

matricola n°:
463459

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe: L-9

Sede di Forlì
ELABORATO FINALE DI LAUREA
in
TECNOLOGIA DELLE COSTRUZIONI AERONAUTICHE

**"SIMULAZIONE NUMERICA DI GIUNZIONI INCOLLATE
IN MATERIALI COMPOSITI:
VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI BORDO"**

CANDIDATO
Paolo Grasso

RELATORE
Prof. Ing. Enrico Troiani

Anno Accademico 2011/2012
Sessione III

SOMMARIO

Nel presente lavoro di tesi viene sviluppato uno studio numerico, tramite metodo agli elementi finiti (FEM), sull'effetto di bordo in giunti incollati a sovrapposizione semplice (unsupported single-lap joints). E' stata implementata l'analisi numerica di provini standard da normativa relativa a test sperimentali, per giunzioni tra lamine metalliche e tra materiali compositi in fibre di carbonio/matrice epossidica (CFRP). E' stato cercata la geometria del bordo dello strato adesivo che potrebbe garantire una maggiore resistenza del giunto.

PAROLE CHIAVE

incollaggi
single-lap joint
effetto di bordo
composito
CFRP
analisi numerica
FEM

INDICE

	pag.
1 INTRODUZIONE	4
2 GIUNZIONI INCOLLATE	6
2.1 INCOLLAGGI	6
2.2 ANALISI SEMPLICE GIUNTO INCOLLATO	10
3 SIMULAZIONE NUMERICA DI GIUNTI INCOLLATI	14
3.1 MODELLO FEM	14
3.1.1 Geometria del giunto	15
3.1.2 Proprietà dei materiali	17
3.1.3 Scelta della Mesh	18
3.1.4 Vincoli e carichi	20
3.1.5 Risultati preliminari per provini in acciaio	20
3.2 DESCRIZIONE ANALISI	22
4 RISULTATI	23
4.1 LAMINE IN ALLUMINIO	23
4.2 LAMINE IN CFRP	27
4.3 ALLUMINIO VS. CFRP	30
5 CONCLUSIONI	32
APPENDICE A: TABELLE DATI	33
BIBLIOGRAFIA	48

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni c'è stato lo sviluppo e un maggiore utilizzo di materiali compositi, soprattutto nell'industria aerospaziale. L'innovazione verte anche sul fatto di sostituire i tradizionali giunti rivettati con giunti incollati. Questi collegamenti consistono nell'interporre fra le due parti da assemblare un sottilissimo strato di materiale adesivo che, sotto particolari condizioni, indurisce creando un collegamento permanente. La scelta di questa tecnologia è giustificata da vari fattori positivi fra i quali la riduzione del peso, la riduzione del costo dei materiali e della manodopera e la compattezza della struttura risultante. Attualmente vengono spesso realizzati in composito le superfici di controllo dell'aeromobile ed alcune parti della fusoliera, utilizzando anche collegamenti incollati ma assicurati da rivetti. Nell'immediato futuro si prospetta di realizzare aeromobili dove le strutture realizzate in composito superano il 50% del volume totale. Un esempio è il modello A350-900 XWB dell'Airbus che sarà costituito dal 52% di materiale composito, dal 20% di leghe di alluminio, dal 14% di titanio e dal 7% di acciaio.

Essendo molto interessato all'ambito delle costruzioni aeronautiche e più in particolare all'innovazione tecnologica che può rivoluzionare i criteri progettuali di tali strutture, ho voluto approfondire l'argomento. Grazie alla disponibilità del professor Enrico Troiani ho trascorso un periodo di tirocinio, funzionale al lavoro di tesi, presso i laboratori didattici. Il precedente lavoro è consistito in: uno studio approfondito del comportamento meccanico dei materiali compositi e dei giunti incollati, una ricerca bibliografica di studi già svolti per comprendere lo stato dell'arte e lo studio di un software per la simulazione agli elementi finiti (FEM). Durante la ricerca bibliografica abbiamo notato il report "Numerical stress analysis of carbon-fiber-reinforced epoxy composite single-lap joints" (F.L.Ribeiro, L.Borges e J.R.M.d'Almeida, doc.15) riguardante uno studio dell'effetto di bordo dello strato adesivo sulla resistenza di un incollaggio in presenza di un difetto interno. Dal documento si evince che variando la forma del bordo varia la distribuzione dei carichi e di conseguenza la resistenza del giunto. Il problema è stato quindi affrontato in modo semplificato, cioè senza applicare il difetto interno. E' stato utilizzato un software commerciale per l'analisi FEM, modellando un giunto standard ("Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading" doc.14) con una griglia completamente tridimensionale (*full 3D modelling*) al fine di confrontare i risultati con quelli ottenuti con le analisi 2D di Ribeiro, Borges e d'Almeida, i cui risultati mostrano come si ottengono prestazioni migliori con un bordo convesso.

Nelle pagine seguenti saranno inizialmente spiegate le nozioni principali riguardo: le problematiche generali degli incollaggi; lo studio analitico di un *'unsupported-*

single-lap joint' (giunto a sovrapposizione semplice); in che cosa consiste l'effetto di bordo e il metodo FEM. Segue un esempio di analisi che affianca una descrizione dell'impostazione adottata per l'analisi (geometria, materiali, mesh, vincoli e carichi) e successivamente saranno presentati i risultati numerici.

2 GIUNZIONI INCOLLATE

2.1 INCOLLAGGI

Gli assemblaggi tramite incollaggio sono più economici rispetto a quelli eseguiti con collegamenti convenzionali. Tuttavia gli incollaggi sono dei collegamenti critici perché basta un piccolo difetto per provocare un crollo drastico delle prestazioni meccaniche. Esigono molti accorgimenti per garantire una buona presa. L'affidabilità di questa tipologia di giunto è strettamente legata all'accuratezza con la quale si seguono le varie fasi del processo di incollaggio.

In primis è di fondamentale importanza la scelta della configurazione dell'assemblaggio. Poiché l'adesivo è molto resistente agli sforzi di taglio ed è scarsamente resistente a sforzi normali trasversali, si cerca di evitare asimmetrie nella geometria e dislocazioni nell'applicazione dei carichi, che potrebbero causare momenti flettenti e indurre il peel stress.

Il secondo passo è la scelta dell'adesivo più adatto e che rientri nelle proprie disponibilità impiantistiche ed economiche; che resista alle condizioni ambientali operative e che sia compatibile col materiale di cui sono fatti gli aderenti.

Terza fase da non sottovalutare è la preparazione superficiale della zona di sovrapposizione delle parti da incollare.

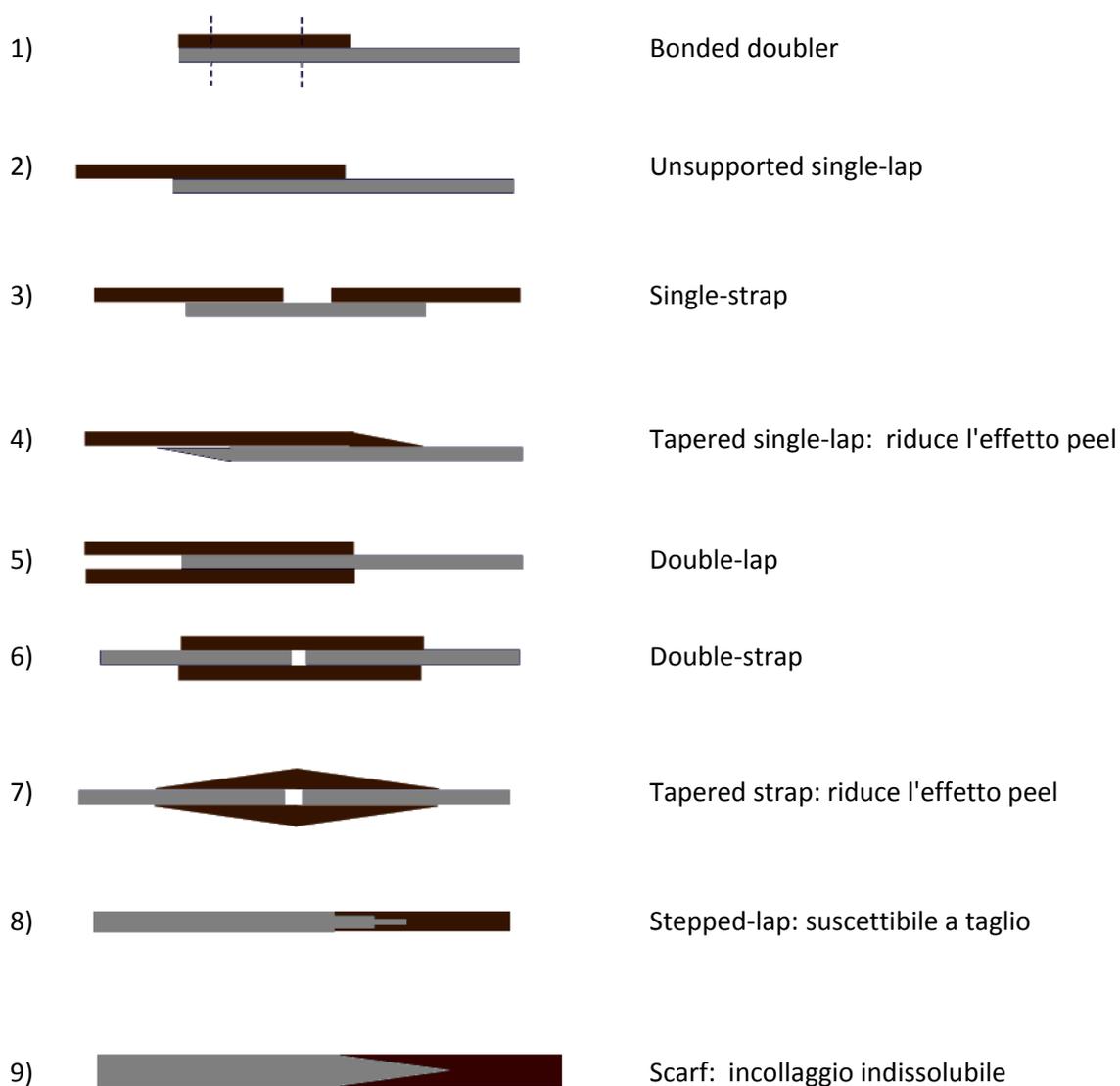
Il momento più delicato è quello della costruzione del giunto che comprende l'applicazione della colla e il controllo del processo di indurimento. Quest'ultimo può essere più o meno dilazionato, il che impone una rigida scansione temporale del processo di assemblaggio.

Quinto e ultimo passaggio è la verifica dell'affidabilità del giunto tramite controlli distruttivi di alcuni campioni.

Qui di seguito vedremo più in dettaglio alcuni problemi sopracitati.

L'effetto configurazione del giunto consiste nella differente distribuzione dei carichi indotta dalla geometria dell'assemblaggio. Il progetto di quest'ultimo è incentrato sull'evitare momenti flettenti che determinerebbero la pelatura dello strato adesivo. Nella figura 2.1 ci sono alcuni esempi di giunti incollati.

fig. 2.1: Varie tipologie di giunzioni



Nel grafico di *fig. 2.2* sono confrontate le resistenze degli incollaggi in funzione dello spessore degli aderenti. Si nota come le soluzioni con i gradini e con la scanalatura sono le più resistenti, infatti oltre a bloccare il 'peel', riescono a trasferire idealmente il carico da una aderente all'altro senza la concentrazione di sforzi di taglio. Ma sono tecnologicamente più complicati da realizzare perché basta un incorretto angolo della scanalatura per compromettere la resistenza del giunto.

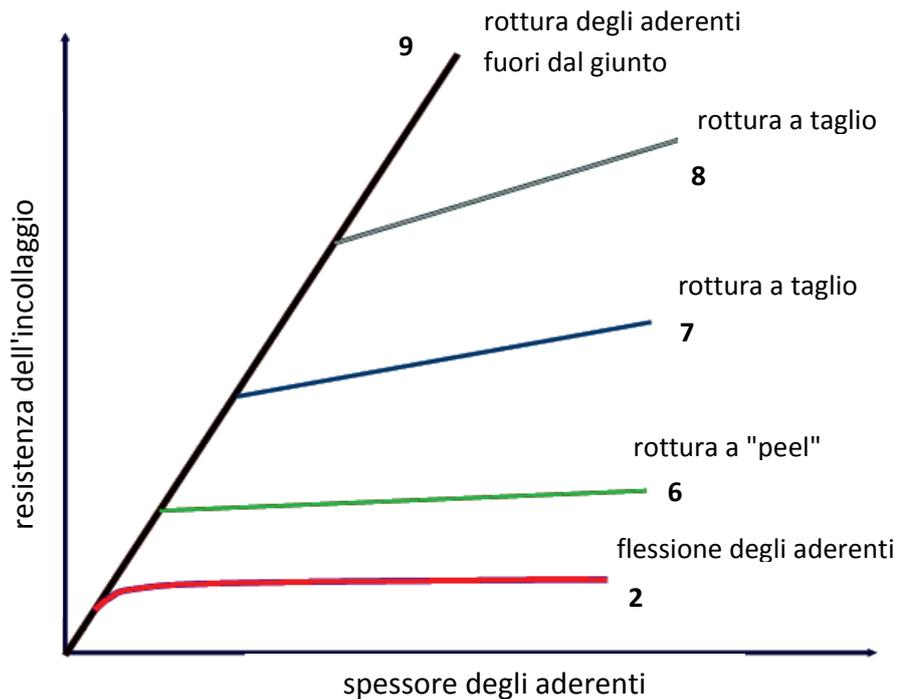


fig. 2.2: Resistenza a trazione delle diverse tipologie di giunzioni

Per la nostra analisi utilizzeremo la configurazione numero 2, giunto a sovrapposizione semplice, consci del fatto che l'effetto peel non è indotto soltanto dalla deformazione della struttura ma è anche derivato dalla eccentricità del carico applicato.

Anche la *preparazione della superficie* ha un importante impatto sulla resistenza del giunto. Questa caratteristica è chiamata 'surface wettability' (capacità di impregnarsi) che dipende da vari fattori:

- compatibilità chimica fra aderenti e adesivo;
- ruvidità e pulizia della superficie;

Nella figura 2.3 è mostrato come le proprietà chimiche dei materiali condizionano la 'wettability'. L'ultimo diventerebbe un incollaggio veramente molto debole perché la superficie respinge l'adesivo epossidico.

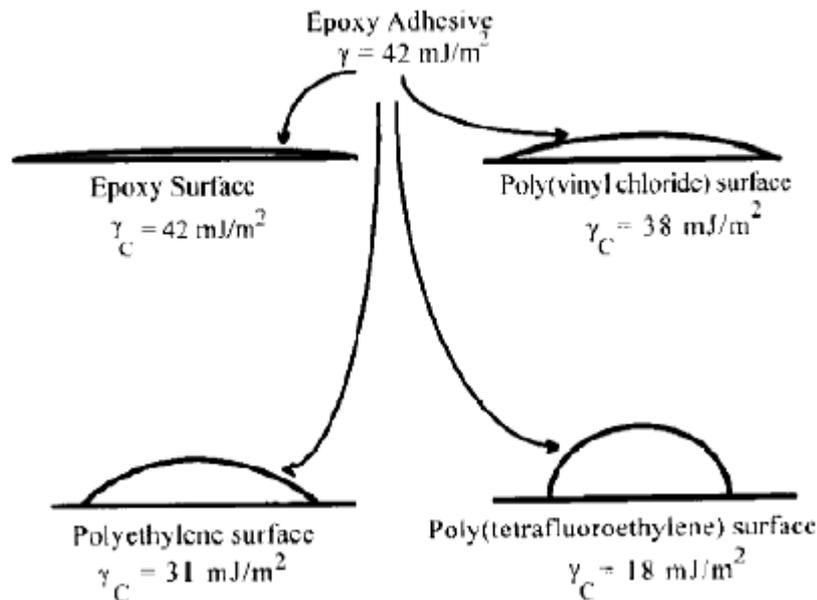


fig. 2.3 : 'Wettability' della superficie

Inoltre ci sono *fattori ambientali* che potrebbero causare un comportamento non corretto del giunto. Primo fra tutti è la temperatura di esercizio che richiede una analisi termo-elastica delle tensioni. Il secondo è l'umidità che provoca un appesantimento della struttura a seguito di assorbimento da parte della matrice del composito e della colla. Poi, ci potrebbe essere un degrado meccanico dovuto a due fattori principali: abrasione per strofinamento tra i membri o plasticizzazione del materiale, che può provocare una variazione della geometria e quindi una diversa distribuzione dei carichi. Infine si deve considerare che l'intera struttura può essere immersa in un ambiente corrosivo che, oltre a corrodere il giunto può causare l'intrusione di molecole che potrebbero causare un abbassamento significativo delle proprietà meccaniche della colla e dei componenti. Quindi è essenziale proteggere queste aree critiche con vernici primarie e/o con guarnizioni.

Gli adesivi strutturali devono, quindi, essere in grado di resistere a grandi sforzi e di garantire una distribuzione continua dei carichi. Molti materiali adesivi hanno anche un'alta resistenza alle vibrazioni. Le principali colle utilizzate sono spesso simili al materiale di cui è costituita la matrice dei compositi, in modo da evitare discontinuità nella distribuzione dei carichi. Quindi si scelgono colle che si avvicinino il più possibile alle proprietà termo-meccaniche delle parti da collegare. Ad esempio le colle epossidiche hanno un'alta resistenza meccanica e un intervallo termico di operatività discreto, sono facili da usare e poco costose. I poliuretani invece hanno una buona flessibilità anche a bassissime temperature (-200°C), mentre il silicone resiste a temperature altissime (300°C) garantendo la

resistenza del giunto. Nella tabella 2.1 sono descritte le principali proprietà termo-meccaniche di alcuni adesivi strutturali.

tab. 2.1 dal doc.16: Proprietà tipiche dei materiali adesivi

	Comments	Service temperature (°C)	Cure
Epoxy	High strength and temperature resistance, relatively low cure temperatures, easy to use, low cost	-40 to +100 (180*)	One-part epoxies cure with temperature. Two-part epoxies cure at room temperature (cure can be accelerated with temperature)
Cyanoacrylates	Fast bonding capability to plastic and rubber but poor resistance to moisture and temperature	-30 to +80	Fast cure (second or minutes) upon exposure to moisture at room temperature
Anaerobics	Designed for fastening and sealing applications in which a tight seal must be formed without light, heat or oxygen, suitable for bonding cylindrical shapes	-55 to +150	Cure in the absence of air or oxygen at room temperature
Acrylics	Versatile adhesives with capabilities of fast curing and tolerate dirtier and less prepared surfaces	-40 to +120	Cure through a free radical mechanism
Polyurethanes	Good flexibility at low temperatures and resistant to fatigue, impact resistance, and durability	-200 to +80	Room temperature
Silicones	Excellent sealant for low stress applications, high degree of flexibility and very high temperature resistance, capability to seal or bond materials of various natures, long cure times, and low strength	-60 to +300 (350 [†])	Room temperature
Phenolics	Good strength retention for short periods of time, limited resistance to thermal shocks	-40 to +175 (260 [†])	Cure with temperature and high pressure
Polyimides	Thermal stability, dependent on a number of factors, difficult processability	-40 to +250 (300 [†])	Cure with temperature and high pressure
Bismaleimides	Very rigid, low peel properties	-50 to +200 (230 [†])	Cure with temperature and high pressure

*With different filler materials; [†]intermittent.

