carico è conservativo, si abbia un cedimento per uno sbandamento della trave, che porta al comparire di una sollecitazione di taglio.

○

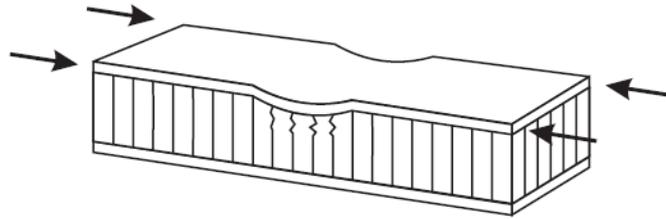
○

○

○

○

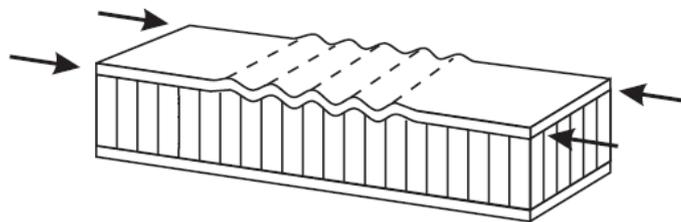
○ **Cedimento per corrugamento**



- è pur possibile che un carico di punta applicato ad una e/o entrambe le lamine invece di portare il pannello all'instabilità o alla deviazione provochi il corrugamento della pelle- o lamina- e lo schiacciamento del core. Ciò può essere causato da un'insufficiente resistenza del core a sopportare carichi di schiacciamento.

○

○ Cedimento per instabilità della lamina

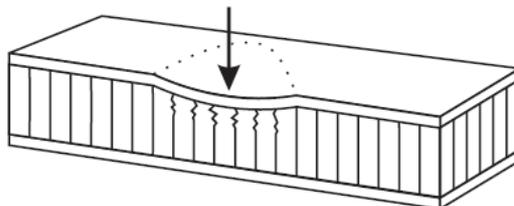


- il cedimento di instabilità della lamina può essere considerato quasi un "fratello" del cedimento per corrugamento, ovvero anche qui si ha una deformazione notevole della lamina con deformazione anche nel core. Esso può essere causato dallo scorrimento della lamina rispetto al core, e quindi dalla cessazione del compito da parte dello strato adesivo.

○

- Nei casi in cui si presume che il pannello e /o le sole lamine siano sottoposte a carichi di punta è necessario considerare seriamente, se i carichi possono essere elevati, l'applicazione alla lamina di alcune semplici rinforzi antisbandamento, ad esempio delle nervature. L'applicazione di essi presenta un costo molto modesto ma porta ad un incremento notevole della resistenza a carichi di punta.

○ Cedimento per compressione locale



- La presenza di carichi localizzati trasversalmente al pannello è molto deleteria. Nel caso in cui vi sia solo tale sollecitazione esso può anche essere trascurato, ma nel caso di sollecitazioni che portino a lavorare le lamine come se sottoposte a carico di punta la presenza della forza porta la lamina a deformarsi proprio in tale punto. Cioè se la forza trasversale è presente ciò ipotoca fortemente la resistenza del pannello a carichi di punta.

○

○

○

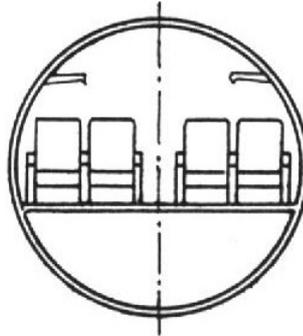
○

- coefficienti di sicurezza;
 - La scelta preliminare deve essere fatta considerando assieme a tali 3 aspetti anche altri aspetti di carattere tecnico:
 - temperature di utilizzo dei pannelli;
 - infiammabilità dei pannelli stessi;
 - trasferimento di calore;
 - assorbimento di umidità/umidità negli ambienti di utilizzo;
 - la solvenza degli adesivi ed il loro degassamento;
 - la forma delle celle;
 - la pelle superficiale;
- 4.) Calcoli preliminari:
- assunto il materiale dello skin, lo spessore dello skin e lo spessore del pannello, ignoro in tale fase il core;
 - calcolo la rigidità;
 - calcolo la flessione;
 - calcolo la sollecitazione sullo skin superficiale;
 - calcolo poi la sollecitazione sul core.
 -
- 5.) Ottimizzazione:
- modifco lo spessore dello skin, il materiale dello skin e il materiale del pannello per ottimizzare le performance.
 - selezione una forma dell'anima adatta per resistere al taglio.
 -
- 6.) Calcoli di dettaglio:
- calcolo dello spessore;
 - calcolo della freccia-flessione;
 - calcolo della sollecitazione dello lamina superficiale;
 - calcolo della sollecitazione sul core;
 - controllo, se possibile, sulla deformazione del pannello;
 - controllo della sollecitazione di taglio deviata;
 - controllo del corrugamento della lamina;
 - controllo dell'imbozzamento delle celle;
 - controllo del compressione localizzata.

○ 21 ESEMPIO APPLICATIVO

○

- **Ipotesi applicativa: costruzione di un pannello-rivestimento di una carlinga di un aereomobile di geometria semplice operante come una membrana, unente le caratteristiche di resistenza meccanica, le caratteristiche di isolamento termico ed elettrico ed il minimo peso possibile.**



○

- *Disegno d una carlinga a sezione trasversale a lobi circolari (tipica degli aerei da trasporto)*

○

- Caratteristiche costruttive richieste al pannello:

- spessore limite: 12mm

- geometria: settore circolare circonferenza $D=6000\text{mm}$, angolo settore= 38° , estensione settore= 2m^2

- differenza di pressione= 0.74 bar

- trovare la geometria del pannello in modo da soddisfare le richieste sopra con un elevato coeff di sicurezza ed insieme ad esse ottenere:

1. la massima resistenza flessionale e torsionale per la carlinga composta ipoteticamente da soli pannelli,
2. Il massimo isolamento termico in modo da minimizzare il flusso di calore attraverso la carlinga,
3. Il massimo isolamento elettrico,
4. Condizioni di non combustione della carlinga se sottoposta a fiamma,
5. Condizioni di minimo trasferimento termico esterno-interno in caso di incendi esterni,
6. Minimo peso possibile,

○

○

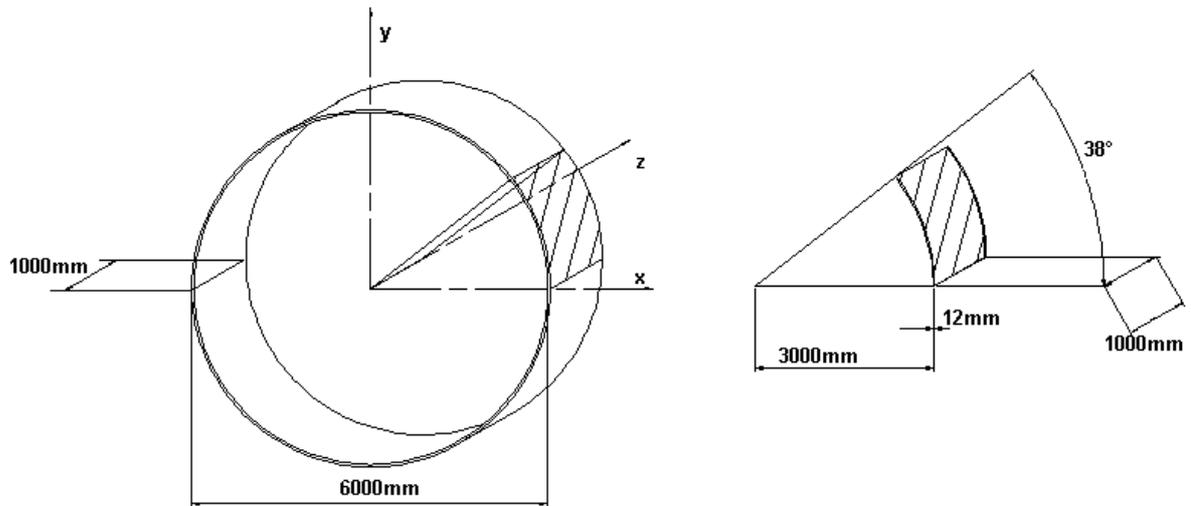
○

○

○

-
-
-
-
- Disegno preventivo carlinga e pannello

○



- In prima approssimazione assumo un pannello caratterizzato dalla seguente geometria
- Spessore pannello = 12mm (vincolato)
- Materiale lamina = Alluminio serie 2024
- *Caratteristiche alluminio 2024 stato ricotto:*

○ carico di rottura	○ $\sigma_r = 245 \text{ Mpa}$
○ Modulo di elasticità longitudinale	○ $E = 7400 \text{ Mpa}$
○ Modulo di resistenza allo scorrimento	○ $G = 2781 \text{ Mpa}$
○ Densità	○ $\rho = 2.77 \text{ kg/dm}^3$

-
- Materiale core = Honeycomb in Nomex

○ Dimensionamento membrana per carlinga aereo pressurizzato, altitudine volo 10'000m

- $P_{\text{interna}} = 1 \text{ bar}$;
- $p_{\text{esterna}} = 0.22 \text{ bar}$ (pressione atm a 10000m)
- $\Delta p = 0.78 \text{ bar}$
- raggio carlinga* = 3000mm

- (*che sia il raggio interno o il raggio esterno presumo che la differenza nel risultato del calcolo sia trascurabile)
- equazione equilibrio delle membrane:
- $\sigma_m R_m + \sigma_t R_t = p t$
- Mantello cilindrico: $R_m = \infty$
- Coeff di ingoranza = 2.5
- $\sigma_{amm} = \sigma_r 2.5 = 98 \text{ Mpa}$
-
- $t = p * R_t \sigma_t^{-1} = 2.3877 = 2.4 \text{ mm}$
- (analisi dimensionale formula: $\text{bar} * \text{mm} / \text{mm} = \text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ Mpa}$)
- Una lamina di 2.4 mm è sufficiente per resistere allo sforzo membranale associato.
- Assumo $t_{int} = 2.5 \text{ mm}$
- $\sigma_t = p t * R_t = 0.782.5 * 3000 * 110 = 93.6 \text{ Mpa}$
- Poniamo che la sollecitazione membranale sia completamente supportata dalla lamina interna del pannello sandwich.
- Ora è possibile, ponendo le dimensioni del pannello esterno, associare alla carlinga dell'aereo anche un compito strutturale associando alla carlinga stessa una resistenza alle sollecitazioni di torsione e flessione. Poiché non ho conoscenze specifiche delle sollecitazioni che si attuano in un aereo e della loro intensità pongo arbitrariamente uno spessore della lamina esterna e di esso calcolo la resistenza a torsione e flessione, dissociata l'una dall'altra.
- Spessore arbitrario lamina esterna = 3.0mm
- Coeff. di ignoranza = 2.0
- Resistenza flessionale:
- $\sigma_{t \text{ amm}} = \sigma_r 2.0 = 122.5 \text{ Mpa}$
- $\sigma_f = M_f W_f$
- $W_f = \pi 32 * (D^3 - d^3)$ per le sezioni circolari;
- $M_{f \text{ max}} = \sigma_{t \text{ amm}} * W_f = 122.5 * \pi 32 * 60003 - 59943 = 778.5 * 10^6 \text{ Nmm} = 7.785 * 10^5 \text{ Nm}$
- Resistenza Torsionale:
- $\tau_{amm} = \sigma_{amm} / 3 = 70.72 \text{ Mpa} = 70 \text{ Mpa}$
- $\tau_{tors} = M_t J_p * r$
- $J_p = \pi 32 * D^4 - d^4 = \pi 32 * 60004 - 59944 = 5.082 * 10^{11} \text{ mm}^4$
- $M_{t \text{ max}} = J_p * \tau_{amm} / r = \pi 32 * 60004 - 59944 * 706000 = 5.929 * 10^9 \text{ Nmm} = 5.929 * 10^6 \text{ Nm}$
- $\vartheta_u = M_t J_p * 1 G = 5.929 * 10^6 * 5.082 * 10^{11} * 2781 = 4.195 * 10^{-9} \text{ rad} = 2.403 * 10^{-7} \circ$
-

-
-
-
-

○ Criterio di Von Mises o Criterio della Massima Energia di Distorsione:

○ “ in un componente soggetto ad uno stato di tensione triassiale si giunge a cedimento quando la densità di energia deviatorica raggiunge un certo valore limite, caratteristico del materiale”

$$\sigma_{id VM} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)$$

○ Caratterizzando nel caso di sollecitazione piana per la flessione-torsione si ha:

$$\sigma_{id VM} = \sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2$$

○ Onde non giungere a rottura bisogna quindi che il momento flettente ed il momento torcente che sollecitano la carlinga siano tali da soddisfare l'equazione

$$\sigma_{id VM} = \sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 \leq \sigma_{amm}$$

$$\sigma_{id VM} = M_f W_f^2 + 3M_t J_p \cdot r^2$$

○ Peso delle lamine AL 2024 allo stato ricotto:

● Lamina esterna: $P = \rho \cdot V = 2.77 \cdot 0.03 \cdot 10 \cdot 20 = 16.62$ kg/pannello;

● Lamina interna: $P = \rho \cdot V = 2.77 \cdot 0.025 \cdot 10 \cdot 20 = 13.85$ kg/pannello;

○ il peso è un aspetto fondamentale negli aereomobili.