2.2 ANALISI SEMPLICE GIUNTO INCOLLATO

L'analisi delle tensioni nel sottile strato adesivo è piuttosto complesso a causa del loro sviluppo tridimensionale, nel senso che non c'è uno sforzo predominante su altri ma sono tutti paragonabili e strettamente legati fra loro. La geometria che analizzeremo è quella rappresentata in figura 2.4, trattasi di un collegamento incollato ottenuto per sovrapposizione semplice. A causa della eccentricità del carico nascerà un momento flettente che si sommerà a quello indotto dalla deformazione della struttura. Questo momento variabile lungo l'asse x è il responsabile della tensione normale in direzione y , chiamata 'peel stress'.

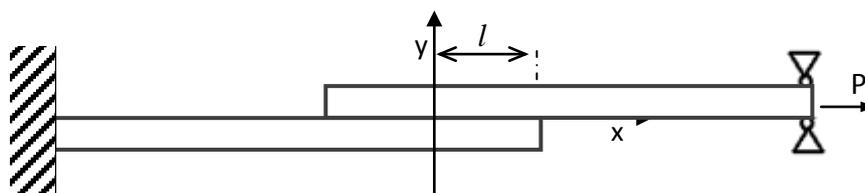


fig. 2.4: Schema di vincoli e carichi per la sperimentazione del single-lap

Sotto questi carichi la struttura si deformerà qualitativamente nel modo rappresentato in *fig 2.5*:

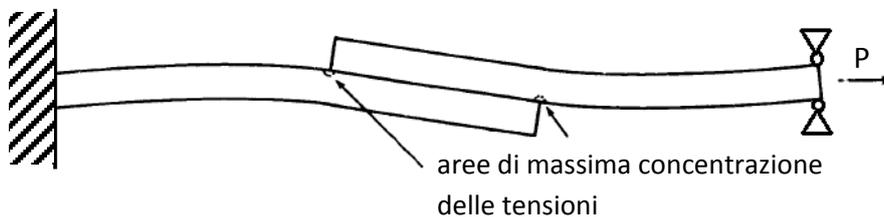
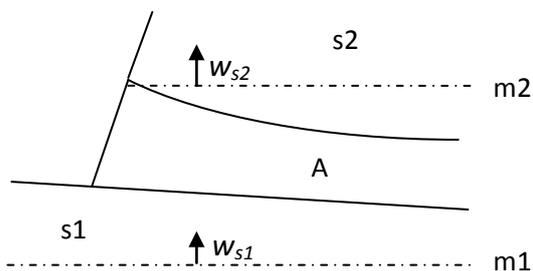


fig. 2.5: Deformazione single-lap joint

Il processo di analisi è suddiviso in tre parti. Il primo passo prevede il calcolo del momento flettente alla fine della sovrapposizione degli aderenti. Successivamente si ottiene un'espressione che descrive il peel stress. Infine si calcola la distribuzione delle tensioni di taglio nell'adesivo. L'analisi che segue è semplificativa, in quanto è limitata al caso di carichi di trazione e ad equilibrio termico.

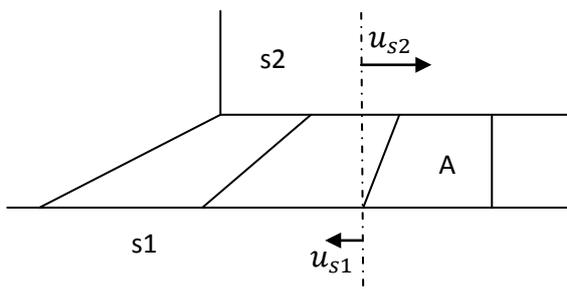
Per calcolare le equazioni differenziali che governano le tensioni normali e di taglio all'interno dello strato adesivo è necessario conoscere il momento flettente ai bordi dell'area di sovrapposizione, in modo da utilizzare questi valori come condizioni al contorno.

Dopodiché si analizzano le deformazioni dello strato adesivo, e da queste, conoscendo il modulo elastico a trazione E_A e quello di taglio G_A , si risale alle tensioni normali $\sigma^{(A)}$ e tangenziali $\tau^{(A)}$. Nelle figure 2.6 e 2.7 sono rappresentate le deformazioni e di fianco a ciascuna le equazioni 2.1 e 2.2 che le legano alle tensioni.



$$\varepsilon^{(A)} = \frac{\sigma^{(A)}}{E_A} = \frac{w_{s2} - w_{s1}}{t_A} \quad eq. 2.1$$

fig. 2.6: Deformazione trasversale



$$\gamma^{(A)} = \frac{\tau^{(A)}}{G_A} = \frac{u_{s2} - u_{s1}}{t_A} \quad eq. 2.2$$

fig. 2.7: Deformazione longitudinale

dove

- m_1 ed m_2 sono gli assi di simmetria delle lamine rispettivamente s_1 ed s_2 ;
- u_{s1} ed u_{s2} i discostamenti in direzione x e w_1 e w_2 in direzione y ;
- $\varepsilon^{(A)}$ la deformazione lungo y e $\gamma^{(A)}$ la deformazione a taglio.

Dalle precedenti equazioni, dopo la risoluzione delle equazioni differenziali che legano la deformazione ai carichi applicati e tramite lunghe manipolazioni algebriche, si ricava che la tensione normale in direzione y (*peel stress*) e il taglio nel piano xy dello strato adesivo hanno l'andamento descritto in *fig. 2.8*. Il sistema di riferimento utilizzato è quello di *fig. 2.4*, l'ascissa è normalizzata rispetto ad l e le tensioni rispetto alla tensione media rispettiva cioè $\sigma^{(A)}$ media e $\tau^{(A)}$ media.

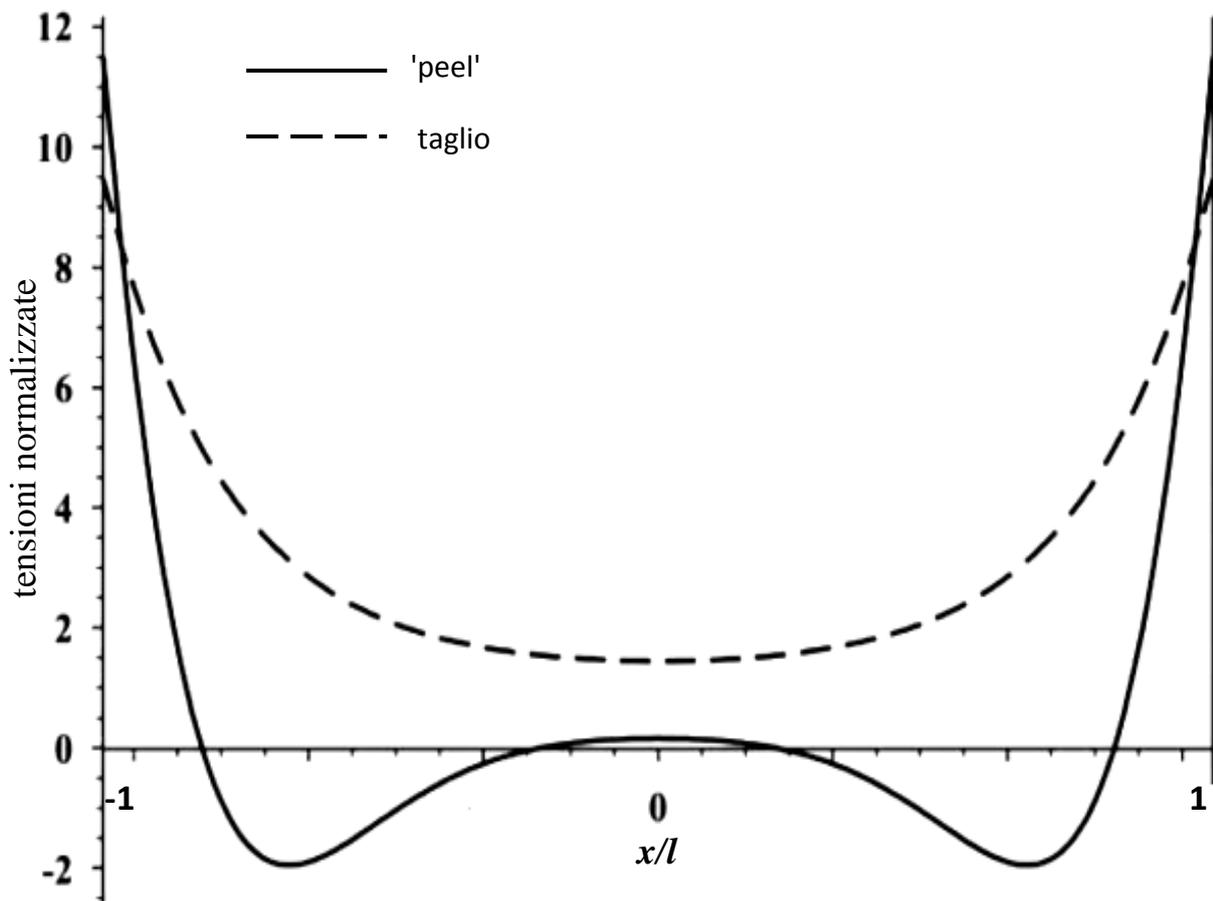


fig. 2.8 : Andamento tensioni nell'area di sovrapposizione

Come si poteva prevedere, le zone più sollecitate sono nelle vicinanze dei bordi della sovrapposizione, dove c'è il passaggio definitivo delle tensioni da un aderente all'altro. L'area centrale nell'adesivo è praticamente scarica perché il carico viene sopportato da ambedue gli aderenti. Inoltre, si nota una zona di compressione con un minimo immediatamente dopo il picco di bordo del *peel*. L'intensità e il posizionamento di questa area di compressione dipende dalla elasticità dei materiali usati e dagli spessori.

In questo caso il grafico è simmetrico, ma si deformerebbe nel caso che i due aderenti avessero spessori e rigidità differenti. In particolare le tensioni si intensificherebbero in prossimità del bordo dopo il quale si passerebbe alla lamina più spessa e/o più rigida.

Le ricerche si concentrano su come ottenere una ideale distribuzione dei carichi nel sottilissimo strato adesivo, cercando di trovare il giusto rapporto fra le elasticità, le resistenze dei materiali e gli spessori, e modificando la configurazione del giunto. A parità di configurazione del giunto si nota che la concentrazione dei carichi in prossimità della fine della sovrapposizione è direttamente legata alla discontinuità geometrica del bordo. Quindi si studiano diversi profili della sezione xy del bordo che possono modificare sensibilmente la distribuzione dei carichi.

3 SIMULAZIONE NUMERICA DI GIUNTI INCOLLATI

3.1 MODELLO FEM

L'analisi FEM (Finite Element Modelling) è importante per due motivi principali: consente di accelerare il processo di progettazione, sostituendo in parte le prove sperimentali preliminari, e riduce il costo della fase di progettazione stessa. Quindi è ormai indispensabile utilizzare questo strumento, sia durante il progetto che nella verifica.

Il metodo degli elementi finiti è utilizzato per ridurre equazioni differenziali molto complesse, anche non analiticamente integrabili, ad un sistema di equazioni algebriche elementari. Si perviene al modello finale a elementi finiti attraverso due fasi principali:

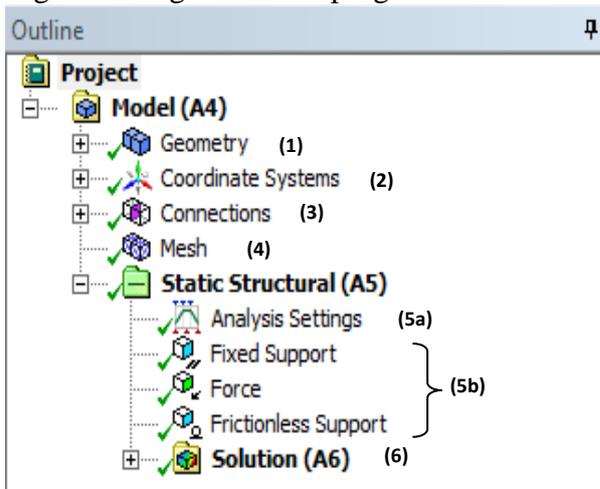
- la *modellazione*, per passare dal sistema fisico ad un modello matematico che può ignorare alcuni aspetti che hanno scarsa rilevanza;
- la *discretizzazione* che consiste nel passare da un sistema continuo, descritto da un numero infinito di equazioni, ad un sistema con un numero finito di relazioni algebriche.

L'ultima fase avviene dividendo l'oggetto d'analisi in elementi molto piccoli, ma finiti, che si sviluppano in una, due o tre dimensioni. Viene generata una griglia, chiamata *mesh*, che può essere regolata, a seconda della precisione richiesta per la soluzione, anche non omogeneamente nel dominio. Ogni elemento è descritto dalla propria funzione di forma, che localmente può non seguire necessariamente il profilo dell'oggetto. La precisione della analisi agli elementi finiti è proporzionale al grado del polinomio delle numerose funzioni forma. I vari elementi finiti possono comunicare tra loro nei nodi, in cui vengono generate le equazioni risolutive.

Qui di seguito viene mostrato l'ordine generalmente seguito per l'impostazione dell'analisi. Sono descritti la geometria del giunto da analizzare, le proprietà meccaniche delle lamine e della colla, l'impostazione di mesh e vincoli ed infine l'applicazione dei carichi alla struttura.

L'immagine (*fig. 3.1*) mostra il diagramma di progetto utilizzato dal software per una analisi statica. Questa grafica user-friendly ci permette di usare intuitivamente il FEM.

fig. 3.1: Diagramma del progetto



I vari punti permettono di:

- 1) caricare la geometria e assegnare ai diversi oggetti del gruppo delle proprietà fisiche del materiale di cui sono composte
- 2) creare sistemi di riferimento più
- 3) stabilire il rapporto tra la superficie
- 4) impostare i parametri di rete
- 5) impostare l'analisi spazio-temporali (5a) e assegnare i vincoli e carichi (5b)
- 6) Selezionare da un elenco dettagliato dei risultati di seguire attraverso l'analisi.

3.1.1 Geometria del giunto

Le analisi FEM che seguiranno si basano su alcune norme internazionali che definiscono la geometria da utilizzare nelle prove sperimentali. Seguiamo le direttive standard per testare un incollaggio a sovrapposizione semplice tra due fogli metallici (doc. 14) come in figura 3.2.

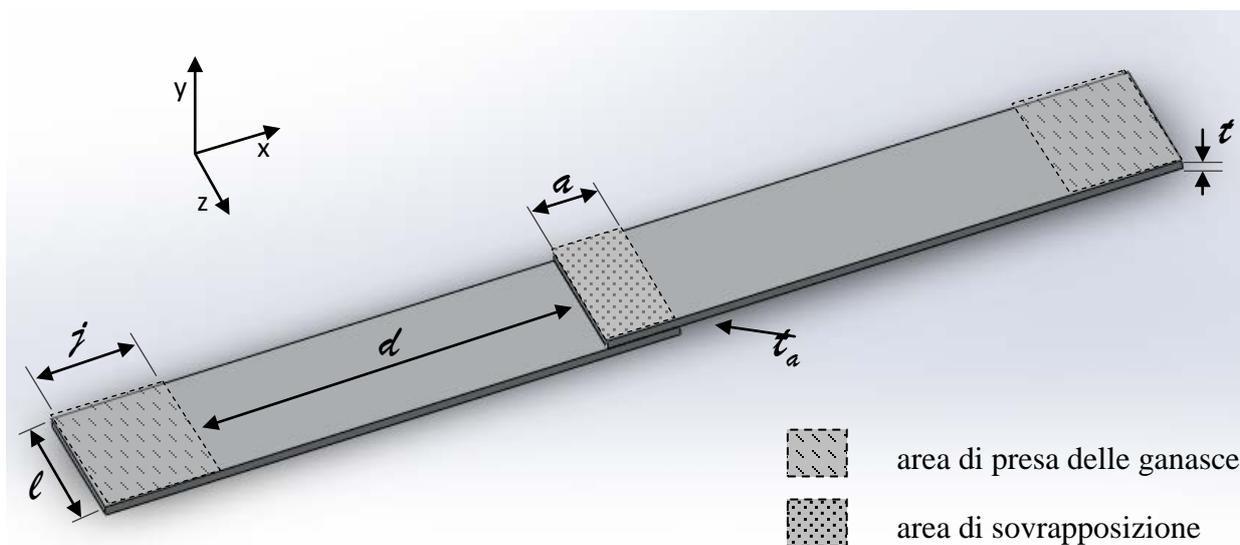


fig. 3.2 : Geometria standard

Tab. 3.1: dimensioni campioni prova

l :	larghezza lamine	25,4 mm (1 in.)
z :	distanza di presa per ganasce	25,4 mm (1 in.)
a :	lunghezza sovrapposizione	12.7 ± 0.25 mm (0.5 ± 0.01 in.)
d :	distanza di sicurezza	63 mm ($2\frac{1}{2}$ in.)
t :	spessore lamine	1.62 ± 0.125 mm (0.064 ± 0.005 in.)
t_a :	spessore adesivo	dopo la formazione del giunto: 0.025 mm (0.001 in.)

Dopo aver caricato la geometria dal software CAD sul software di analisi FEM, si ottiene il modello di *fig. 3.3*, in cui si riconoscono i fogli, interposti da un sottile strato di materiale adesivo, tirati alle estremità da due ganasce:

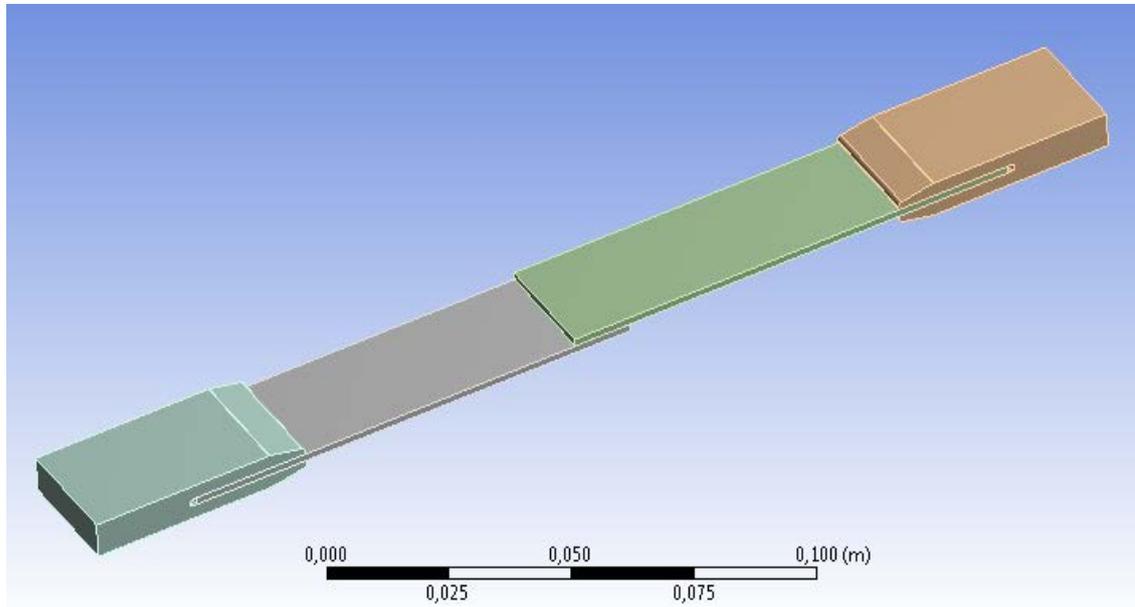


fig. 3.3: Modello per l'analisi FEM

La fase successiva consiste nell'impostazione dei contatti tra le superfici dei vari oggetti.

Quindi in "connessioni" possiamo inserire singolarmente le relazioni facendo attenzione a selezionare le superfici appropriate, con l'aiuto dello strumento zoom. Come si nota nelle figure 3.4 e 3.5 è stato utilizzato il collegamento di tipo rigido, 'bonded', il quale vincola tra loro i gradi di libertà dei nodi degli elementi a contatto.

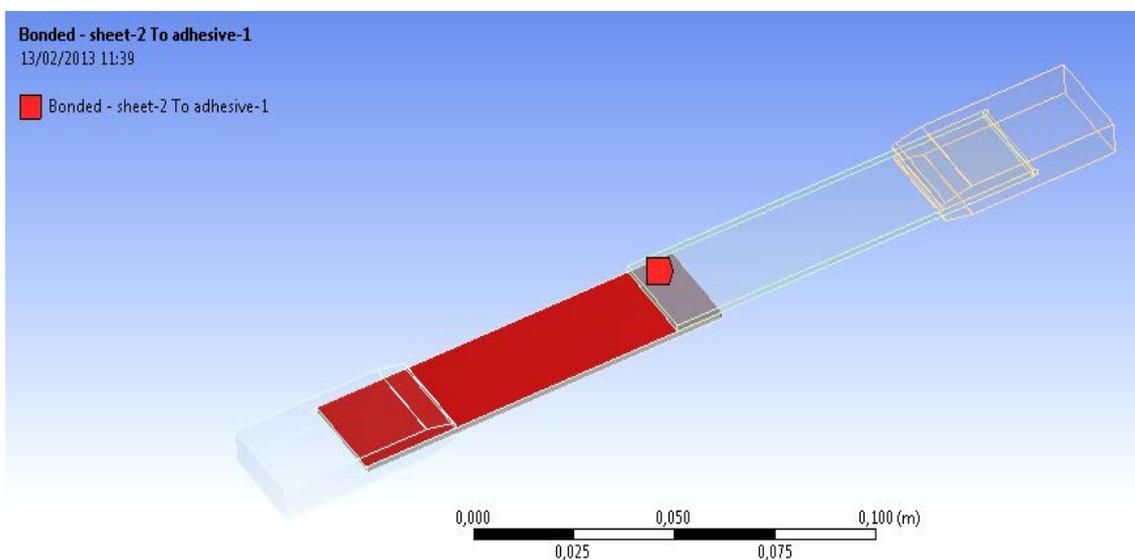


fig. 3.4: Vincolo 'bonded' lamina-adesivo

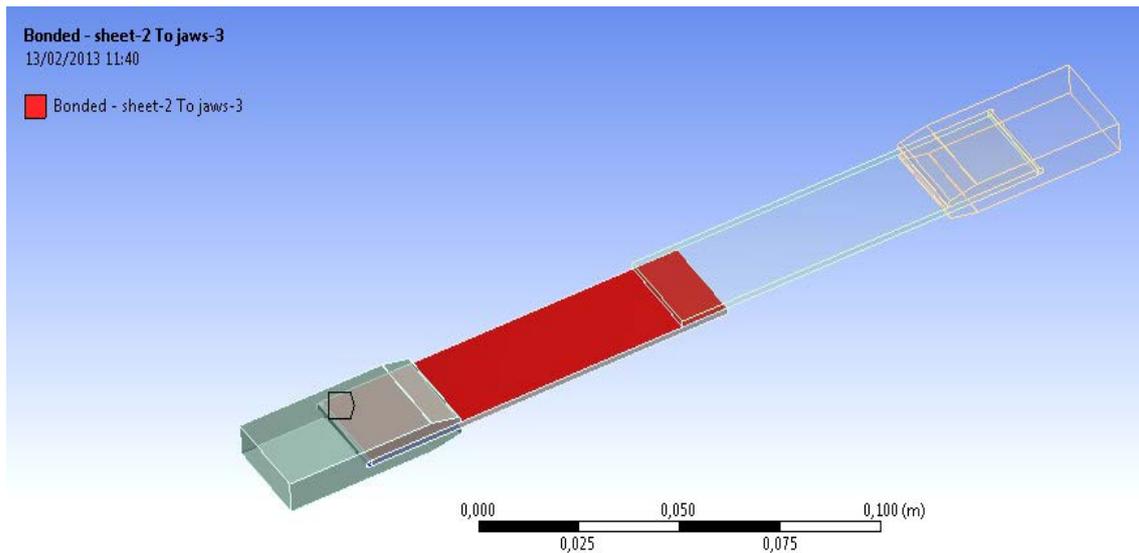


fig. 3.5: Vincolo 'bonded' lamina-ganascia

3.1.2 Proprietà dei materiali

I materiali che verranno usati per le successive analisi sono i seguenti:

Adesivo

tab 3.2: 'methacrylate-epoxy hybrid' a due componenti

Modulo Elastico (E)	3.84 GPa
Coefficiente di Poisson (ν)	0.4
Tensione di plasticizzazione a trazione (τ_v)	61 MPa
Tensione ultima a trazione (τ_{max})	84.7 MPa

Lamine

tab 3.3: prova1: Alluminio (2024T3)

Modulo Elastico (E)	71 GPa
Coefficiente di Poisson (ν)	0.33
Tensione di plasticizzazione a trazione (τ_v)	280 MPa
Tensione ultima a trazione (τ_{max})	310 MPa

tab 3.4: prova2: CFRP 0° (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*)

Modulo Elastico X-dir.(E_x)	10.9 GPa
Modulo Elastico Y-dir.(E_y)	8.819 GPa
Modulo Elastico Z-dir.(E_z)	8.819 GPa
Coefficiente di Poisson XY (ν_{xy})	0.342
Coefficiente di Poisson YZ (ν_{yz})	0.38
Coefficiente di Poisson XZ (ν_{xz})	0.342

Per questa analisi d'esempio è stato scelto un materiale isotropo, 'acciaio strutturale', che è il materiale di partenza di offset del programma utilizzato. Qui di seguito sono riportate le principali proprietà meccaniche:

tab 3.5: proprietà acciaio strutturale

Densità (ρ)	7850 kg/m ³
Modulo Elastico (E)	200 GPa
Tensione di plasticizzazione a trazione (τ_v)	250 MPa
Tensione ultima a trazione (τ_{max})	460 MPa

3.1.3 Scelta della mesh

La scelta della mesh è un problema molto delicato perché la scelta del tipo di elemento finito non appropriato potrebbe compromettere il risultato, che potrebbe differire dal comportamento reale dell'oggetto studiato. Dopo varie ricerche si è compreso che l'analisi FEM più adatta del giunto sopra descritto consiste in una suddivisione completa in elementi tridimensionali, cioè utilizzando una mesh 'a mattoncini' (brick) che è più fitta nello strato adesivo. Questa scelta è giustificata dal lavoro di T.Umamaheswar & R.Singh (doc.4) focalizzato sull'analisi parametrica statica e a fatica di una riparazione mediante incollaggio di una piastra metallica. Per determinare quale modellazione è più appropriata, sono stati calcolati i valori dello SIF (Stress Intensity Factor) alla radice di un difetto con quattro modelli diversi, di cui uno segue una legge lineare, mentre gli altri sono di tipo non lineare. Successivamente sono stati confrontati i risultati con un'analisi full 3D di riferimento (*colonna 2, tab 3.6*), che divide l'oggetto in un gran numero di elementi tridimensionali, implicando un tempo di calcolo maggiore, ma la cui analisi è molto vicina ai valori che si potrebbero ottenere sperimentalmente. La tabella 3.6 mostra quale grado di ottimizzazione dei risultati e del tempo di calcolo si ottiene con il modello 3D (*colonna 5, tab 3.6*).

tab. 3.6 dal doc.4: Confronto tra modelli diversi

Effective SIF values, errors and model costs associated with different modelling approaches to patch repair analysis

		Column 1 Multi-brick	Column 2 Multi-brick	Column 3 Plate-beam	Column 4 Plate-brick	Column 5 Single-brick
Model	Sheet	3D(4)	3D(4)	2D	2D	3D(1)
	Bond	3D(2)	3D(2)	2D	3D(1)	3D(1)
	Patch	3D(4)	3D(4)	2D	2D	3D(1)
	Linear/ non-linear	Linear	Non-linear	non-linear	non-linear	non-linear
Effective SIF, % Dev	15 mm	10.81 + 12.72	9.59 *	9.19 -4.17	10.08 + 5.11	9.42 -1.77
Effective SIF, % Dev	25 mm	12.61 + 19.07	10.59 *	10.11 -4.53	11.55 + 9.07	10.61 + 0.19
Effective SIF, % Dev	30 mm	14.54 + 24.17	11.71 *	11.13 -4.95	12.39 + 5.81	11.54 -1.45
Size	Elements	10,920	10,920	3134	3068	3068
	Nodes	13,392	13,392	2530	2530	5060
	DOF	40,176	40,176	15,180	15,180	15,180
CPU Rating	(minutes)	10.1 Incorrect	37.1 Reference....	2.7 Good	4.2 Poor	3.9 Best

* No. of thickness-wise elements in bracket

Il 'brick' è un elemento tridimensionale, da 4 a 27 nodi, che ha tre gradi di libertà per ogni nodo ed è capace di interpretare uno stato di tensioni tridimensionale.

Nel nostro caso, abbiamo scelto una mesh con dimensionamento fine standard, senza condizioni di prossimità, con infittimento nel sottile strato adesivo. Tuttavia per le analisi successive sarà necessario seguire il profilo geometrico dei bordi dell'adesivo, quindi si sceglierà una mesh in funzione della curvatura (*fig. 3.6*).

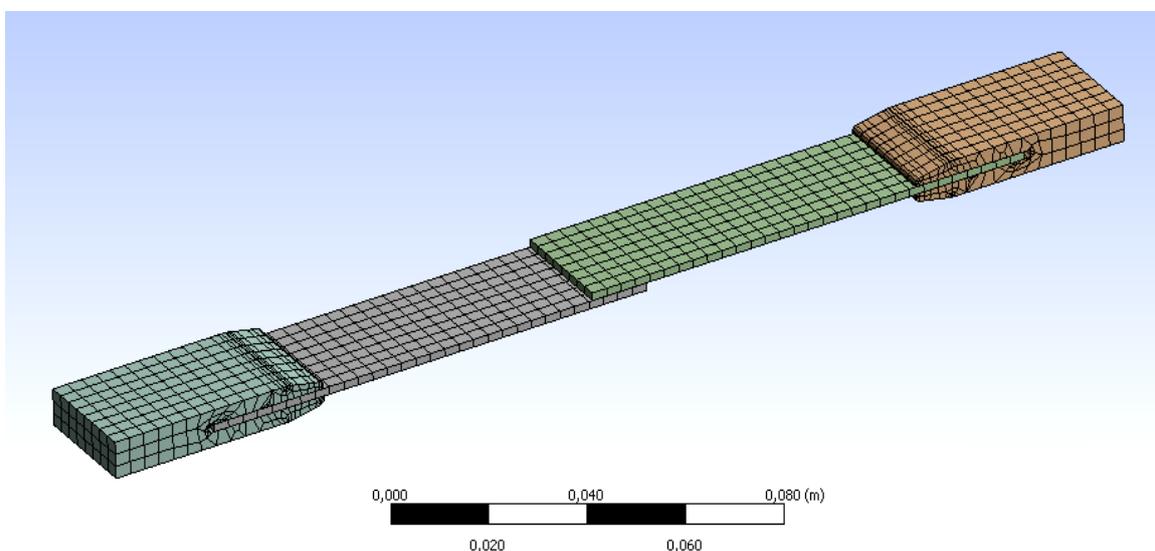


fig. 3.6: Mesh con condizione di curvatura

3.1.4 Vincoli e carichi

Per simulare i test sperimentali di prova di queste tipologie di materiali, sono state considerate nelle analisi anche le ganasce di collegamento con la macchina di prova. Una ganascia è fissata al supporto mentre il provino viene tirato dall'altra. Riguardo i carichi da applicare sperimentalmente, sono stati presi dati da bibliografia (doc. 14) . In particolare, il carico è stato applicato ad una velocità da 80 a 100 kg/cm² (1200-1400 psi) sull'area di taglio per min. fino alla rottura del componente. Moltiplicando il carico per l'area della superficie laterale del foglio si ottiene la forza di trazione da applicare alle ganasce:

$$F_B = (100 \text{ kg/min} \cdot \text{cm}^2) \cdot g \cdot l \cdot t = (100 \text{ kg/cm}^2) \cdot 9.81 \cdot 25.4 \cdot 1.62 \cdot 10^4 \\ \approx (4 \text{ N/min}) \cdot \text{tempo}$$

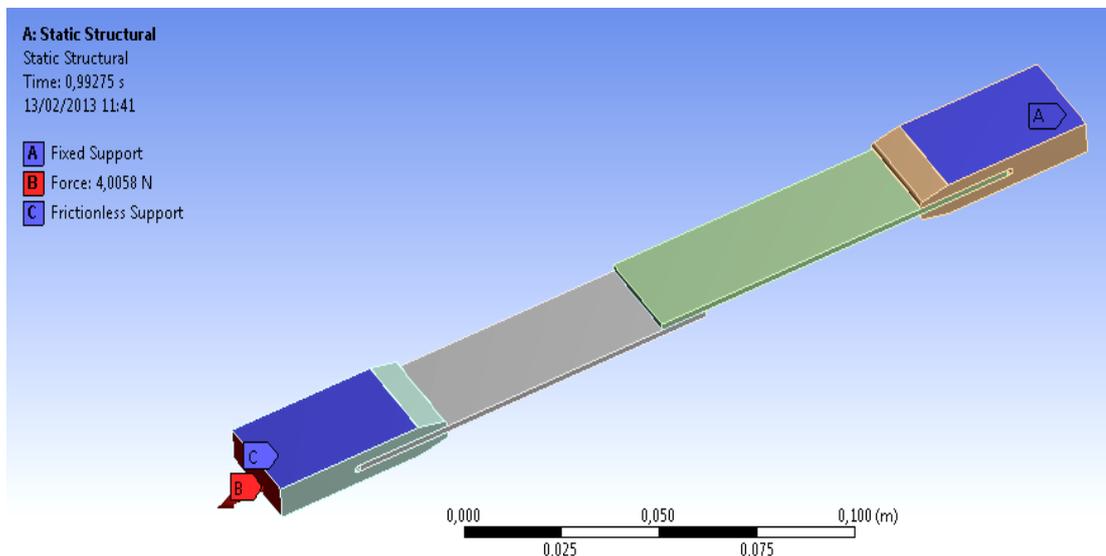


fig. 3.7: Rappresentazione di vincoli e dei carichi agenti sulla struttura

Nelle successive analisi applicheremo un carico di 4N, non più alto, in modo da evitare la plasticizzazione del materiale.

3.1.5 Risultati preliminari per provini in acciaio

La fase successiva è la soluzione numerica del problema. Sono stati evidenziati i seguenti risultati:

- Tensione equivalente di von Mises

Nella figura 3.8 si nota come si deforma il campione a causa della asimmetria della geometria. Si vede bene che la zona rossa, prossima alla zona di sovrapposizione, deve sopportare sollecitazioni maggiori (0,36 MPa) perché deve contrastare la coppia indotta dalla deformazione e la coppia geometrica.

L'area di sovrapposizione è più scaricata perché la sezione raddoppia. Inoltre, si vede il fatto che i bordi delle lamine sono più caricati dell'interno. La deformazione è stata amplificata del 0,5% rispetto a quella reale.