○ Ora rieseguo i calcoli con il medesimo alluminio, però preventivamente sottoposto a tempra con raffreddamento in acqua, seguito da trattamento di invecchiamento naturale ed incrudimento. Tali operazioni consentono di ottenere una resistenza a rottura doppia rispetto al materiale allo stato ricotto e quindi di dimezzare il peso a parità di prestazioni:

○ carico di rottura	○ $\sigma_r = 450$ Mpa
○ Modulo di elasticità longitudinale	○ $E = 7400$ Mpa
○ Modulo di resistenza allo scorrimento	○ $G = 2781$ Mpa
○ Densità	○ $\rho = 2.77$ kg/dm ³

○

○ Coeff di ingoranza = 2.5

$$\sigma_{amm} = \sigma_r \cdot 2.5 = 180 \text{ Mpa}$$

$$t = p \cdot R_t \cdot \sigma_t \cdot 110 = 1.3 \text{ mm}$$

○ (analisi dimensionale formula: $\text{bar} \cdot \text{mm}/\text{mm} = \text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ Mpa}$)

○ Una lamina di 1.3 mm è sufficiente per resistere allo sforzo membranale associato.

○ Assumo $t_m = 1.5 \text{ mm}$

$$\sigma_t = p \cdot R_t = 0.7815 \cdot 2988 \cdot 110 = 155 \text{ Mpa}$$

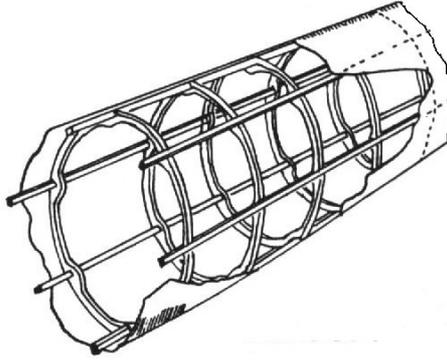
○

-
-
- Poniamo che la sollecitazione membranale sia completamente supportata dalla lamina interna del pannello sandwich.
- Ora è possibile, ponendo le dimensioni del pannello esterno, associare alla carlinga dell'aereo anche un compito strutturale associando alla carlinga stessa una resistenza alle sollecitazioni di torsione e flessione. Poiché non ho conoscenze specifiche delle sollecitazioni che si attuano in un aereo e della loro intensità pongo arbitrariamente uno spessore della lamina esterna e di esso calcolo la resistenza a torsione e flessione, dissociata l'una dall'altra.
- Per ottenere le stesse prestazioni di prima ora basta una lamina di spessore:
- test $HNT = \sigma \sigma HNT \cdot \text{test} = 225450 \cdot 3 = 1.5 \text{ mm}$
- Peso delle lamine AL 2024 HNT:
- Lamina esterna: $P = \rho \cdot V = 2.77 \cdot 0.015 \cdot 10 \cdot 20 = 8.31 \text{ kg/pannello};$
- Lamina interna: $P = \rho \cdot V = 2.77 \cdot 0.015 \cdot 10 \cdot 20 = 8.31 \text{ kg/pannello};$
- cambiando il materiale da ricotto a HNT ho un risparmio di peso di 13.85 kg, ovvero del 45%!

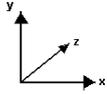
○	○ Materiale	○ spessore	○ Peso pannello	○ Coeff. sicurezza	○ M. flettente e supportabile*	○ M. torcent e supportabile*
○ Lamina esterna	○ AL 2024 HNT	○ 1.5	○ 8.31kg	○ 2.5	○ $7.785 \cdot 10^5 \text{ Nm}$	○ $5.929 \cdot 10^6 \text{ Nm}$
○ Lamina interna	○ AL 2024 HNT	○ 1.5	○ 8.31 kg	○ 2.5	○ ----- ----- ----- ----- -	○ ----- ----- ----- ----- -

-
- *:momenti supportabili singolarmente, se in copresenza rispettare teorema di Von Mises ricordato sopra.
- Il contributo di resistenza proprio dell'honeycomb in Nomex è trascurabile. Il compito dell' honeycomb in Nomex non è di portare contributo resistivo, bensì di contribuire all'aumento dell'inerzia del pannello e di attribuire al pannello stesso proprietà di isolamento termico ed elettrico, oltre che una specie di protezione ignifuga.
- Il rivestimento della carlinga oltre al compito di resistere alle sollecitazioni membranali e di attribuire alla carlinga una propria resistenza ai momenti torcenti e flettenti che si esercitano sull'aereo ha anche lo scopo, da come si evince dalla visione della figura sotto rappresentante lo "scheletro" di un aereo, di fare le veci di "fazzoletto", ovvero di chiudere i campi dell'armatura della carlinga vera e propria.

○



○



○

○

○

○

○

○ Si vede che i pannelli di rivestimento sono "montati" su di un armatura. Affinché la lamina esterna, già sollecitata ad eventuali sollecitazioni flessionali e torsionali, possa supportare anche le sollecitazioni derivanti dalla funzionalità da fazzoletto aumento lo spessore della lamina stessa di un 25 %:

○ $test\ HNT = 1 + 0.25 * test\ HNT = 1.875\ mm = 1.9\ mm$

○ L'aggravio di peso segue:

○ $Pest\ HNT' = 1 + 1.9 - 1.51.5 * Pest\ HNT = 10.525\ kg$

○ Le lamine del pannello ora sono:

○	○ materiale	○ Spessore	○ Peso pannello	○ Coeff. sicurezza	○ M. flettente e supportabile*	○ M. torcente e supportabile*
○ Lamina esterna**	○ AL 2024 HNT	○ 1.9m	○ 10.525kg	○ 2.5	○ 7.785*10 ⁵ Nm	○ 5.929*10 ⁵ Nm
○ Lamina interna	○ AL 2024 HNT	○ 1.5m	○ 8.31kg	○ 2.5	○ ----- ----- ----- -	○ ----- ----- ----- -

○

○ *:momenti supportabili singolarmente, se in copresenza rispettare teorema di Von Mises ricordato sopra;

○ **:aumento del 25% per la funzione di chiusura campi armatura;

○ Gli strati del pannello ora sono:

<input type="radio"/> Lamina esterna	<input type="radio"/> AL 2024 HNT	<input type="radio"/> 1.9 mm
<input type="radio"/> Lamina interna	<input type="radio"/> AL 2024 HNT	<input type="radio"/> 1.5mm
<input type="radio"/> Core	<input type="radio"/> Da assumere	<input type="radio"/> 8.6 mm

○

○

○ **Analisi delle deformazioni delle lamine esterna e interna quando sollecitate**○ **Lamina interna**

○ La lamina interna viene sollecitata a sforzo membranale con un $\Delta P=0.78\text{bar}$ positivo in senso radiale. La geometria cilindrica della carlinga fa sì che la sollecitazione sulla lamina interna si tramuti in trazione.

○ In senso longitudinale al pannello:

$$\circ \Delta l = \sigma E = 15574000 = 2.094 \cdot 10^{-3} = 0.002094$$

$$\circ \Delta l = l \cdot \sigma E = 15574000 \cdot 2000 = 4.189 \text{ mm}$$

○ In senso radiale alla carlinga:

$$\circ l_0 + \Delta l = 2 \cdot \pi \cdot (r + \Delta r)$$

$$\circ \Delta r = l_0 + \Delta l / 0.667 - r = 2000 + 4.1740.667 - 2988 = 16.75 \text{ mm}$$

○ La lamina interna si "gonfia" di 16.74 mm di raggio.

○ La lamina interna, gonfiandosi, porta in estensione anche la lamina esterna, anche se in misura minore a causa della deformazione dell'honeycomb.

○ Ma se anche la lamina esterna viene interessata dalla deformazione causata dal Δp allora anche la lamina esterna supporta sforzo membranale e la deformazione della lamina interna sarà minore (è quasi un processo a tentativi fino a ottenere le prestazioni volute)!

○

○

○

○ Aumento di 0.5 mm lo spessore della lamina interna in modo da contenere in maniera notevole la deformazione e quasi rendere la lamina esterna insensibile alle sollecitazioni della lamina interna

<input type="radio"/> Lamina esterna	<input type="radio"/> AL 2024 HNT	<input type="radio"/> 1.9 mm
<input type="radio"/> Lamina interna	<input type="radio"/> AL 2024 HNT	<input type="radio"/> 2.0 mm
<input type="radio"/> Core	<input type="radio"/> Da assumere	<input type="radio"/> 8.6 mm

○

$$\circ \sigma_t = p_t \cdot R_t = 0.782.0 \cdot 2989 \cdot 110 = 116 \text{ Mpa}$$

$$\circ \Delta l = \sigma E = 11674000 = 1.567 \cdot 10^{-3} = 0.001567$$

$$\circ \Delta l = l \cdot \sigma E = 11674000 \cdot 2000 = 3.135 \text{ mm}$$

○ In senso radiale alla carlinga:

$$\circ l_0 + \Delta l = 2 \cdot \pi \cdot (r + \Delta r)$$

$$\circ \Delta r = l_0 + \Delta l / 0.667 - r = 2000 + 3.1350.667 - 2989 = 14.20 \text{ mm}$$

○

○ Osservazioni:

- *La conclusione dell'analisi è che non è possibile pensare di specializzare la struttura in modo tale che la lamina interna sia sollecitata a sforzo membranale mentre la lamina esterna sia sollecitata a solo sforzo flessio-torsionale a causa delle deformazioni. Come visto durante i corsi di questa facoltà non è la resistenza la variabile più stringente, bensì la deformazione. A meno di mettere spessori della lamina interna molto notevoli non è possibile "isolare" gli sforzi nelle due lamine. Quindi con gli strumenti che ho in dotazione è possibile progettare il pannello come se sollecitato a sforzo membranale. È chiaro che sarà la lamina interna che supporterà più forze, poiché essa si deformerà, ma prima di andare ad intervenire sulla lamina esterna andrà ad intervenire sul core, il quale si deformerà. Deformandosi il core porterà la lamina interna a solleccitarsi in maniera ancor più gravosa. Però la deformazione del core è limitata, perché grande è la sua resistenza a compressione fuori dal piano, e quindi è possibile approssimare che la lamina interna lavori in contemporanea e in modo solidale con la lamina esterna.*

○

○ Dimensionamento finale:

- $P_{\text{interna}} = 1 \text{ bar}$;
- $p_{\text{esterna}} = 0.22 \text{ bar}$ (pressione atm a 10000m)
- $\Delta p = 0.78 \text{ bar}$
- raggio carlinga* = 3000mm
- (*che sia il raggio interno o il raggio esterno presumo che la differenza nel risultato del calcolo sia trascurabile)
- $\sigma_m R_m + \sigma_t R_t = p t$
- Mantello cilindrico: $R_m = \infty$
- Coeff di ingoranza = 2.5
- $\sigma_{amm} = \sigma_r 2.5 = 180 \text{ Mpa}$
- $t = p * R_t \sigma_t * 110 = 1.3 \text{ mm}$
- (analisi dimensionale formula: $\text{bar} * \text{mm} / \text{mm} = \text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ Mpa}$)
- Uno spessore (complessivo) delle laminati 1.3 mm è sufficiente per resistere allo sforzo membranale associato.
- Assumo $t = 1.5 \text{ mm}$
- $\sigma_t = p t * R_t = 0.781.5 * 2988 * 110 = 155 \text{ Mpa}$
- Per dare al pannello una funzione di fazzoletto assumo uno spessore delle lamine, interna ed esterna di 1 mm.
- $\sigma_t = p t * R_t = 0.782.0 * 2988 * 110 = 116 \text{ Mpa}$

○	○ Materiale	○ Spessore	○ Peso
○ Lamina esterna	○ AL 2024 HNT	○ 1.0 mm	○ 5.54 kg/lamina
○ Lamina interna	○ AL 2024 HNT	○ 1.0 mm	○ 5.54 kg/lamina
○ Core	○ Da assumere	○ 10 mm	○

○

- In tal modo la sollecitazione membranale è limitata a 116 Mpa ed il pannello ha una resistenza residua di almeno 64 Mpa. Ripetendo Von Mises:
- Criterio di Von Mises o Criterio della Massima Energia di Distorsione:
- “ in un componente soggetto ad uno stato di tensione triassiale si giunge a cedimento quando la densità di energia deviatorica raggiunge un certo valore limite, caratteristico del materiale”

$$\sigma_{id\ VM} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \leq \sigma_{residua}$$

- Caratterizzando nel caso di sollecitazione piana per la flessione-torsione si ha:

$$\sigma_{id\ VM} = \sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 \leq \sigma_{residua}$$

- Dove $\sigma_{residua} = \sigma_{r2.5} - \sigma_t = 4502.5 - 116 = 64 \text{ Mpa}$

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

○ Scelta del core in honeycomb di Nomex

- Per l'assunzione dello strato di honeycomb in Nomex bisogna calcolare lo stato tensionale che viene trasmesso dalla lamina interna all'honeycomb e dall'honeycomb alla lamina esterna. infatti quando ho calcolato lo spessore della lamina ho calcolato come se la lamina interna e la lamina esterna fossero solidali, invece tra di loro si interpone l'honeycomb. La lamina interna oppone una certa resistenza membranale e si appoggia, per la quota di tensione non sopportata dal materiale, allo strato honeycomb, in modo da trasferire la quota di tensione non sopportata dalla lamina interna alla lamina esterna.
- $T_{int} = 1 \text{ mm}$
- $\sigma_{t\ int} = 116 \text{ Mpa}$
- quota di pressione supportata dalla lamina interna:
- $p_{sli} = t_i \cdot \sigma_t \cdot \int_{int} R_t \cdot 10 = 1 \cdot 1162988.5 \cdot 10 = 0.3881 \text{ bar}$
- $\text{mm} \cdot \text{Mpa} / \text{mm} = \text{Mpa} = 10 \cdot \text{Bar}$
- la lamina esterna quindi supporta:
- $p_{sle} = t_e \cdot \sigma_t \cdot \int_{est} R_t \cdot 10 = 1 \cdot 1162998 \cdot 10 = 0.3868 \text{ bar}$
- Come è logico che sia $p_{sli} \approx p_{sle}$ (la differenza è dovuta al raggio diverso).