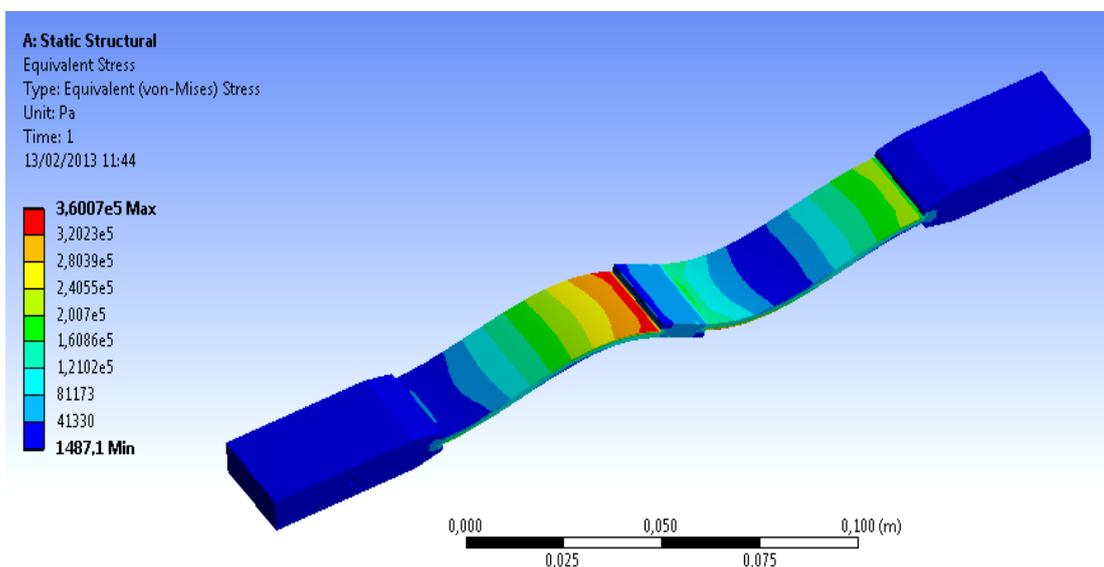


fig. 3.8: Tensione equivalente di von Mises

- Tensione di taglio xy

Le aree di carico in figura 3.9 seguono l'andamento teorico, cioè nella zona di sovrapposizione il taglio è più intenso ai bordi (81,13 kPa), mentre il giunto si scarica rapidamente avanzando verso l'interno (7,80 kPa)

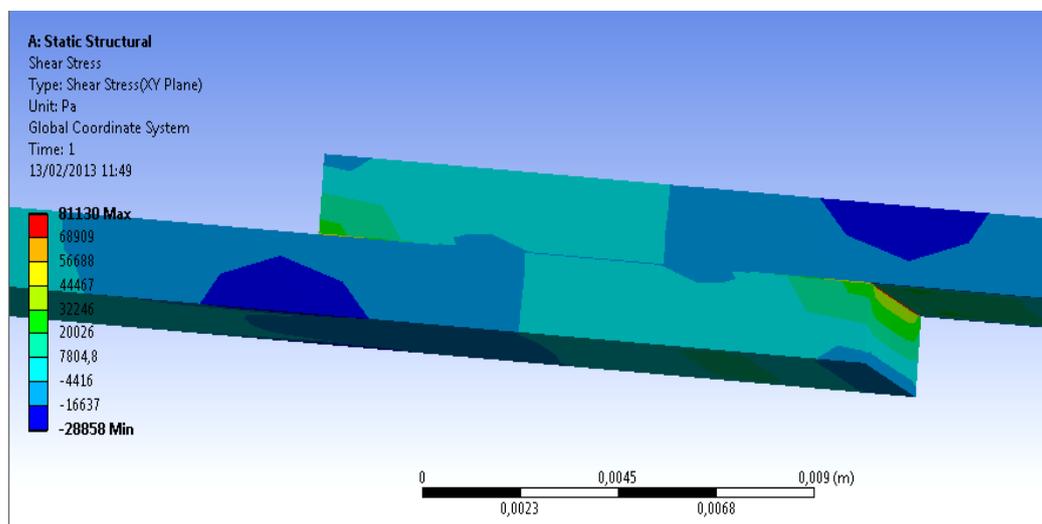


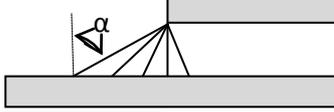
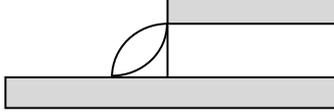
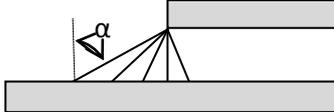
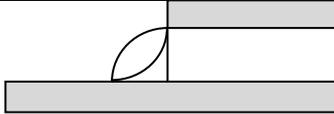
fig. 3.9: Tensioni di taglio τ_{xy}

3.2 DESCRIZIONE DELL'ANALISI

Per indagare l'effetto di bordo dello strato adesivo, verranno fatte diverse analisi variando il profilo e il materiale delle lamine. Vengono calcolate e successivamente comparate le tensioni normali in direzione longitudinale (σ_x) e trasversale (σ_y) e le tensioni di taglio nel piano xy.

Ecco una tabella riassuntiva delle analisi:

tab. 3.7: Analisi effettuate

materiale lamine	tipo analisi
Al 2024T3	Inclinazione: $\alpha = 0, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, -30^\circ$ 
Al 2024T3	Forma: concavo e convesso 
CFRP 0°	Inclinazione: $\alpha = 0, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, -30^\circ$ 
CFRP 0°	Forma: concavo e convesso 

4 RISULTATI

Per l'ottenimento dei dati che seguono è stato creato un dominio di punti appartenente alla linea di mezzeria dello strato di adesivo, cioè posizionata ad $l/2$ e a metà dello spessore come in figura 4.1.

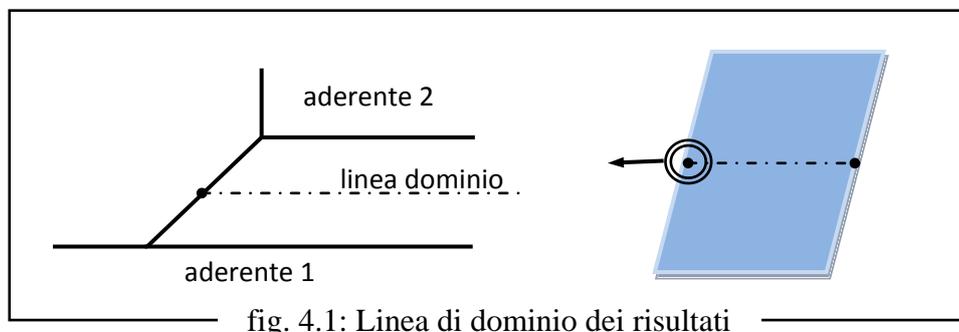


fig. 4.1: Linea di dominio dei risultati

4.1 LAMINE IN ALLUMINIO

Analizzando lo strato adesivo a 0° otteniamo il grafico, riportato in *fig.4.2*, delle tre tensioni che verranno prese in esame: la tensione normale in direzione longitudinale σ_x , quella in direzione trasversale σ_y , che rappresenta l'effetto dannifico del peel, e la tensione di taglio τ_{xy} . Come si poteva prevedere l'intensità di tali tensioni è molto superiore agli estremi dello strato collante, rispetto all'interno che è praticamente scarico. Si riconosce nell'andamento del peel (σ_y) l'area di compressione incipiente al picco di trazione.

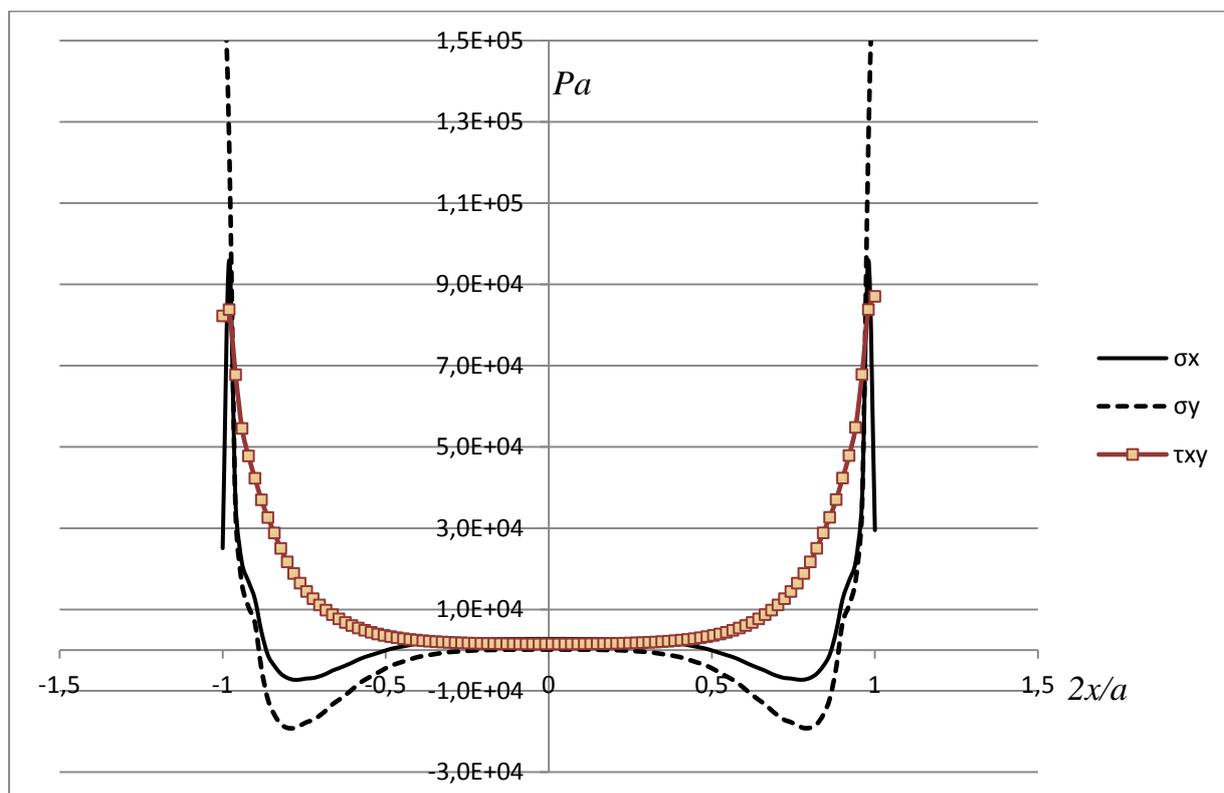


fig. 4.2: Andamento delle tensioni con geometria 0° (Al)

Modificando la geometria del bordo si cerca di risolvere l'effetto del peel in due modi differenti. Il primo consiste nell'attenuare il più possibile il valore di σ_y massimo, il secondo nell'accentuare l'intensità della successiva zona di compressione cercando di avvicinarla il più possibile al bordo. L'effetto dell'ultima soluzione consiste nel bloccare l'avanzamento verso l'interno di possibili difetti superficiali di bordo, salvaguardando l'integrità del giunto. Nelle immagini che seguono sono rappresentate le bande di isocarico nello strato adesivo con bordo convesso. Si è scelto di visualizzare questa configurazione perché il dislivello di carico è più enfatizzato.

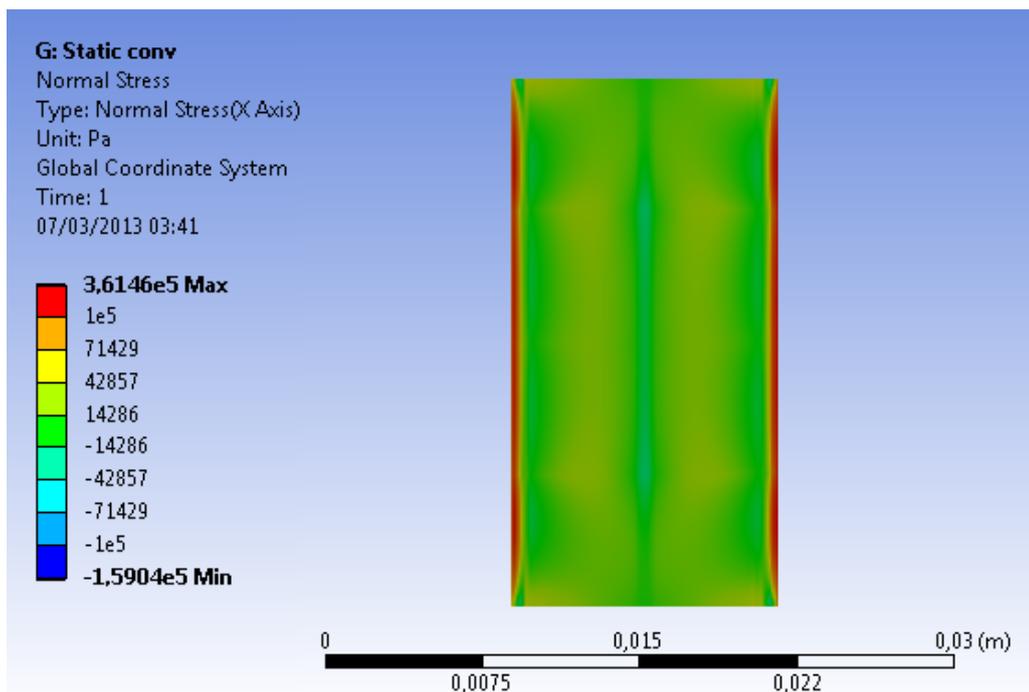


fig. 4.3: Tensione normale in direzione x per il profilo convesso

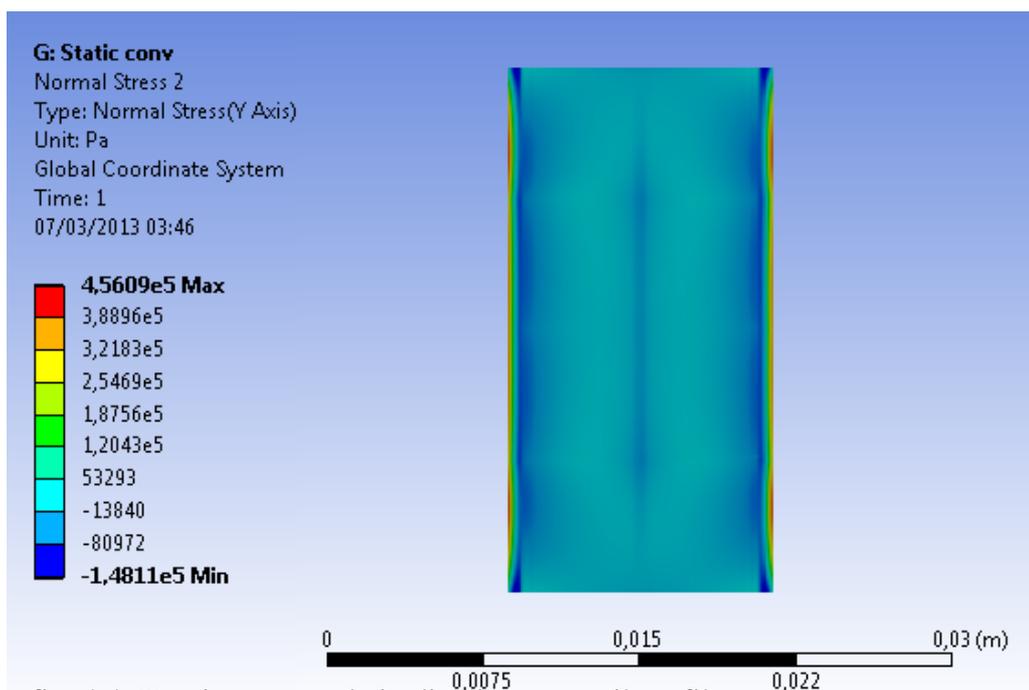


fig. 4.4: Tensione normale in direzione y per il profilo convesso

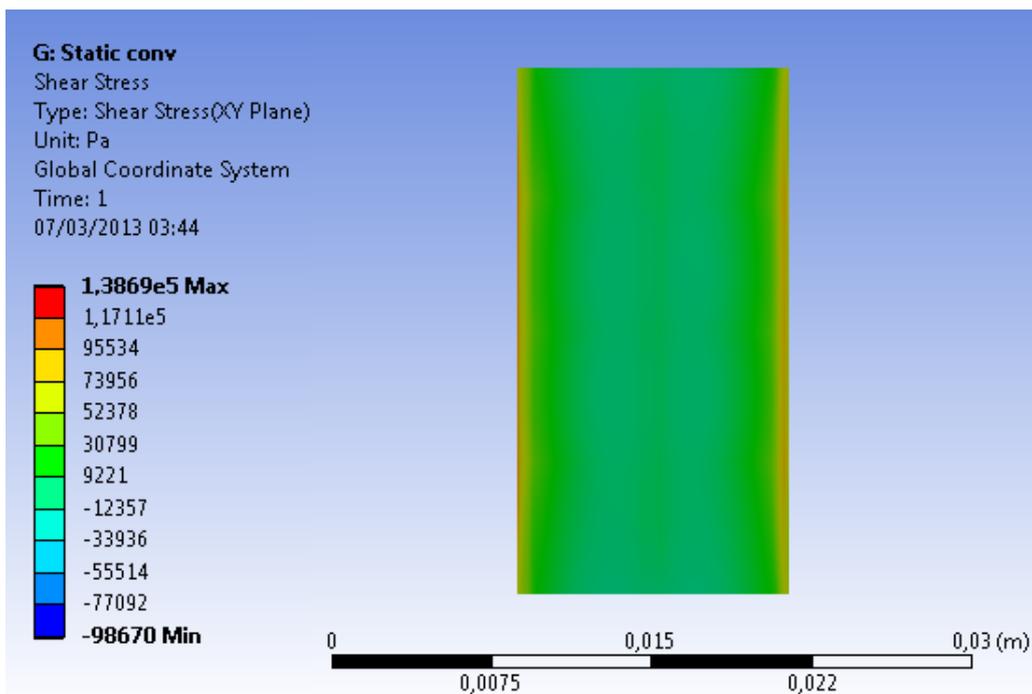


fig. 4.5: Tensione di taglio τ_{xy} per il profilo convesso

Dal grafico riportato in *fig. 4.6* si evince la particolarità del bordo convesso, che causa una pesante variazione della distribuzione delle tensioni anche all'interno dell'area di sovrapposizione. L'effetto della sua geometria è più accentuato rispetto agli altri che seguono all'incirca l'andamento a 0° . Le tensioni σ_x , σ_y e τ_{xy} sono normalizzate rispetto ai valori medi rispettivamente σ_{xm0° , σ_{ym0° e τ_{xy0° del bordo semplice.