- Trovo ora la deformazione della lamina interna, la deformazione della lamina esterna , da cui facendo la differenza trovo di quanto deve deformarsi il "nido d'ape", e avendo la sollecitazione su di esso trovo il modulo di resistenza a compressione.
- $E_{2024\ HNT} = 74000\ \text{Mpa}$
- $\sigma_{\text{lamina}} = 116\ \text{Mpa}$
- deformazione longitudinale lamine:
- $\Delta l_i = \Delta l_e = \sigma t E_{2024\ HNT} \cdot l = 11674000 \cdot 2000 = 3.135\ \text{mm}$
- Deformazione radiale cilindro interno e cilindro esterno:
- $\Delta r = l_0 + \Delta l \vartheta - r$
- ϑ = angolo sotteso dal settore formato dal pannello
- $\vartheta_{\text{int}} = 0.66895$ $\vartheta_{\text{est}} = 0.66687$
- $\Delta r_i = 5.94\ \text{mm}$ $\Delta r_{\text{est}} = 4.255\ \text{mm}$
- La deformazione fuori dal piano dell'honeycomb è quindi di 1.691mm
- Affinchè le lamine lavorino insieme è necessario che il core abbia un modulo a schiacciamento di almeno:
- $E = \sigma \cdot t \Delta t = 0.0387 \cdot 121.619 = 0.28\ \text{Mpa}$
- Se avesse modulo inferiore le lamiere lavorerebbero svincolate.
- Tutti gli honeycomb hanno modulo a compressione maggiore di un fattore almeno 100!
-
- Le caratteristiche richieste sono quasi ridicole, si punta quindi all'honeycomb più di densità inferiore.
- Il core in honeycomb di Nomex non ha funzioni strutturali. Esso ha la funzione di isolamento termico, elettrico e di protezione in caso di incidente con sviluppo di fiamme all'esterno.
- Tabella comparativa degli honeycomb in Nomex di densità inferiore*

○ P r o d .	○ De ○ Kg	○ Prod otto	○ A C	○ Compressione			○ Taglio in direzione L		○ Taglio in direzione W	
				○ R e s . M . S c o p . [M P a]	○ R e s . M . S t a b . [M P a]	○ M . [○ R e s i s t e n z a . [M P a]	○ M o . [M	○ R e s i s t e n z a . [M P a]	○ M o . [M
○ H e x c	○ 2	○ HR H- 78	○ C	○ 0 . 5 8	○ 0 . 6 5	○ 4	○ 0 . 4 1	○ 1	○ 0.2	○ 1

el c o m p o s i t e s	3/8		7		5		3					
		○ 48	○ HRH -781 1/4	○ C	○ 1 . 8 2 9	○ 1 . 9 6 4	○ 1	○ 0 . 8 2 7	○ 31.	○ 0.55	○ 20	
○ A m b e r c o m p o s i t e s	○ 32	○ ANC 14.8	○ C	○	○ 1 . 2 0	○ 7	○ 0 . 7 0	○ 29	○ 0.40	○ 19		
	○ 48	○ ANC 14.8	○ C	○	○ 2 . 4 0	○ 1	○ 1. 2 0	○ 40	○ 0.70	○ 25		
○ C M L	○ 26	○ 3.2- 64	○ C	○ 3 . 8 4	○	○	○ 2 . 4 8	○ 13	○ 1.43	○ 67		
	○ 26	○ 3.2- 32	○ C	○ 0 . 9 8	○	○	○ 0 . 8 4	○ 80	○ 0.52	○ 39		
	○ 26	○ 4.8- 37	○ C	○ 1 . 4 5	○	○	○ 1. 2 8	○ 89	○ 0.63	○ 41		
	○ 35	○ 4.8- 48	○ C	○ 2 . 2	○	○	○ 1. 6 3	○ 11	○ 0.91	○ 59		
○ A H T	○ 24	○ AHN 4120 11/4	○ A	○ 0 . 3 1 0	○ 0 . 3 7 2	○	○ 0 . 3 1 0	○ 14.	○ 0.15	○ 8.		
	○ 32	○ AHN 4120 11/4	○ A	○ 0 . 5 5 1	○ 0 . 7 2 3	○	○ 0 . 4 9 6	○ 15.	○ 0.26	○ 12.		
	○ 24	○ AHN 4120 13/8	○ A	○ 0 . 3 1 0	○ 0 . 3 7 9	○	○ 0 . 3 1 0	○ 14.	○ 0.15	○ 6.		
	○ 32	○ AHN 4120 13/8	○ A	○ 0 . 5 5 1	○ 0 . 7 2 3	○	○ 0 . 4 9 6	○ 15.	○ 0.24	○ 8.		
	○ 32	○ AHN 7800 1 3/16	○ C	○ 0 . 8 0 6	○ 0 . 8 9 6	○	○ 0 . 4 9 6	○	○ 0.27	○		
	○ 24	○ AHN 7800 01 3/8	○ C	○ 0 . 5 1	○ 0 . 5 8	○	○ 0 . 3 4	○	○ 0.17	○		

				7	6		5			
○ E u r o C o m p o s i t e s	○ 29	○ ECA 13.2	○ A	○ 0 . 5 4	○	○	○ 0 . 5 2	○ 22	○ 0.28	○ 12
	○ 29	○ ECA 14.0	○ A	○ 0 . 6 0	○	○	○ 0 . 4 5	○ 18	○ 0.26	○ 11
	○ 24	○ ECA 19.6	○ A	○ 0 . 5 2	○	○	○ 0 . 3 2	○ 13	○ 0.16	○ 9
	○ 24	○ ECA I 19.2	○ A	○ 0 . 5 0	○	○	○ 0 . 5 0	○ 11	○ 0.22	○ 9
	○ 29	○ ECA -II 4.0	○ C	○ 0 . 6 0	○	○	○ 0 . 4 5		○ 0.26	○
	○ 32	○ ECA -II 0.90	○ C	○ 0 . 5 8	○	○	○ 0 . 5 8		○ 0.36	○
	○ 24	○ ECA -II 6.4	○ C	○ 0 . 5 4	○	○	○ 0 . 3 4		○ 0.30	○
	○ 32	○ ECA -II 6.4	○ C	○ 0 . 8 0	○	○	○ 0 . 5 4		○ 0.30	○
	○ 32	○ ECA -II 9.6	○ C	○ 0 . 6 8	○	○	○ 0 . 5 6		○ 0.29	○
○ I. M a - T e c h	○ 24	○ CI 3/8	○ C	○ 0 . 6 2	○	○ 4	○ 0 . 4 1 3	○ 17.	○ 0.22	○ 10.
	○ 28	○ AI 1/8	○ A	○ 0 . 7 5 8	○	○ 5	○ 0 . 5 8 6	○ 26	○ 0.31	○ 10.