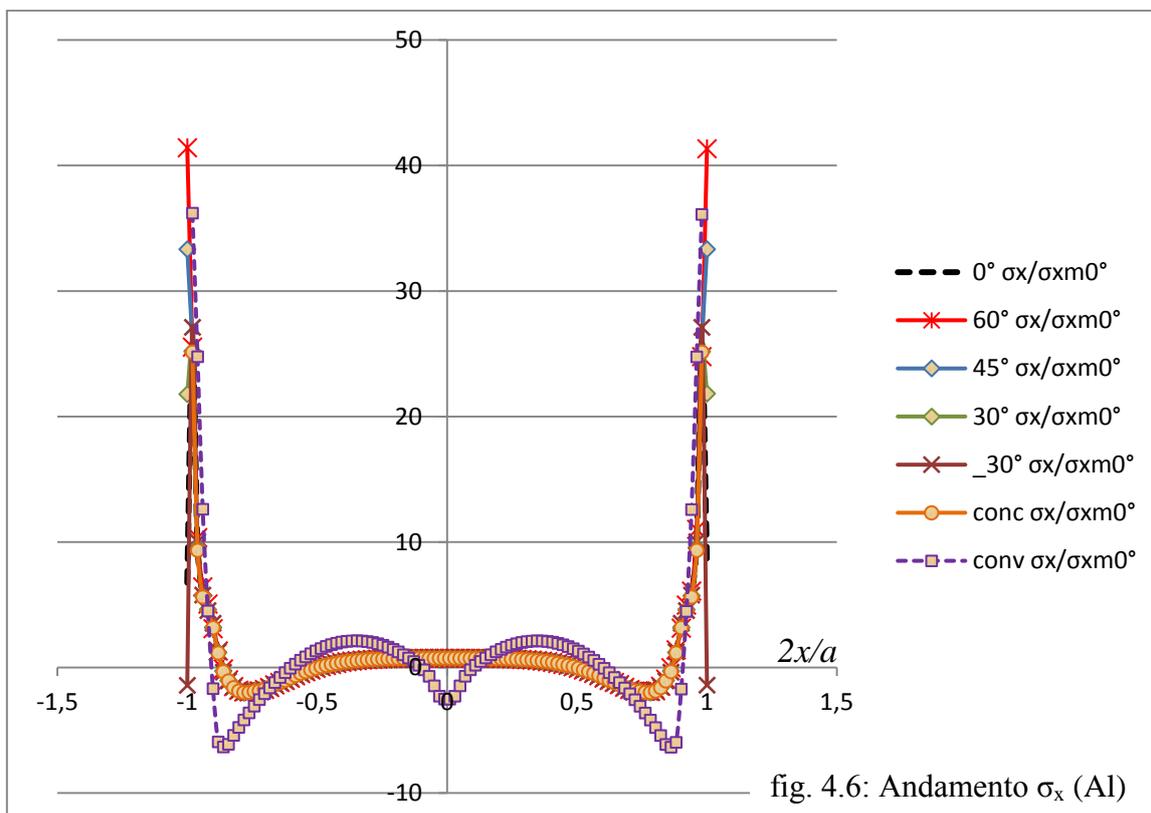


fig. 4.6: Andamento σ_x (Al)

La stessa particolarità del profilo convesso si nota nell'andamento del peel (fig.4.7)

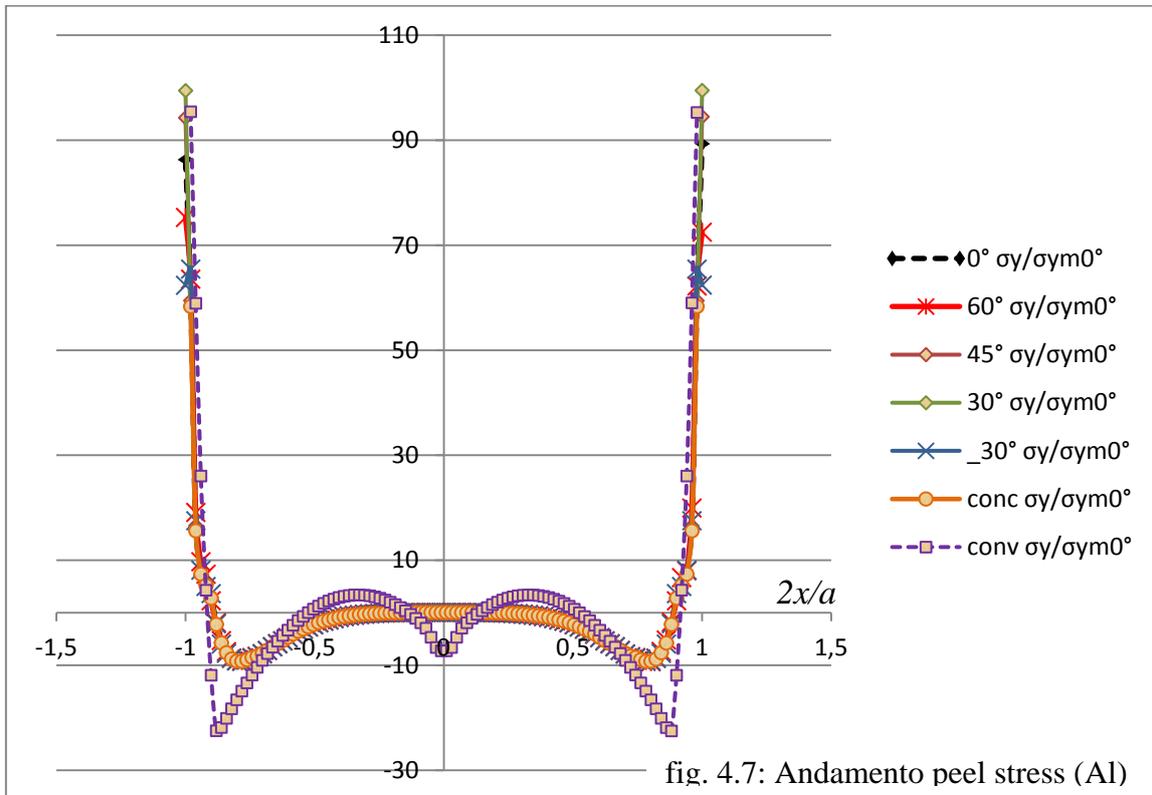


fig. 4.7: Andamento peel stress (Al)

Mentre l'andamento della tensione di taglio rimane pressoché invariato per tutte le configurazioni (fig.4.8).

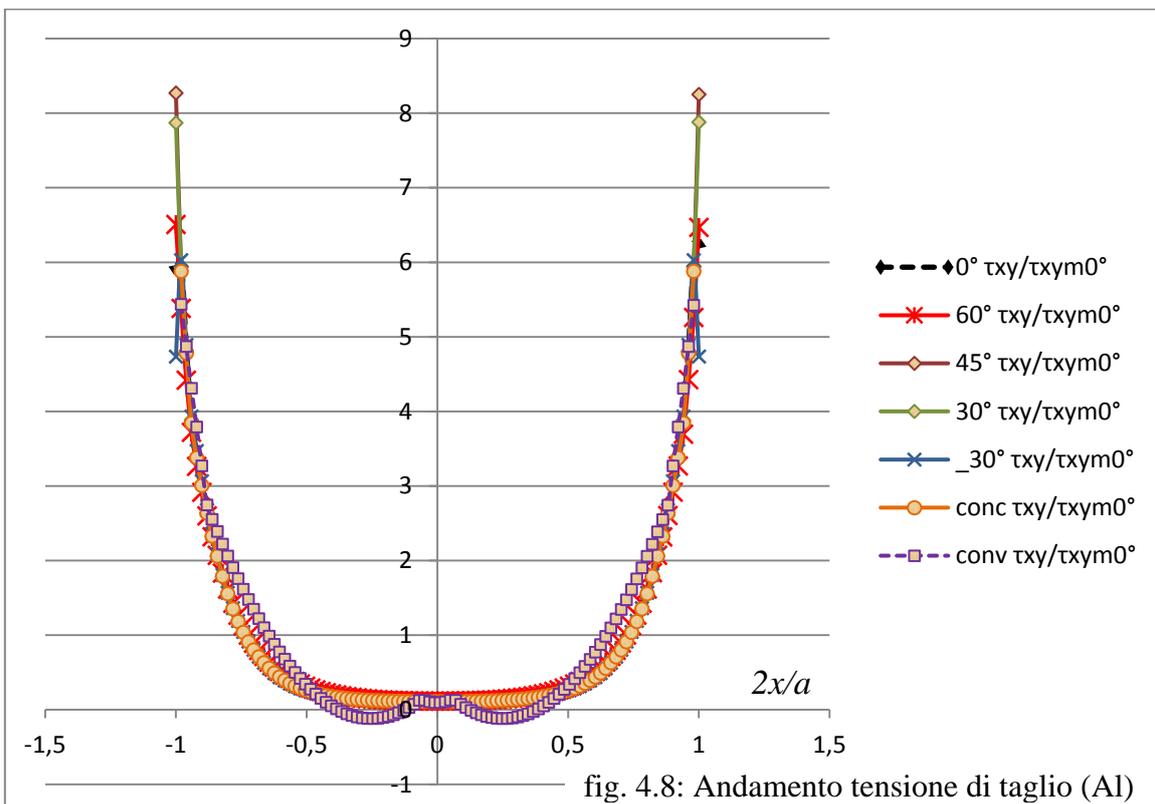
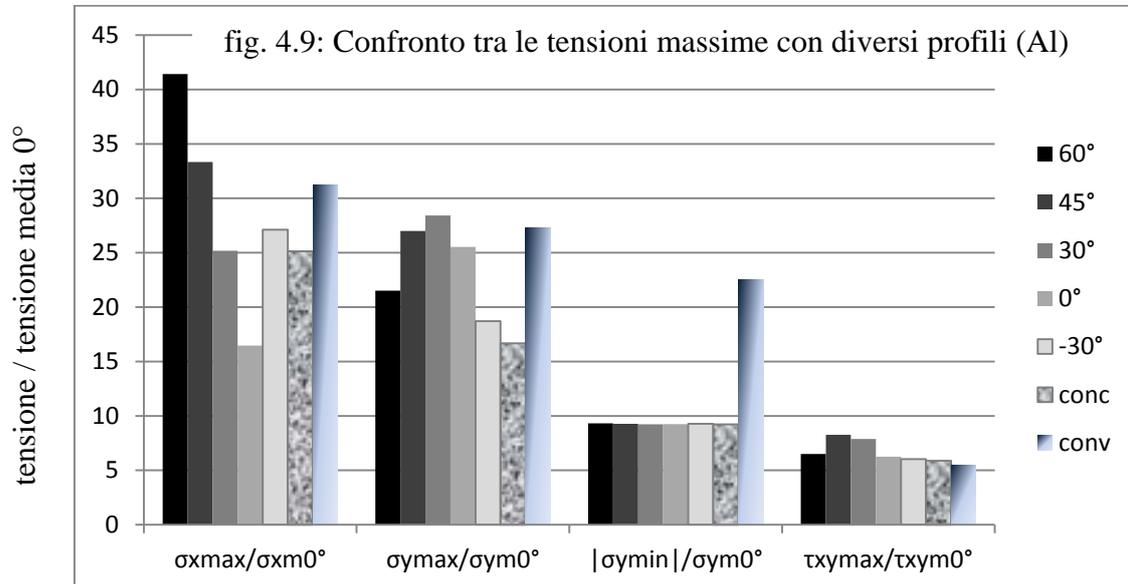


fig. 4.8: Andamento tensione di taglio (Al)

Dal grafico in *fig. 4.9* si comprende meglio l'effetto indotto dalla variazione dell'inclinazione del bordo e dalla variazione della forma.

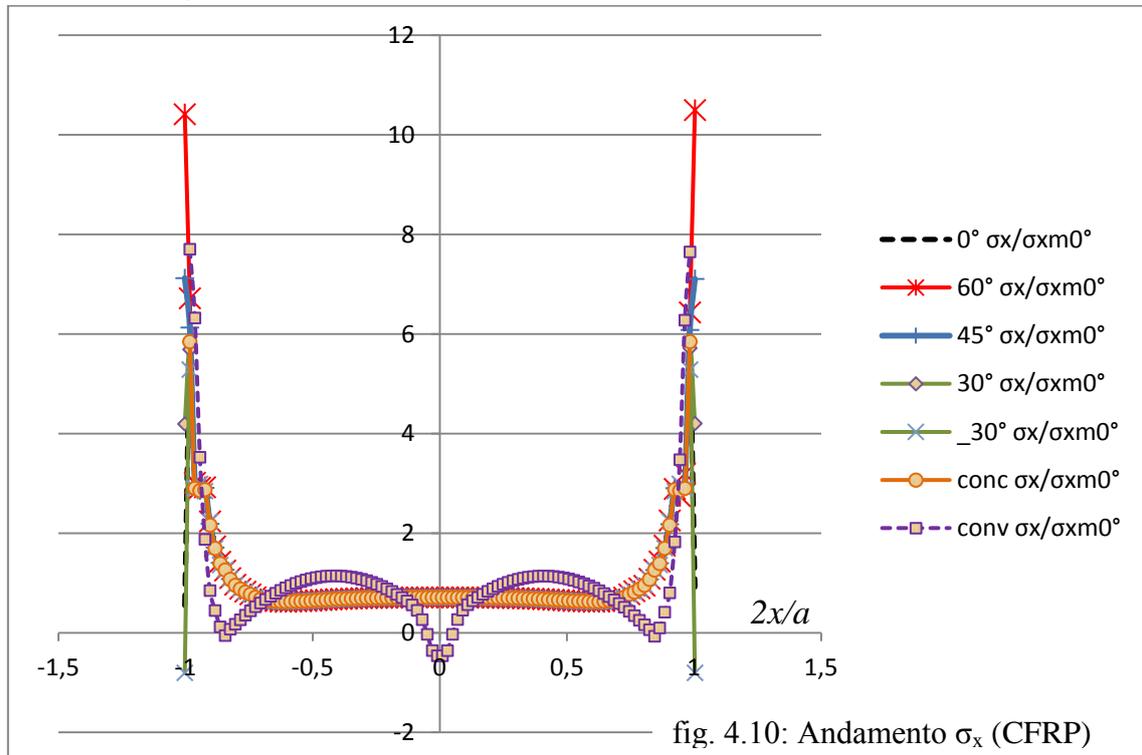


Aumentando l'inclinazione da 0° a 60° parte della σ_y e della τ_{xy} si trasforma in σ_x . Infatti si nota un aumento dell'intensità di quest'ultima ma anche un abbassamento significativo del picco di peel. La σ_x massima si ha nell'intervallo fra l'agganciamento da parte dell'adesivo della lamina inferiore e l'inizio della lamina superiore. In quest'ultimo punto le tensioni si distribuiscono su uno spessore complessivo che praticamente raddoppia, determinando un crollo dell'intensità del carico. Lo stesso effetto si ottiene con maggiore efficienza col profilo concavo. L'adesivo con bordo convesso risolve il problema del peel con la seconda soluzione sopracitata, cioè mantenendo l'intensità del picco di peel invariato ma intensificando l'area di compressione imminente al bordo. Inoltre il bordo a -30° , che potrebbe rappresentare un eventuale ritiro della colla nella fase di indurimento, sembra non essere problematico, anzi, a peel ha un comportamento migliore rispetto alla configurazione a 60° .

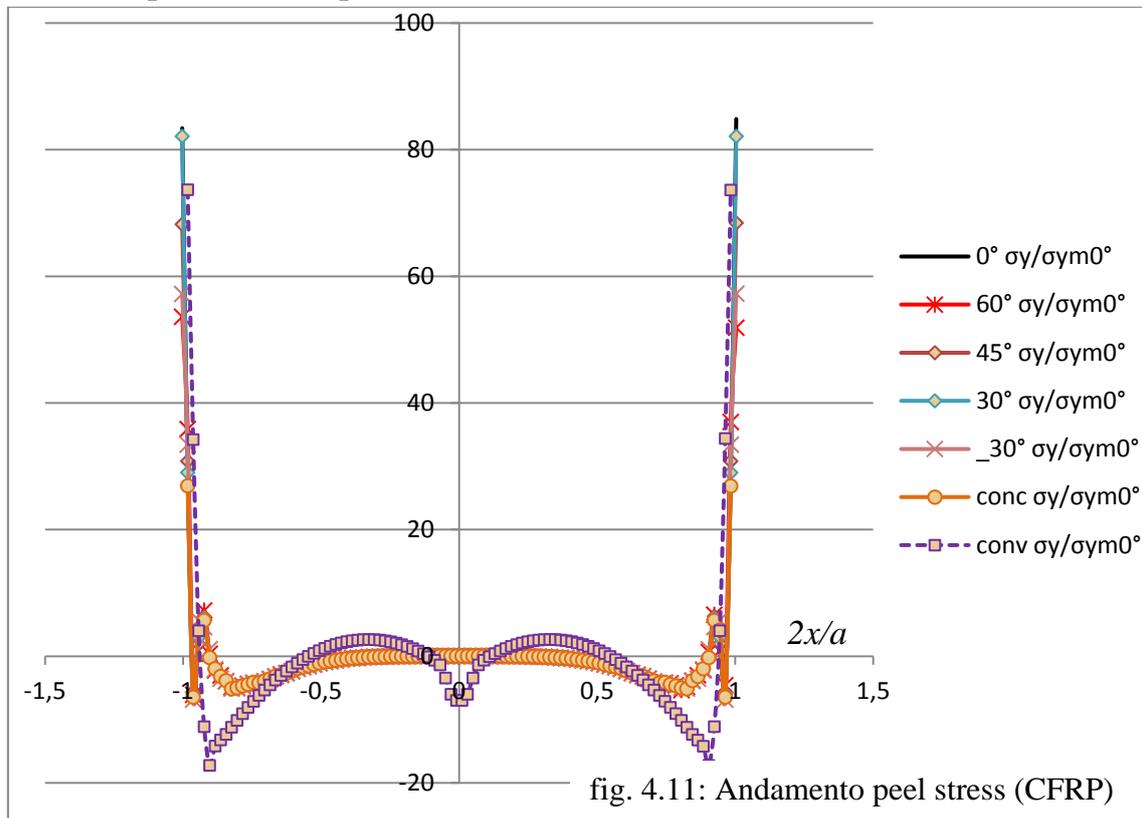
4.2 LAMINE IN CFRP

Dai tre grafici che seguono (figure 4.10, 4.11 e 4.12) si evince il fatto che il cambiamento del materiale di cui sono costituite le lamine non influisce sulla forma degli andamenti delle tensioni. Permane la particolarità del profilo convesso.