○

○ Assumo:

○ P r o d .	○ De ○ Kg	○ Prod otto	○ A/C	○ Compressione			○ Taglio in direzione L		○ Taglio in direzione W	
				○ R e s . M . S c o p .	○ R e s . M . S t a b	○ M . [○ R e s i s t e n z a ○ [M P	○ Mo ○ [MPa	○ Mo ○ [M	

				○ [M P a]	○ [M P a]		a]			
○ H e x c e l l c o m p o s i t e s	○ 2	○ HR H- 78 3/8	○ C	○ 0 . 5 8 7	○ 0 . 6 5 5	○ 4	○ 0 . 4 1 3	○ 1	○ 0.2	○ 1

-
-
-
-
-
-

○ **Analisi caratteristiche non strutturali honeycomb :**

○ Caratteristiche di isolamento elettrico honeycomb (adattamento per spessore pareti=0.05mm)

○ Caratteristiche elettriche carta di Nomex

○ Spessore nominale	○ m	○ 0,05	○ Normativa
○ Spessore medio	○ m	○ 0,06	○ ASTM D374
○ Resistenza rapida impulso elettrico	○ k	○ 39	○ ASTM D149
○ Resistenza impulso elettrico	○ k	○ 39	○ ASTM D3426
○ Costante dialettica a 60 hz	○ l	○ 1,6	○ ASTM D150

-

- Per vedere le caratteristiche di isolamento elettrico bisogna però analizzare anche la resina che ricopre le pareti dell'honeycomb, nel caso di honeycomb in Nomex la resina fenolica:

○ Resistenza ad impulso elettrico	○ kV/mm	○ 12-40
○ Costante dielettrica	○ 10^6 cps	○ 3.6-6
○ Fattore dissipazione	○	○ 0.02-0.08

○

- Cps: centipoises = 1/100 poises ; 1 cps=1/10 Pa*s. la resina essendo un polimero ha proprietà termiche ed elettriche che dipendono dal volume libero specifico che può essere espresso relativamente alla Tg (temperatura di transizione vetrosa) oppure in base alla viscosità. La costante dielettrica relativa in tabella viene fornito al valore di riferimento della viscosità di 10^6 cps.

- Dato che la costante dielettrica del Nomex è inferiore a quella della resina fenolica prendo come costante dielettrica la costante propria del Nomex.

○ Caratteristiche termiche honeycomb

○ Caratteristica termica	○ Normativa	○ Valore
○ Temperatura massima di servizio continuativo	○	○ 175°C
○ Temperatura massima di servizio per brevi periodi	○	○ Dipendente dalla tipologia di resina fenolica
○ Conducibilità termica	○	○ Bassa
○ Temperatura di carbonizzazione dell'honeycomb	○	○ 177°C* ○ 435°C**
○ Limiting Oxygen Index	○ ASTM D2863	○ 28
○ Calore di combustione	○ ASTM D2015	○ 2.8×10^6 J/kg
○ Calore specifico	○	○ 0.30 cal/kg°C

○

- *: temperatura di degrado della resina fenolica;

- **: temperatura di carbonizzazione del Nomex;

- la temperatura massima di servizio di 175°C è oltremodo superiore alla temperatura normale di utilizzo dell'honeycomb nei pannelli di ricopertura.

- La conducibilità termica del pannello honeycomb è molto limitata . Posso supporre che essa valga un valore mediano tra la conducibilità termica del nomex: 103 mW/mK e quella della resina fenolica che ne ricopre le pareti. L'aspetto da non sottovalutare è che la conducibilità termica varia con il variare della temperatura:

○ -	○ -	○ -	○ -	○ 0	○ 2	○ 5	○ 7
○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0

○

- A temperature di utilizzo normale dei pannelli nelle carlinghe (-15°C, +30°C) esso vale circa 0.03 W/mK=30mW/mK.

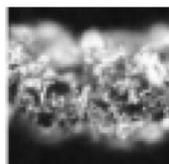
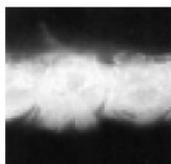
- Il valore supposto è quindi 45 mW/mK, un valore molto basso.

○ Materiale	○ W/mK	○ mW/mK
○ Polietilene	○ 0.04	○ 40
○ Polistirene	○ 0.035	○ 35
○ Lana di roccia	○ 0.04	○ 40

<input type="radio"/> Acciaio	<input type="radio"/> 60	<input type="radio"/> 60000
<input type="radio"/> Rame	<input type="radio"/> 380	<input type="radio"/> 380000
<input type="radio"/> Alluminio	<input type="radio"/> 200	<input type="radio"/> 200000

○

- Quindi la conducibilità termica di un honeycomb in nomex rispetto ad un honeycomb in alluminio è 5000 volte inferiore!
- Il LOI di 28 significa che se il pannello viene sottoposto a fiamma libera esso va in combustione, e tale combustione smette non appena la fiamma esterna viene meno.
- Il "potere calorifico" o **calore di combustione** esprime la quantità massima di calore che si può ricavare dalla combustione completa di 1 kg di sostanza combustibile (o 1 m³ di gas) a 0 °C e 1 atm.
- Il calore di combustione dell'honeycomb in Nomex è molto contenuto, ciò significa che se esso si accende, e ciò avviene solo sotto l'azione di una fiamma diretta sull'honeycomb, esso emette una quantità limitata di calore durante la sua combustione.
- Il LOI, la conducibilità termica e il calore di combustione di valori molto bassi significano che l'honeycomb in Nomex è adatto a lavorare, come per l'honeycomb in tessuto, in ambienti dove possono svilupparsi temperature molto elevate o molto basse, contenendo e limitando se necessario il trasferimento di calore tra i vari ambienti in cui esso è interposto come divisorio. Bisogna inoltre ricordare che durante l'eventuale degradazione del nomex in seguito all'esposizione a temperature molto elevate la conducibilità termica decade in maniera notevole.



- *Ingrandimento che evidenzia l'ispessimento e il compattamento delle fibre di nomex con il degrado in seguito ad esposizione ad alte temperature.*

○

○

○ **Infiammabilità a 60 sec di esposizione alla fiamma metodo BSS 7230**

○ Dimensione celle	○ M m	○ 3 , 1 7 5	○ 4 . 7 6 2	○ 4 , 7 6 2	○ 3 , 2 7 5	○ 3 , 1 7 5	○ 3 , 1 7 5
○ Dimensione celle	○ In c h	○ 1 / 8	○ 3 / 1 6	○ 3 / 1 6	○ 1/ 8	○ 1 / 8	○ 1/ 8
○ Densità	○ K g / m ³	○ 12 8 . 1 4 9	○ 14 4 . 1 6 8	○ 9 6 . 1 3	○ 2 8 . 8 3 4	○ 4 8 . 0 5 6	○ 6 4 . 0 7 5
○ Tempo autoestinguimento	○ S	○ 1, 3	○ 0, 1	○ 1, 9	○ 0, 1	○ 1, 6	○ 1, 1
○ Lunghezza della fiamma	○ M m	○ 7 4	○ 13	○ 41	○ 2 5	○ 4 8	○ 6 9
○ Tempo di fine gocciolamento	○ S	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0	○ 0

○

-
-
-
-
-
-

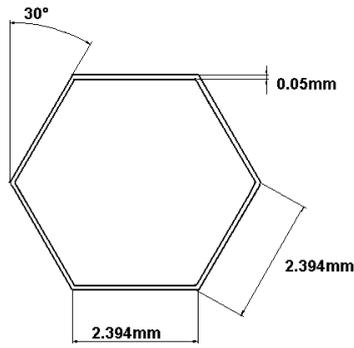
○ Assunzione del pannello Honeycomb in Nomex

- Altezza honeycomb =2000mm
- Larghezza honeycomb=1000mm
- Spessore honeycomb =10mm
- Assunzione delle celle :

○ materiale base: carta Nomex	○ Tipologia celle: esagonale	○ Produttore: Hexcel composites					○ Tipologia prodotti: commerciale				
○ Designazione	○ De	○ Sollecitazione di	○ compressione			○ Sollecitazione di	○ direzione		○ Sollecitazione di	○ direzione	
○ Mat dim celle [in]	○	○ R	○ R	○ Mo	○ R	○ Mo	○ R	○ Mo	○ R	○ Mo	
○ U.M	○ kg	○ M	○ M	○ Mp	○ M	○ Mp	○ M	○ Mp	○ M	○ Mp	
○ HRH-78 3/8	○ 24	○ 0	○ 0	○ 41.	○ 0	○ 17.	○ 0	○ 10.	○ 0	○ 10.	
		○ .	○ .	○ .	○ .	○ .	○ .	○ .	○ .	○ .	
		○ 5	○ 6	○ 4	○ 1	○ 2	○ 2	○ 2	○ 2	○ 2	
		○ 8	○ 5	○ 1	○ 2	○ 2	○ 2	○ 2	○ 2	○ 2	
		○ 7	○ 5	○ 3	○ 3	○ 7	○ 7	○ 7	○ 7	○ 7	

○

○ Peso honeycomb = 4.8 kg/pannello



○ Geometria della cella:

○ area della cella : 6.5476mm²

○ spessore pareti cellulari: 0.05mm

○ altezza della cella: 10 mm

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

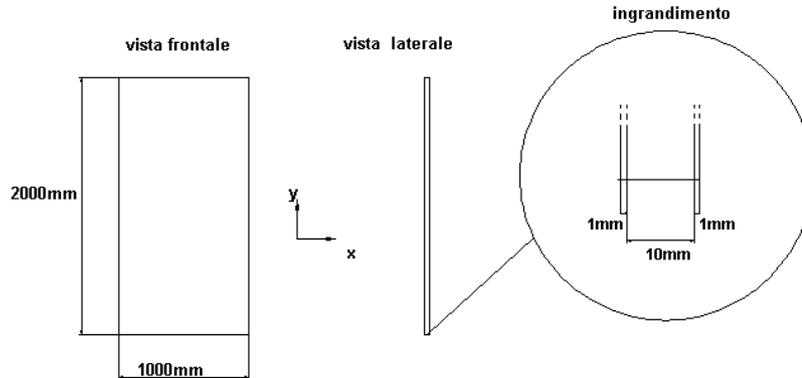
○

○ **SCHEDA RIASSUNTIVA DELLE CARATTERISTICHE DEL CORE PANNELLO CARLINGA**

1) **Geometria pannello**

○ Altezza	○ 2000 mm
○ Larghezza	○ 1000 mm
○ Spessore	○ 12 mm

<input type="radio"/> Peso	<input type="radio"/> 15.88kg
----------------------------	-------------------------------

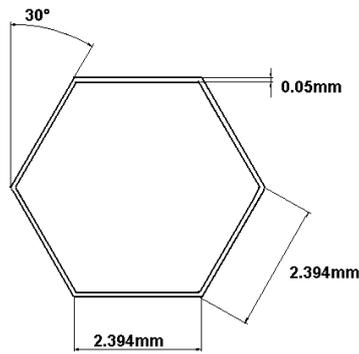


2) Tipologia celle

<input type="radio"/> materiale base: <input type="radio"/> carta Nomex	<input type="radio"/> Tipologia celle: <input type="radio"/> esagonale	<input type="radio"/> Produttore: Hexcel composites	<input type="radio"/> Tipologia prodotti: <input type="radio"/> commerciale					
<input type="radio"/> Designazione	<input type="radio"/> De	<input type="radio"/> Sollecitazione di compressione	<input type="radio"/> Sollecitazione di taglio direzione L	<input type="radio"/> Sollecitazione di taglio direzione W				
<input type="radio"/> Mat dim celle [in]	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> R e s i s t e n z a m a t e r i a l e s c o p e r t o	<input type="radio"/> R e s i s t e n z a m a t e r i a l e s t a b i l i z a t o	<input type="radio"/> Mo	<input type="radio"/> R e s i s t e n z a	<input type="radio"/> Mo		
<input type="radio"/> U.M	<input type="radio"/> kg	<input type="radio"/> M p a	<input type="radio"/> M p a	<input type="radio"/> Mp	<input type="radio"/> M p a	<input type="radio"/> Mp	<input type="radio"/> M P a	<input type="radio"/> Mp
<input type="radio"/> HRH-78 3/8	<input type="radio"/> 24	<input type="radio"/> 0 . 5 8 7	<input type="radio"/> 0 . 6 5 5	<input type="radio"/> 41.	<input type="radio"/> 0 . 4 1 3	<input type="radio"/> 17.	<input type="radio"/> 0 . 2 2 7	<input type="radio"/> 10.