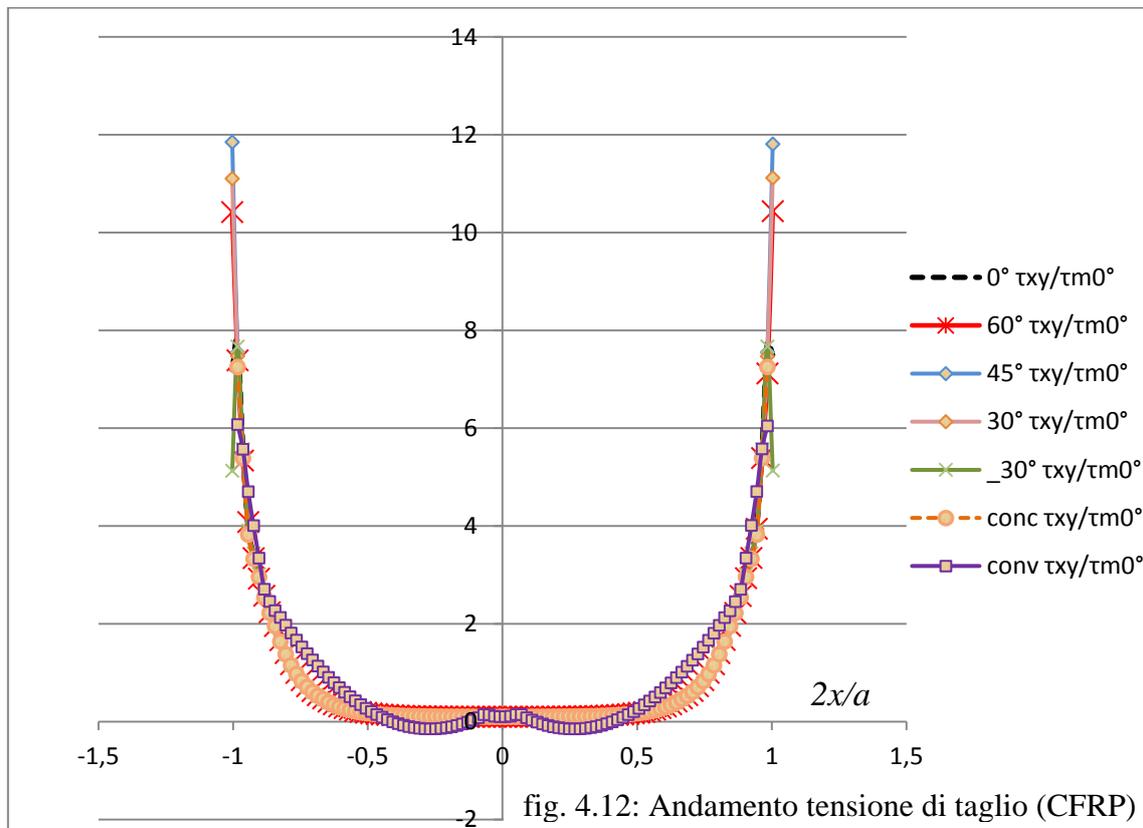
Anche qui le ascisse sono normalizzate rispetto a metà della lunghezza della sovrapposizione e le tensioni sono normalizzate rispetto alle tensioni medie della configurazione di riferimento a 0° .



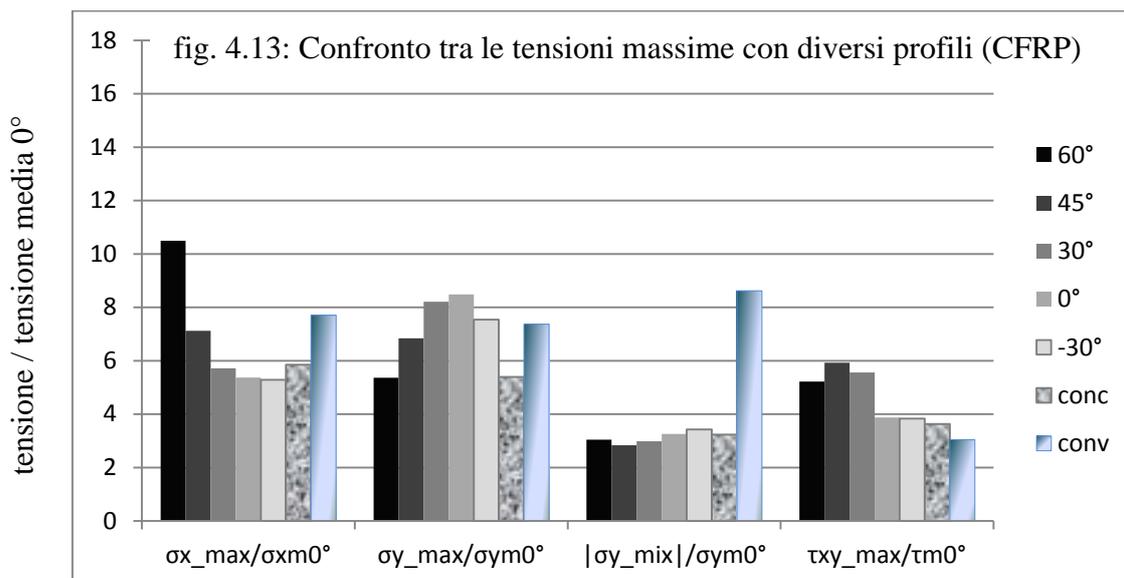
Nell'andamento del peel (*fig. 4.11*) il profilo concavo presenta ben due aree di compressione in prossimità del bordo, ma di intensità minore rispetto al picco di compressione del profilo convesso.



La tensione di taglio del convesso cresce più gradualmente verso i bordi, dove il picco massimo è meno intenso rispetto agli altri (*fig. 4.12*).



Il seguente istogramma (*fig. 4.13*) descrive i medesimi effetti indotti dalla forma del bordo.



4.3 ALLUMINIO VS. CFRP

Qui di seguito vengono confrontati i principali risultati, delle tre migliori configurazioni e della configurazione di riferimento a 0°, fra provini in alluminio 2024T3 e provini in CFRP con fibre orientate nella direzione di trazione.

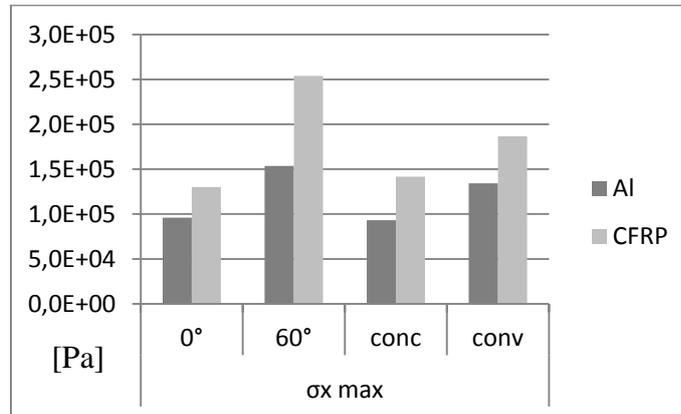


fig. 4.14: Confronto tra le tensioni normali longitudinali massime

Poichè il CFRP è più rigido dell'alluminio, gran parte dell'energia di deformazione si trasferisce dalle lamine allo strato di adesivo, comportando una intensificazione degli sforzi. L'effetto sulla tensione normale in direzione x (fig. 4.14) è maggiore per l'inclinazione a 60°, per la quale si calcola un aumento del 66%.

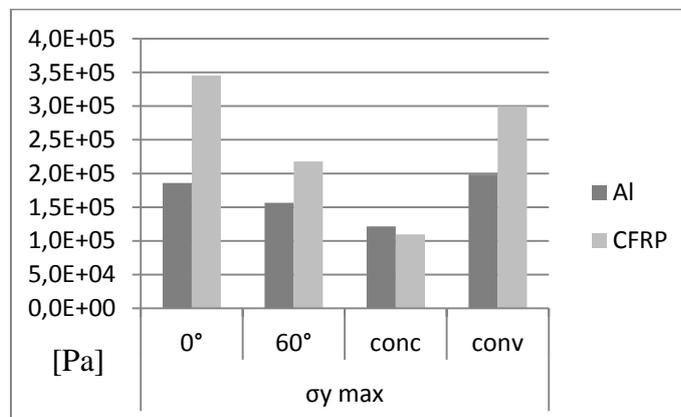


fig. 4.15: Confronto tra le tensioni normali trasversali massime

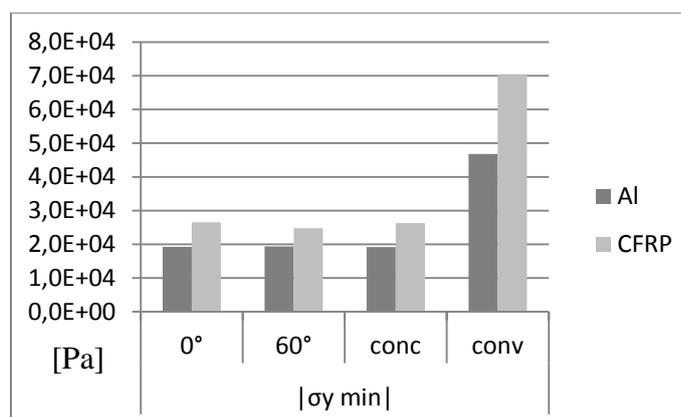


fig. 4.16: Confronto tra le tensioni normali trasversali minime

Per quanto riguarda il peel la geometria di riferimento 0° è piuttosto suscettibile, si calcola un aumento del picco di trazione trasversale del 92%. Anche col bordo convesso c'è una intensificazione delle tensioni, ma è controbilanciata dal picco di compressione (*fig. 4.16*). Con lamine in CFRP col profilo concavo pare che la σ_y massima si affievolisca leggermente e che la successiva compressione sia più intensa. Quindi nel passaggio da alluminio a CFRP il profilo concavo si comporta meglio, seguito dal bordo convesso.

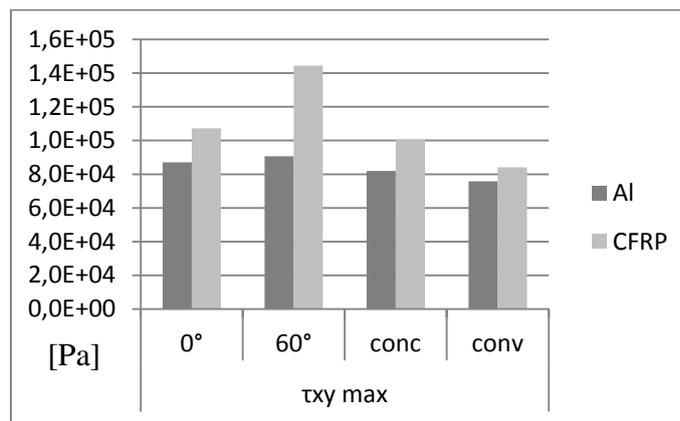


fig. 4.17: Confronto tra le tensioni di taglio xy massime

Anche per quanto riguarda la tensione di taglio τ_{xy} (*fig. 4.17*) i profili concavo e convesso hanno la meglio rispetto al raccordo a 60° e al riferimento a 0° .

5 CONCLUSIONI

Dopo una accurata impostazione del modello FEM i risultati ottenuti mostrano che, per il giunto a sovrapposizione semplice le geometrie del bordo dell'adesivo più resistenti, a parità di materiali usati, sono quella concava e quella convessa. La prima attenua il peel stress e la tensione di taglio a scapito della tensione normale in direzione della trazione. La seconda soluzione comporta un aumento della stessa tensione normale ma anche del peel; tuttavia intensifica notevolmente il picco di compressione in prossimità del bordo, comportando una probabile maggior resistenza a fatica.

Paragonando i risultati ottenuti con provini in alluminio e quelli ottenuti con CFRP 0° (cioè con fibre orientate in direzione della trazione) si ottiene che, poiché il composito è più rigido, le tensioni nello strato adesivo sono intensificate. Le geometrie che presentano una minore intensificazione degli sforzi sono nuovamente il concavo e il convesso. In questo caso però il concavo sembra contenere meglio le tensioni rispetto al convesso.

APPENDICE A: TABELLE DATI

Valori tensione normale in direzione x di provini in alluminio 2024T3 normalizzati rispetto alla tensione σ_x media della configurazione a 0°: $\sigma_{xm0^\circ} = 3.7097 \cdot 10^3$ Pa

a=12.7mm	0°	60°	45°	30°	-30°	conc	conv
2x/a	$\sigma_x/\sigma_{xm0^\circ}$						
-1,000	6,761	41,418	33,331	21,786	-1,415		
-0,980	25,845	25,534	25,221	25,163	27,109	25,130	36,207
-0,960	9,713	10,354	9,641	9,565	10,036	9,342	24,769
-0,941	5,745	6,428	5,731	5,706	5,778	5,622	12,616
-0,921	4,553	5,065	4,635	4,600	4,543	4,542	4,509
-0,901	3,373	3,099	3,169	3,228	3,535	3,175	-1,678
-0,881	1,226	1,325	1,221	1,206	1,262	1,168	-5,920
-0,861	-0,327	-0,108	-0,263	-0,297	-0,362	-0,326	-6,324
-0,842	-1,037	-0,977	-1,033	-1,039	-1,059	-1,062	-6,111
-0,822	-1,563	-1,509	-1,593	-1,580	-1,536	-1,600	-5,399
-0,802	-1,841	-1,806	-1,869	-1,854	-1,827	-1,867	-4,767
-0,782	-1,967	-1,937	-1,976	-1,970	-1,976	-1,984	-4,170
-0,762	-1,954	-1,932	-1,969	-1,964	-1,970	-1,972	-3,610
-0,743	-1,884	-1,888	-1,884	-1,881	-1,905	-1,888	-3,074
-0,723	-1,853	-1,853	-1,848	-1,844	-1,871	-1,848	-2,551
-0,703	-1,737	-1,743	-1,731	-1,728	-1,755	-1,731	-2,076
-0,683	-1,577	-1,589	-1,579	-1,572	-1,593	-1,577	-1,619
-0,663	-1,358	-1,376	-1,365	-1,358	-1,372	-1,362	-1,187
-0,644	-1,199	-1,188	-1,193	-1,192	-1,217	-1,193	-0,786
-0,624	-1,026	-1,029	-1,019	-1,019	-1,045	-1,018	-0,402
-0,604	-0,838	-0,851	-0,834	-0,832	-0,856	-0,833	-0,050
-0,584	-0,633	-0,651	-0,636	-0,630	-0,645	-0,634	0,277
-0,564	-0,462	-0,476	-0,458	-0,457	-0,475	-0,458	0,588
-0,545	-0,327	-0,329	-0,320	-0,322	-0,338	-0,321	0,856
-0,525	-0,192	-0,194	-0,186	-0,187	-0,203	-0,187	1,105
-0,505	-0,053	-0,059	-0,050	-0,049	-0,065	-0,050	1,330
-0,485	0,077	0,068	0,080	0,081	0,068	0,080	1,518
-0,465	0,171	0,167	0,176	0,175	0,163	0,175	1,689
-0,446	0,252	0,249	0,257	0,256	0,247	0,256	1,830
-0,426	0,334	0,331	0,337	0,336	0,328	0,336	1,941
-0,406	0,414	0,414	0,416	0,416	0,409	0,416	2,035
-0,386	0,472	0,471	0,475	0,475	0,467	0,474	2,091
-0,366	0,516	0,516	0,519	0,518	0,512	0,518	2,125
-0,347	0,557	0,556	0,559	0,558	0,554	0,558	2,139
-0,327	0,598	0,596	0,599	0,599	0,595	0,599	2,115
-0,307	0,631	0,631	0,633	0,632	0,629	0,632	2,073
-0,287	0,652	0,653	0,654	0,653	0,650	0,653	2,004
-0,267	0,670	0,670	0,671	0,671	0,669	0,671	1,902

-0,248	0,688	0,688	0,689	0,688	0,687	0,688	1,784
-0,228	0,704	0,705	0,705	0,705	0,704	0,705	1,630
-0,208	0,714	0,715	0,715	0,714	0,713	0,714	1,452
-0,188	0,720	0,721	0,721	0,720	0,720	0,720	1,256
-0,168	0,726	0,727	0,727	0,726	0,726	0,726	1,019
-0,149	0,733	0,733	0,733	0,733	0,733	0,733	0,763
-0,129	0,737	0,738	0,738	0,737	0,737	0,738	0,485
-0,109	0,739	0,740	0,739	0,739	0,739	0,739	0,182
-0,089	0,740	0,741	0,740	0,740	0,740	0,740	-0,179
-0,069	0,742	0,743	0,742	0,742	0,742	0,742	-0,694
-0,050	0,744	0,745	0,744	0,744	0,744	0,744	-1,454
-0,030	0,744	0,745	0,744	0,744	0,745	0,744	-2,278
-0,010	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744	-2,512
0,010	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744	0,744	-2,513
0,030	0,744	0,745	0,744	0,744	0,745	0,744	-2,280
0,050	0,744	0,745	0,744	0,744	0,744	0,744	-1,453
0,069	0,742	0,743	0,742	0,742	0,742	0,742	-0,690
0,089	0,740	0,741	0,740	0,740	0,740	0,740	-0,172
0,109	0,739	0,740	0,739	0,739	0,739	0,739	0,189
0,129	0,737	0,739	0,738	0,738	0,737	0,738	0,490
0,149	0,733	0,734	0,733	0,733	0,733	0,733	0,768
0,168	0,726	0,727	0,727	0,727	0,726	0,726	1,023
0,188	0,720	0,721	0,721	0,720	0,720	0,720	1,260
0,208	0,714	0,715	0,715	0,714	0,713	0,714	1,455
0,228	0,704	0,704	0,705	0,705	0,704	0,705	1,632
0,248	0,688	0,689	0,689	0,688	0,687	0,688	1,784
0,267	0,670	0,671	0,671	0,671	0,669	0,671	1,901
0,287	0,652	0,653	0,654	0,653	0,650	0,653	2,002
0,307	0,631	0,631	0,633	0,632	0,629	0,632	2,070
0,327	0,598	0,598	0,599	0,599	0,595	0,599	2,111
0,347	0,557	0,557	0,559	0,559	0,554	0,558	2,134
0,366	0,516	0,518	0,518	0,518	0,512	0,518	2,118
0,386	0,472	0,472	0,475	0,475	0,467	0,474	2,083
0,406	0,414	0,412	0,416	0,416	0,409	0,416	2,025
0,426	0,335	0,334	0,337	0,337	0,328	0,336	1,930
0,446	0,253	0,253	0,256	0,256	0,247	0,256	1,818
0,465	0,170	0,173	0,175	0,175	0,163	0,175	1,675
0,485	0,076	0,068	0,080	0,082	0,068	0,080	1,504
0,505	-0,054	-0,059	-0,050	-0,048	-0,065	-0,050	1,315
0,525	-0,191	-0,192	-0,187	-0,187	-0,203	-0,187	1,089
0,545	-0,327	-0,322	-0,321	-0,322	-0,338	-0,321	0,841
0,564	-0,462	-0,465	-0,459	-0,457	-0,475	-0,458	0,573
0,584	-0,634	-0,647	-0,637	-0,629	-0,645	-0,634	0,266
0,604	-0,835	-0,842	-0,835	-0,831	-0,856	-0,833	-0,058
0,624	-1,025	-1,025	-1,020	-1,019	-1,045	-1,018	-0,409
0,644	-1,200	-1,185	-1,195	-1,191	-1,217	-1,193	-0,793

0,663	-1,364	-1,356	-1,366	-1,357	-1,372	-1,362	-1,193
0,683	-1,576	-1,567	-1,580	-1,571	-1,593	-1,577	-1,627
0,703	-1,733	-1,747	-1,733	-1,726	-1,755	-1,731	-2,086
0,723	-1,851	-1,871	-1,851	-1,842	-1,871	-1,848	-2,562
0,743	-1,884	-1,859	-1,886	-1,879	-1,906	-1,888	-3,082
0,762	-1,954	-1,879	-1,973	-1,962	-1,970	-1,972	-3,620
0,782	-1,961	-1,897	-1,980	-1,967	-1,976	-1,984	-4,181
0,802	-1,838	-1,849	-1,874	-1,850	-1,827	-1,867	-4,781
0,822	-1,561	-1,490	-1,600	-1,577	-1,536	-1,600	-5,415
0,842	-1,055	-0,923	-1,038	-1,035	-1,059	-1,062	-6,125
0,861	-0,300	-0,014	-0,269	-0,294	-0,363	-0,326	-6,347
0,881	1,256	1,415	1,212	1,210	1,262	1,168	-5,957
0,901	3,376	3,143	3,158	3,233	3,534	3,175	-1,714
0,921	4,611	4,980	4,629	4,605	4,542	4,542	4,476
0,941	5,819	6,096	5,717	5,719	5,778	5,623	12,589
0,960	9,892	11,016	9,601	9,577	10,033	9,343	24,755
0,980	25,869	24,774	25,180	25,177	27,107	25,133	36,105
1,000	7,956	41,337	33,334	21,828	-1,400		

Valori tensione normale in direzione y di provini in alluminio 2024T3 normalizzati rispetto alla tensione σ_y media della configurazione a 0° : $\sigma_{ym0^\circ} = 2.08 \cdot 10^3$ Pa

a=12.7mm	0°	60°	45°	30°	-30°	conc	conv
$2x/a$	$\sigma_y/\sigma_{ym0^\circ}$						
-1,000	86,337	75,298	94,284	99,452	62,375		
-0,980	60,361	63,548	59,457	58,399	65,466	58,361	95,428
-0,960	16,292	19,123	16,593	16,084	17,537	15,620	58,942
-0,941	7,770	9,730	7,088	7,278	8,125	7,373	26,049
-0,921	5,111	7,362	5,560	5,381	5,020	5,234	4,307
-0,901	3,208	2,296	2,668	2,841	3,662	2,793	-11,888
-0,881	-2,155	-1,880	-2,159	-2,182	-2,084	-2,209	-22,462
-0,861	-5,827	-5,285	-5,659	-5,733	-5,940	-5,746	-21,845
-0,842	-7,623	-7,379	-7,586	-7,592	-7,708	-7,590	-20,095
-0,822	-8,766	-8,622	-8,863	-8,814	-8,687	-8,803	-18,273
-0,802	-9,194	-9,090	-9,274	-9,219	-9,173	-9,201	-16,562
-0,782	-9,240	-9,128	-9,268	-9,238	-9,275	-9,226	-14,908
-0,762	-8,921	-8,855	-8,971	-8,947	-8,976	-8,933	-13,352
-0,743	-8,529	-8,520	-8,527	-8,513	-8,601	-8,499	-11,853
-0,723	-8,273	-8,272	-8,264	-8,245	-8,331	-8,227	-10,385
-0,703	-7,762	-7,775	-7,749	-7,733	-7,819	-7,717	-9,050
-0,683	-7,138	-7,173	-7,147	-7,124	-7,186	-7,117	-7,763
-0,663	-6,419	-6,457	-6,437	-6,416	-6,464	-6,409	-6,545
-0,644	-5,887	-5,842	-5,869	-5,863	-5,943	-5,850	-5,404
-0,624	-5,311	-5,314	-5,290	-5,288	-5,366	-5,273	-4,308

-0,604	-4,694	-4,726	-4,680	-4,673	-4,745	-4,665	-3,301
-0,584	-4,039	-4,084	-4,047	-4,025	-4,076	-4,031	-2,361
-0,564	-3,519	-3,548	-3,508	-3,504	-3,556	-3,498	-1,467
-0,545	-3,104	-3,106	-3,086	-3,089	-3,137	-3,080	-0,682
-0,525	-2,684	-2,684	-2,668	-2,670	-2,715	-2,662	0,048
-0,505	-2,253	-2,264	-2,244	-2,239	-2,285	-2,238	0,717
-0,485	-1,868	-1,886	-1,860	-1,856	-1,896	-1,856	1,287
-0,465	-1,592	-1,598	-1,577	-1,579	-1,613	-1,576	1,810
-0,446	-1,348	-1,354	-1,337	-1,338	-1,364	-1,336	2,252
-0,426	-1,103	-1,109	-1,095	-1,095	-1,118	-1,094	2,614
-0,406	-0,863	-0,861	-0,857	-0,858	-0,881	-0,856	2,930
-0,386	-0,700	-0,698	-0,692	-0,692	-0,713	-0,692	3,146
-0,366	-0,575	-0,571	-0,567	-0,568	-0,585	-0,568	3,302
-0,347	-0,455	-0,456	-0,449	-0,450	-0,462	-0,450	3,405
-0,327	-0,335	-0,340	-0,330	-0,332	-0,341	-0,331	3,406
-0,307	-0,242	-0,242	-0,238	-0,239	-0,248	-0,238	3,360
-0,287	-0,184	-0,181	-0,179	-0,180	-0,189	-0,180	3,243
-0,267	-0,134	-0,133	-0,130	-0,131	-0,137	-0,131	3,037
-0,248	-0,083	-0,082	-0,081	-0,081	-0,086	-0,081	2,785
-0,228	-0,036	-0,035	-0,035	-0,035	-0,038	-0,035	2,442
-0,208	-0,011	-0,009	-0,009	-0,010	-0,013	-0,010	2,030
-0,188	0,005	0,006	0,006	0,006	0,004	0,006	1,572
-0,168	0,022	0,022	0,023	0,022	0,021	0,022	1,003
-0,149	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,385
-0,129	0,051	0,053	0,052	0,052	0,052	0,052	-0,295
-0,109	0,055	0,056	0,055	0,055	0,055	0,055	-1,061
-0,089	0,058	0,057	0,058	0,058	0,058	0,057	-1,906
-0,069	0,063	0,064	0,063	0,063	0,063	0,063	-2,933
-0,050	0,068	0,070	0,068	0,068	0,069	0,068	-4,661
-0,030	0,068	0,069	0,068	0,068	0,069	0,068	-6,608
-0,010	0,066	0,067	0,066	0,066	0,067	0,066	-7,243
0,010	0,067	0,067	0,066	0,066	0,067	0,066	-7,244
0,030	0,068	0,069	0,068	0,068	0,069	0,068	-6,610
0,050	0,068	0,069	0,068	0,068	0,069	0,068	-4,658
0,069	0,063	0,064	0,063	0,063	0,063	0,063	-2,925
0,089	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,057	-1,895
0,109	0,055	0,056	0,055	0,055	0,055	0,055	-1,050
0,129	0,051	0,054	0,052	0,052	0,052	0,052	-0,286
0,149	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,394
0,168	0,022	0,022	0,023	0,022	0,021	0,022	1,010
0,188	0,005	0,006	0,006	0,006	0,004	0,006	1,579
0,208	-0,011	-0,011	-0,010	-0,010	-0,013	-0,010	2,036
0,228	-0,037	-0,039	-0,035	-0,035	-0,038	-0,035	2,446
0,248	-0,083	-0,081	-0,081	-0,081	-0,086	-0,081	2,787
0,267	-0,133	-0,134	-0,130	-0,131	-0,137	-0,131	3,037
0,287	-0,183	-0,183	-0,179	-0,180	-0,189	-0,180	3,241

0,307	-0,242	-0,242	-0,238	-0,239	-0,248	-0,238	3,357
0,327	-0,335	-0,337	-0,330	-0,332	-0,341	-0,331	3,402
0,347	-0,455	-0,457	-0,449	-0,450	-0,462	-0,450	3,400
0,366	-0,575	-0,573	-0,567	-0,568	-0,585	-0,568	3,292
0,386	-0,701	-0,704	-0,692	-0,692	-0,713	-0,692	3,133
0,406	-0,867	-0,873	-0,857	-0,858	-0,881	-0,856	2,913
0,426	-1,100	-1,107	-1,095	-1,095	-1,118	-1,094	2,595
0,446	-1,346	-1,352	-1,337	-1,338	-1,364	-1,336	2,230
0,465	-1,595	-1,592	-1,577	-1,579	-1,613	-1,576	1,785
0,485	-1,872	-1,897	-1,860	-1,856	-1,896	-1,856	1,261
0,505	-2,254	-2,279	-2,244	-2,239	-2,285	-2,238	0,691
0,525	-2,681	-2,691	-2,669	-2,670	-2,715	-2,662	0,022
0,545	-3,105	-3,100	-3,086	-3,089	-3,137	-3,080	-0,706
0,564	-3,520	-3,537	-3,507	-3,504	-3,556	-3,498	-1,487
0,584	-4,042	-4,097	-4,046	-4,025	-4,076	-4,031	-2,374
0,604	-4,686	-4,721	-4,681	-4,673	-4,745	-4,665	-3,306
0,624	-5,307	-5,333	-5,290	-5,289	-5,366	-5,273	-4,310
0,644	-5,888	-5,871	-5,870	-5,863	-5,943	-5,850	-5,400
0,663	-6,435	-6,436	-6,437	-6,416	-6,464	-6,409	-6,535
0,683	-7,137	-7,146	-7,146	-7,124	-7,186	-7,117	-7,761
0,703	-7,752	-7,840	-7,748	-7,733	-7,820	-7,717	-9,053
0,723	-8,269	-8,374	-8,265	-8,246	-8,331	-8,227	-10,390
0,743	-8,529	-8,502	-8,526	-8,514	-8,601	-8,499	-11,844
0,762	-8,922	-8,788	-8,970	-8,947	-8,976	-8,933	-13,344
0,782	-9,223	-9,112	-9,267	-9,238	-9,275	-9,226	-14,906
0,802	-9,185	-9,318	-9,274	-9,220	-9,173	-9,201	-16,566
0,822	-8,763	-8,626	-8,869	-8,815	-8,688	-8,803	-18,281
0,842	-7,649	-7,356	-7,585	-7,592	-7,708	-7,590	-20,096
0,861	-5,764	-5,173	-5,660	-5,734	-5,940	-5,745	-21,861
0,881	-2,076	-1,753	-2,163	-2,184	-2,085	-2,210	-22,497
0,901	3,274	2,283	2,658	2,837	3,658	2,792	-11,887
0,921	5,303	6,707	5,560	5,376	5,017	5,235	4,319
0,941	8,179	8,012	7,118	7,292	8,133	7,375	26,047
0,960	16,781	19,962	16,544	16,076	17,532	15,623	59,029
0,980	60,538	62,240	59,442	58,385	65,457	58,346	95,288
1,000	89,370	72,486	94,490	99,490	62,418		

Valori tensione di taglio xy di provini in alluminio 2024T3 normalizzati rispetto alla tensione τ_{xy} media della configurazione a 0° : $\tau_{xy}m0^\circ = 1.3934 \cdot 10^4 \text{Pa}$

a=12.7mm	0°	60°	45°	30°	-30°	conc	conv
$2x/a$	$\tau_{xy}/\tau_{xym0^\circ}$						
-1,000	5,903	6,508	8,270	7,870	4,735		
-0,980	6,015	5,382	5,941	5,937	6,029	5,879	5,436

-0,960	4,865	4,420	4,803	4,805	4,892	4,783	4,871
-0,941	3,915	3,720	3,878	3,887	3,933	3,845	4,311
-0,921	3,430	3,265	3,382	3,391	3,470	3,379	3,792
-0,901	3,035	2,916	3,008	3,011	3,065	3,008	3,271
-0,881	2,655	2,600	2,635	2,637	2,678	2,637	2,747
-0,861	2,342	2,320	2,325	2,327	2,362	2,328	2,554
-0,842	2,070	2,072	2,059	2,059	2,084	2,061	2,391
-0,822	1,797	1,833	1,786	1,787	1,809	1,791	2,222
-0,802	1,558	1,620	1,549	1,549	1,569	1,556	2,062
-0,782	1,354	1,428	1,345	1,345	1,363	1,353	1,907
-0,762	1,183	1,267	1,173	1,174	1,192	1,183	1,759
-0,743	1,036	1,125	1,028	1,028	1,044	1,038	1,617
-0,723	0,909	1,000	0,901	0,902	0,915	0,911	1,479
-0,703	0,799	0,892	0,792	0,792	0,804	0,802	1,349
-0,683	0,706	0,796	0,700	0,701	0,711	0,710	1,223
-0,663	0,627	0,715	0,622	0,622	0,630	0,631	1,102
-0,644	0,552	0,638	0,548	0,548	0,555	0,556	0,988
-0,624	0,489	0,572	0,485	0,485	0,491	0,493	0,879
-0,604	0,435	0,514	0,431	0,431	0,437	0,439	0,776
-0,584	0,391	0,465	0,387	0,388	0,393	0,394	0,679
-0,564	0,350	0,421	0,348	0,348	0,352	0,354	0,586
-0,545	0,315	0,379	0,312	0,312	0,316	0,318	0,501
-0,525	0,285	0,346	0,283	0,283	0,286	0,288	0,420
-0,505	0,260	0,316	0,258	0,258	0,261	0,263	0,344
-0,485	0,239	0,291	0,237	0,238	0,240	0,242	0,276
-0,465	0,219	0,267	0,218	0,218	0,220	0,222	0,211
-0,446	0,203	0,246	0,201	0,201	0,203	0,205	0,153
-0,426	0,189	0,229	0,187	0,187	0,189	0,191	0,101
-0,406	0,177	0,214	0,176	0,176	0,178	0,179	0,053
-0,386	0,167	0,200	0,166	0,166	0,167	0,169	0,013
-0,366	0,157	0,188	0,156	0,157	0,157	0,159	-0,023
-0,347	0,150	0,177	0,149	0,149	0,150	0,151	-0,054
-0,327	0,143	0,168	0,143	0,143	0,143	0,145	-0,077
-0,307	0,138	0,160	0,137	0,137	0,138	0,139	-0,096
-0,287	0,133	0,153	0,132	0,132	0,133	0,134	-0,109
-0,267	0,128	0,147	0,128	0,128	0,128	0,129	-0,116
-0,248	0,125	0,142	0,124	0,125	0,125	0,126	-0,118
-0,228	0,122	0,137	0,122	0,122	0,122	0,123	-0,114
-0,208	0,119	0,133	0,119	0,119	0,119	0,120	-0,104
-0,188	0,117	0,130	0,117	0,117	0,117	0,118	-0,090
-0,168	0,115	0,127	0,115	0,115	0,115	0,116	-0,067
-0,149	0,114	0,125	0,113	0,114	0,114	0,114	-0,041
-0,129	0,113	0,123	0,112	0,112	0,112	0,113	-0,009
-0,109	0,112	0,121	0,111	0,111	0,111	0,112	0,030
-0,089	0,111	0,119	0,110	0,111	0,110	0,111	0,073
-0,069	0,110	0,118	0,110	0,110	0,110	0,110	0,127

-0,050	0,110	0,117	0,109	0,109	0,109	0,110	0,129
-0,030	0,109	0,117	0,109	0,109	0,109	0,109	0,107
-0,010	0,109	0,117	0,109	0,109	0,109	0,109	0,097
0,010	0,109	0,117	0,109	0,109	0,109	0,109	0,097
0,030	0,109	0,117	0,109	0,109	0,109	0,109	0,107
0,050	0,110	0,118	0,109	0,109	0,109	0,110	0,129
0,069	0,110	0,118	0,110	0,110	0,110	0,110	0,127
0,089	0,111	0,119	0,110	0,111	0,110	0,111	0,074
0,109	0,112	0,121	0,111	0,111	0,111	0,112	0,030
0,129	0,113	0,123	0,112	0,112	0,112	0,113	-0,009
0,149	0,114	0,125	0,113	0,114	0,114	0,114	-0,041
0,168	0,115	0,127	0,115	0,115	0,115	0,116	-0,067
0,188	0,117	0,130	0,117	0,117	0,117	0,118	-0,090
0,208	0,119	0,133	0,119	0,119	0,119	0,120	-0,104
0,228	0,122	0,137	0,122	0,122	0,122	0,123	-0,114
0,248	0,125	0,142	0,124	0,125	0,125	0,126	-0,119
0,267	0,128	0,147	0,128	0,128	0,128	0,129	-0,116
0,287	0,133	0,154	0,132	0,132	0,133	0,134	-0,110
0,307	0,138	0,161	0,137	0,137	0,138	0,139	-0,097
0,327	0,143	0,168	0,143	0,143	0,143	0,145	-0,078
0,347	0,150	0,177	0,149	0,149	0,150	0,151	-0,055
0,366	0,157	0,188	0,156	0,157	0,157	0,159	-0,024
0,386	0,167	0,200	0,166	0,166	0,167	0,169	0,011
0,406	0,177	0,214	0,176	0,176	0,178	0,179	0,051
0,426	0,189	0,229	0,187	0,187	0,189	0,191	0,099
0,446	0,203	0,247	0,201	0,201	0,203	0,205	0,151
0,465	0,219	0,267	0,218	0,218	0,220	0,222	0,209
0,485	0,239	0,291	0,237	0,238	0,240	0,242	0,273
0,505	0,260	0,317	0,258	0,258	0,261	0,263	0,341
0,525	0,285	0,346	0,283	0,283	0,286	0,288	0,417
0,545	0,315	0,381	0,312	0,312	0,316	0,318	0,498
0,564	0,350	0,421	0,348	0,348	0,352	0,354	0,582
0,584	0,391	0,465	0,387	0,388	0,393	0,394	0,676
0,604	0,435	0,515	0,431	0,431	0,437	0,439	0,773
0,624	0,489	0,572	0,484	0,485	0,491	0,493	0,875
0,644	0,553	0,640	0,548	0,548	0,555	0,556	0,985
0,663	0,627	0,716	0,622	0,622	0,630	0,631	1,098
0,683	0,707	0,797	0,700	0,701	0,711	0,710	1,219
0,703	0,799	0,895	0,792	0,792	0,804	0,802	1,345
0,723	0,909	1,002	0,901	0,902	0,915	0,911	1,475
0,743	1,036	1,126	1,028	1,029	1,044	1,038	1,614
0,762	1,182	1,269	1,173	1,174	1,192	1,183	1,756
0,782	1,354	1,428	1,344	1,345	1,363	1,353	1,904
0,802	1,559	1,620	1,549	1,549	1,569	1,556	2,059
0,822	1,798	1,838	1,786	1,787	1,809	1,791	2,219
0,842	2,071	2,072	2,059	2,060	2,084	2,061	2,387