3) Geometria celle:

○

○ area della cella : 12mm²

○ spessore pareti cellulari: 0.05mm

○ profondità della cella: 10mm

○

○

○

○

○

○

○

○

4) Caratteristiche termiche

○ Caratteristica termica	○ Normativa	○ Valore
○ Temperatura massima di servizio continuativo	○	○ 175°C
○ Temperatura massima di servizio per brevi periodi	○	○ Dipendente dalla tipologia di resina fenolica
○ Conducibilità termica	○	○ Bassa
○ Temperatura di carbonizzazione dell'honeycomb	○	○ 177°C* ○ 435°C**
○ Limiting Oxygen Index	○ ASTM D2863	○ 28
○ Calore di combustione	○ ASTM D2015	○ 2.8x10 ⁶ J/kg
○ Calore specifico	○	○ 0.30 cal/kg°C

○

5) Caratteristiche elettriche

○ Spessore nominale	○ m	○ 0.05	○ Normativa
○ Spessore medio	○ m	○ 0.06	○ ASTM D374

<input type="radio"/> Resistenza rapida impulso elettrico	<input type="radio"/> k	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> ASTM D149
<input type="radio"/> Resistenza impulso elettrico	<input type="radio"/> k	<input type="radio"/> 39	<input type="radio"/> ASTM D3426
<input type="radio"/> Costante dielettrica a 60 hz	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1.6	<input type="radio"/> ASTM D150

○

6) Infiammabilità a 60 sec di esposizione alla fiamma metodo BSS 7230

<input type="radio"/> Dimensione celle	<input type="radio"/> M m	<input type="radio"/> 3 , 1 7 5
<input type="radio"/> Dimensione celle	<input type="radio"/> In c h	<input type="radio"/> 1/ 8
<input type="radio"/> Densità	<input type="radio"/> K g / m ³	<input type="radio"/> 4 8 . 0 5 6
<input type="radio"/> Tempo autoestinguinto	<input type="radio"/> s	<input type="radio"/> 1. 6
<input type="radio"/> Lunghezza della fiamma	<input type="radio"/> m m	<input type="radio"/> 4 8
<input type="radio"/> Tempo di fine gocciolamento	<input type="radio"/> s	<input type="radio"/> 0

○

7) Riassunto normative e prove

<input type="radio"/> Oggetto della verifica	<input type="radio"/> Normativa MIL_STD	<input type="radio"/> Normativa ASTM
<input type="radio"/> Densità e spessore	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> ASTM C366-ASTM C271
<input type="radio"/> Resistenza alla compressione normale al piano	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> ASTM C365
<input type="radio"/> Resistenza alla compressione longitudinale al piano	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> ASTM C364
<input type="radio"/> Resistenza al taglio	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Resistenza al taglio in direzione L e W	<input type="radio"/> C-7438 C-8037	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Resistenza alla flessione	<input type="radio"/> 401B sec 5.2.4	<input type="radio"/> ASTM C393
<input type="radio"/> Resistenza alla trazione	<input type="radio"/> 401B sec 5.2.4	<input type="radio"/> ASTM C297

○

○

○

○

○

○ SCHEDA RISSUNTIVA LAMINE DEL PANNELLO CARLINGA

○ Geometria lamine

○ Altezza	○ 2000mm
○ Larghezza	○ 1000mm
○ Materiale lamine	○ AL 2024 HNT
○ Spessore lamina esterna	○ 1.0mm
○ Peso lamina esterna	○ 5.52 kg
○ Spessore lamina interna	○ 1.0mm
○ Peso lamina interna	○ 5.54 kg
○ Raggio di curvatura delle lamine*	○ 3000mm
○ Angolo settore sotteso dalle lamine	○ 38°

○

○ Materiale lamine:

○ tipologia	○ Designazione convenzionale	○ Designazione futura	○ Stato di fornitura	○ prodotto
○ Alluminio ○ Rame ○ Magnesio ○ Manganese	○ P-AlCu 4.5 MgMn ○ UNI 3583	○ UNI 9002/4	○ -Tempra di soluzione, raffreddamento in acqua ○ -Invecchiamento naturale ○ -Incrudito ○	○ Laminato
○				
○ Caratteristiche meccaniche			○ Modulo di elasticità longitudinale [MPa]	○ Massa Volumica
○ Carico di rottura ○ [MPa]	○ Allungamento %	○ Durezza HB		○ Kg/dm ³
○ 450	○ 16	○ 18	○ 74000	○ 2.77

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○ **BIBLIOGRAFIA**

○

- Analisi della lamina ortotropa e teoria classica dei laminati (Ing. PHD Rosario Pecora)
- Cellular Solids, Structure and properties-Second Edition- Lorna J.Gibson and Michael F.Ashby-Cambridge Solid State Science Series;
- Disegno, progettazione e organizzazione industriale- S.L.Straneo,R.Consorti;
- Dispensa Honeycomb Hexcell composites;
- Dispensa PlastCore-Aerospace;
- Dispensa Sandwich diab-Sandwich handbook;
- Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design, 3rd Edition-P.K.Mallic-Department of Mechanical Engineering University of Michigan-Dearborn, Michigan;
- Hexweb Sand Design;
- Introduction to cores-Alcan Composites Core Materials 2009;
- Kevlar Technical Guide-DuPont;
- Manuale Cremonese di meccanica- parte specialistica;
- Nomex Technical Guide-DuPont;
- Quaderno fibre tessitura-Autore Sconosciuto;
- Tesi di laurea Carlo Andreotti;
- Tesi di laurea DeLeo Corrado-Ferrero Paolo;
- Brevetti :United States Patent
 - NO. 6544622 B1 Aramid honeycomb and design and a method for producing the same;
 - NO. 3887418 Honeycomb product and process for manufacture;
 - NO. 3366525 Method of making thermoplastic honeycomb;
 - NO.299788 Syntetic polymer fibrid paper;
 - NO.5026456 Aramid paper containig aramid paper pulp;
 - NO.3756908 Syntetic paper structures of aromatic polyamides;
 - NO. 4569884 Sheet material, process for its production and its use in the production of a composite structure;

- Innumerevoli siti che non stò ad elencare per parti di modesta entità.

- Elenco alcuni siti da cui ho tratto ispirazione:

- Ahtinv.com
- Ambercomposites.com
- Azon.com
- Cell.eu
- Compositesmaterials.com
- Corecomposites.com
- Dupont.com
- Fibermaxcomposites.com
- Freshpatents.com
- Hexcell.com
- Huntsman.com
- Imatech.it
- Plastcore.com

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○

○