0,861	2,346	2,318	2,325	2,327	2,362	2,328	2,551
0,881	2,659	2,605	2,635	2,637	2,678	2,637	2,744
0,901	3,039	2,919	3,007	3,010	3,065	3,008	3,270
0,921	3,437	3,270	3,382	3,391	3,470	3,379	3,792
0,941	3,934	3,696	3,877	3,887	3,933	3,845	4,309
0,960	4,869	4,427	4,804	4,804	4,892	4,783	4,871
0,980	6,016	5,261	5,943	5,934	6,029	5,880	5,424
1,000	6,248	6,469	8,251	7,880	4,737		

Valori tensione normale in direzione x di provini in CFRP normalizzati rispetto alla tensione σ_x media della configurazione a 0° : $\sigma_x m 0^\circ = 2.424 \cdot 10^4$ Pa

	0°	60°	45°	30°	-30°	conc	conv
$2x/a$	$\sigma_x/\sigma_x m 0^\circ$						
-1,000	0,548	10,414	7,122	4,194	-0,804		
-0,980	5,370	6,718	6,131	5,690	5,286	5,846	7,703
-0,960	2,879	3,014	3,009	2,913	2,901	2,900	6,322
-0,941	2,943	2,913	2,858	2,890	2,992	2,855	3,526
-0,921	2,875	2,923	2,911	2,901	2,846	2,875	1,877
-0,901	2,188	2,238	2,190	2,174	2,240	2,163	0,848
-0,881	1,694	1,736	1,712	1,695	1,700	1,696	0,448
-0,861	1,378	1,428	1,405	1,390	1,364	1,392	0,120
-0,842	1,270	1,252	1,266	1,264	1,270	1,261	-0,055
-0,822	1,080	1,099	1,081	1,077	1,087	1,074	0,074
-0,802	0,957	0,967	0,956	0,954	0,962	0,954	0,173
-0,782	0,882	0,885	0,883	0,881	0,882	0,880	0,262
-0,762	0,822	0,827	0,819	0,818	0,824	0,818	0,355
-0,743	0,774	0,773	0,774	0,772	0,773	0,773	0,442
-0,723	0,713	0,714	0,715	0,714	0,712	0,715	0,524
-0,703	0,677	0,677	0,678	0,677	0,675	0,678	0,598
-0,683	0,652	0,651	0,651	0,651	0,651	0,652	0,669
-0,663	0,648	0,646	0,645	0,646	0,648	0,646	0,735
-0,644	0,633	0,638	0,633	0,633	0,632	0,634	0,796
-0,624	0,625	0,627	0,626	0,625	0,624	0,626	0,853
-0,604	0,624	0,623	0,623	0,623	0,622	0,624	0,904
-0,584	0,629	0,628	0,627	0,629	0,629	0,629	0,951
-0,564	0,634	0,634	0,634	0,634	0,633	0,634	0,994
-0,545	0,635	0,635	0,635	0,635	0,634	0,636	1,030
-0,525	0,639	0,640	0,639	0,639	0,638	0,639	1,062
-0,505	0,646	0,646	0,645	0,646	0,644	0,646	1,089
-0,485	0,655	0,654	0,654	0,655	0,654	0,655	1,109
-0,465	0,659	0,660	0,659	0,659	0,659	0,660	1,126
-0,446	0,664	0,664	0,664	0,664	0,663	0,664	1,137
-0,426	0,669	0,670	0,669	0,669	0,669	0,670	1,143

-0,406	0,676	0,677	0,676	0,676	0,676	0,677	1,145
-0,386	0,681	0,682	0,681	0,681	0,681	0,681	1,140
-0,366	0,684	0,685	0,685	0,685	0,684	0,685	1,131
-0,347	0,688	0,688	0,688	0,688	0,688	0,688	1,119
-0,327	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	1,099
-0,307	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	1,076
-0,287	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698	1,048
-0,267	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	1,014
-0,248	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,976
-0,228	0,704	0,704	0,704	0,704	0,704	0,704	0,932
-0,208	0,706	0,706	0,706	0,706	0,705	0,706	0,884
-0,188	0,706	0,707	0,706	0,706	0,706	0,706	0,832
-0,168	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,771
-0,149	0,708	0,708	0,708	0,708	0,708	0,708	0,708
-0,129	0,709	0,709	0,709	0,709	0,709	0,709	0,641
-0,109	0,709	0,710	0,710	0,709	0,709	0,710	0,560
-0,089	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,451
-0,069	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,265
-0,050	0,710	0,711	0,710	0,710	0,710	0,710	-0,030
-0,030	0,710	0,711	0,711	0,711	0,711	0,711	-0,356
-0,010	0,711	0,711	0,711	0,710	0,711	0,711	-0,460
0,010	0,711	0,711	0,711	0,710	0,711	0,711	-0,461
0,030	0,711	0,711	0,711	0,711	0,711	0,711	-0,358
0,050	0,710	0,711	0,710	0,710	0,710	0,710	-0,030
0,069	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,267
0,089	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,710	0,455
0,109	0,709	0,710	0,710	0,709	0,709	0,710	0,565
0,129	0,709	0,709	0,709	0,709	0,709	0,709	0,644
0,149	0,708	0,709	0,708	0,708	0,708	0,708	0,711
0,168	0,707	0,708	0,707	0,707	0,707	0,707	0,774
0,188	0,706	0,707	0,706	0,706	0,706	0,706	0,834
0,208	0,705	0,706	0,706	0,706	0,705	0,706	0,886
0,228	0,704	0,704	0,704	0,704	0,704	0,704	0,934
0,248	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,977
0,267	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	1,014
0,287	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698	1,048
0,307	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	1,075
0,327	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	1,098
0,347	0,688	0,688	0,688	0,688	0,688	0,688	1,117
0,366	0,684	0,685	0,685	0,685	0,684	0,685	1,129
0,386	0,681	0,681	0,681	0,681	0,681	0,681	1,138
0,406	0,676	0,676	0,676	0,676	0,676	0,677	1,142
0,426	0,669	0,670	0,669	0,669	0,669	0,670	1,139
0,446	0,664	0,664	0,664	0,664	0,663	0,664	1,132
0,465	0,659	0,660	0,659	0,659	0,659	0,660	1,120
0,485	0,655	0,654	0,654	0,655	0,654	0,655	1,103

0,505	0,646	0,646	0,645	0,646	0,644	0,646	1,082
0,525	0,639	0,639	0,638	0,639	0,638	0,639	1,054
0,545	0,635	0,637	0,635	0,635	0,634	0,636	1,022
0,564	0,634	0,634	0,633	0,634	0,633	0,634	0,987
0,584	0,629	0,628	0,627	0,629	0,629	0,629	0,944
0,604	0,624	0,625	0,622	0,624	0,622	0,624	0,897
0,624	0,626	0,626	0,625	0,626	0,624	0,626	0,846
0,644	0,634	0,637	0,632	0,634	0,632	0,634	0,789
0,663	0,647	0,649	0,644	0,647	0,648	0,646	0,728
0,683	0,653	0,655	0,650	0,652	0,651	0,652	0,662
0,703	0,678	0,673	0,676	0,679	0,675	0,678	0,590
0,723	0,714	0,706	0,713	0,715	0,712	0,715	0,515
0,743	0,774	0,775	0,771	0,774	0,773	0,773	0,432
0,762	0,823	0,837	0,815	0,820	0,824	0,818	0,345
0,782	0,884	0,894	0,879	0,883	0,882	0,880	0,252
0,802	0,959	0,946	0,951	0,958	0,962	0,954	0,162
0,822	1,084	1,086	1,075	1,081	1,086	1,074	0,062
0,842	1,261	1,266	1,261	1,268	1,269	1,261	-0,069
0,861	1,389	1,432	1,398	1,394	1,364	1,392	0,098
0,881	1,704	1,750	1,704	1,700	1,700	1,696	0,415
0,901	2,206	2,257	2,181	2,179	2,239	2,163	0,803
0,921	2,860	2,889	2,904	2,908	2,846	2,875	1,826
0,941	2,947	2,747	2,836	2,906	2,992	2,856	3,477
0,960	2,932	3,196	2,968	2,936	2,900	2,901	6,278
0,980	5,350	6,434	6,082	5,719	5,285	5,848	7,649
1,000	0,919	10,498	7,106	4,204	-0,803		

Valori tensione normale in direzione y di provini in CFRP normalizzati rispetto alla tensione σ_y media della configurazione a 0° : $\sigma_{ym0^\circ} = 4.07 \cdot 10^3$ Pa

	0°	60°	45°	30°	-30°	conc	conv
$2x/a$	$\sigma_y/\sigma_{ym0^\circ}$						
-1,000	83,388	53,612	68,219	82,108	57,214		
-0,980	28,899	35,875	30,821	29,005	33,425	26,919	73,668
-0,960	-6,519	-6,089	-5,592	-5,970	-6,847	-6,459	34,216
-0,941	4,838	2,939	1,927	2,974	5,687	4,133	4,027
-0,921	5,390	7,226	6,255	6,007	4,603	5,666	-11,125
-0,901	0,348	0,391	-0,363	-0,170	1,121	-0,208	-17,234
-0,881	-2,029	-2,228	-1,943	-2,005	-2,050	-1,969	-14,181
-0,861	-3,335	-3,021	-3,135	-3,204	-3,539	-3,183	-13,212
-0,842	-3,838	-3,941	-3,864	-3,825	-3,913	-3,844	-12,332
-0,822	-5,162	-4,894	-5,131	-5,137	-5,106	-5,140	-11,210
-0,802	-5,010	-5,017	-5,059	-5,023	-5,003	-4,994	-10,125
-0,782	-4,711	-4,639	-4,722	-4,701	-4,762	-4,679	-9,066

0,149	0,037	0,035	0,037	0,036	0,037	0,036	0,838
0,168	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029	0,028	1,219
0,188	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	1,568
0,208	0,017	0,017	0,017	0,017	0,016	0,017	1,847
0,228	0,008	0,007	0,008	0,008	0,007	0,009	2,095
0,248	-0,015	-0,013	-0,015	-0,015	-0,016	-0,015	2,300
0,267	-0,039	-0,038	-0,039	-0,039	-0,041	-0,039	2,447
0,287	-0,060	-0,058	-0,059	-0,059	-0,062	-0,059	2,566
0,307	-0,084	-0,082	-0,083	-0,083	-0,086	-0,082	2,630
0,327	-0,128	-0,128	-0,128	-0,128	-0,129	-0,126	2,649
0,347	-0,192	-0,190	-0,192	-0,191	-0,195	-0,191	2,640
0,366	-0,250	-0,245	-0,249	-0,248	-0,254	-0,247	2,564
0,386	-0,304	-0,302	-0,302	-0,301	-0,309	-0,300	2,456
0,406	-0,379	-0,378	-0,377	-0,376	-0,385	-0,373	2,311
0,426	-0,507	-0,504	-0,511	-0,509	-0,515	-0,507	2,103
0,446	-0,635	-0,631	-0,637	-0,635	-0,643	-0,633	1,866
0,465	-0,754	-0,742	-0,748	-0,748	-0,762	-0,743	1,576
0,485	-0,872	-0,884	-0,873	-0,867	-0,883	-0,865	1,237
0,505	-1,076	-1,086	-1,082	-1,074	-1,090	-1,071	0,869
0,525	-1,310	-1,307	-1,314	-1,311	-1,326	-1,303	0,439
0,545	-1,526	-1,506	-1,525	-1,524	-1,541	-1,513	-0,027
0,564	-1,698	-1,704	-1,700	-1,693	-1,712	-1,685	-0,527
0,584	-1,956	-1,985	-1,979	-1,954	-1,965	-1,957	-1,092
0,604	-2,319	-2,321	-2,334	-2,324	-2,352	-2,312	-1,686
0,624	-2,656	-2,663	-2,661	-2,657	-2,691	-2,637	-2,324
0,644	-2,947	-2,911	-2,949	-2,941	-2,990	-2,926	-3,016
0,663	-3,156	-3,145	-3,178	-3,153	-3,152	-3,144	-3,738
0,683	-3,560	-3,532	-3,588	-3,565	-3,581	-3,555	-4,515
0,703	-3,911	-4,031	-3,924	-3,911	-3,955	-3,888	-5,334
0,723	-4,239	-4,350	-4,252	-4,230	-4,271	-4,205	-6,183
0,743	-4,144	-4,176	-4,158	-4,144	-4,190	-4,124	-7,106
0,762	-4,425	-4,263	-4,491	-4,464	-4,424	-4,443	-8,061
0,782	-4,690	-4,579	-4,720	-4,702	-4,762	-4,679	-9,057
0,802	-5,000	-5,346	-5,059	-5,023	-5,004	-4,994	-10,119
0,822	-5,068	-4,859	-5,141	-5,138	-5,106	-5,140	-11,209
0,842	-3,895	-3,847	-3,859	-3,826	-3,913	-3,844	-12,341
0,861	-3,275	-2,992	-3,135	-3,207	-3,539	-3,183	-13,232
0,881	-1,940	-2,201	-1,949	-2,006	-2,050	-1,969	-14,208
0,901	0,405	0,676	-0,370	-0,171	1,117	-0,211	-17,236
0,921	5,319	6,557	6,291	6,005	4,604	5,667	-11,117
0,941	5,213	0,858	2,009	3,007	5,709	4,136	4,033
0,960	-5,876	-4,557	-5,671	-5,974	-6,854	-6,454	34,388
0,980	29,155	36,995	30,813	29,000	33,418	26,885	73,627
1,000	84,838	51,887	68,437	82,111	57,248		

Valori tensione di taglio xy di provini in CFRP normalizzati rispetto alla tensione τ_{xy} media della configurazione a 0° : $\tau_{xy}m0^\circ = 1.3842 \cdot 10^4$ Pa

	0°	60°	45°	30°	$_{-30^\circ}$	conc	conv
$2x/a$	$\tau_{xy}/\tau_{xym0^\circ}$						
-1,000	7,194	10,419	11,850	11,104	5,131		
-0,980	7,746	7,388	7,549	7,476	7,671	7,252	6,076
-0,960	5,564	5,340	5,508	5,500	5,572	5,388	5,571
-0,941	3,943	4,082	3,910	3,945	3,908	3,825	4,703
-0,921	3,394	3,344	3,317	3,336	3,440	3,329	4,010
-0,901	2,984	2,926	2,969	2,969	3,017	2,960	3,345
-0,881	2,561	2,576	2,542	2,543	2,588	2,543	2,709
-0,861	2,240	2,239	2,220	2,222	2,266	2,224	2,460
-0,842	1,964	1,957	1,954	1,953	1,979	1,953	2,272
-0,822	1,648	1,666	1,635	1,634	1,663	1,640	2,132
-0,802	1,378	1,404	1,368	1,368	1,386	1,378	1,975
-0,782	1,149	1,176	1,141	1,140	1,156	1,154	1,814
-0,762	0,970	0,998	0,962	0,962	0,977	0,976	1,670
-0,743	0,823	0,849	0,816	0,816	0,828	0,830	1,529
-0,723	0,701	0,725	0,696	0,696	0,705	0,709	1,392
-0,703	0,601	0,626	0,596	0,596	0,605	0,609	1,264
-0,683	0,522	0,542	0,517	0,517	0,526	0,529	1,139
-0,663	0,456	0,476	0,452	0,452	0,458	0,463	1,019
-0,644	0,391	0,410	0,388	0,387	0,393	0,398	0,907
-0,624	0,338	0,357	0,335	0,335	0,339	0,345	0,799
-0,604	0,296	0,313	0,293	0,293	0,297	0,302	0,698
-0,584	0,265	0,279	0,262	0,262	0,265	0,270	0,603
-0,564	0,235	0,249	0,233	0,233	0,235	0,240	0,512
-0,545	0,209	0,221	0,208	0,208	0,209	0,214	0,429
-0,525	0,190	0,201	0,188	0,188	0,190	0,194	0,350
-0,505	0,175	0,184	0,174	0,174	0,175	0,179	0,276
-0,485	0,163	0,171	0,162	0,162	0,163	0,166	0,210
-0,465	0,151	0,159	0,150	0,150	0,151	0,154	0,148
-0,446	0,141	0,147	0,140	0,140	0,141	0,144	0,093
-0,426	0,134	0,140	0,133	0,133	0,134	0,136	0,043
-0,406	0,129	0,134	0,128	0,128	0,129	0,131	-0,002
-0,386	0,124	0,128	0,123	0,123	0,123	0,125	-0,039
-0,366	0,119	0,122	0,119	0,119	0,119	0,120	-0,071
-0,347	0,115	0,118	0,115	0,115	0,115	0,117	-0,099
-0,327	0,113	0,116	0,113	0,113	0,113	0,114	-0,119
-0,307	0,111	0,113	0,111	0,111	0,111	0,112	-0,134
-0,287	0,109	0,111	0,109	0,109	0,109	0,110	-0,144
-0,267	0,107	0,109	0,107	0,107	0,107	0,108	-0,146
-0,248	0,106	0,108	0,106	0,106	0,106	0,107	-0,145
-0,228	0,105	0,106	0,105	0,105	0,105	0,106	-0,136

-0,208	0,105	0,105	0,104	0,104	0,104	0,105	-0,122
-0,188	0,104	0,105	0,104	0,104	0,104	0,104	-0,103
-0,168	0,103	0,104	0,103	0,103	0,103	0,103	-0,077
-0,149	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	-0,045
-0,129	0,103	0,103	0,102	0,103	0,102	0,103	-0,008
-0,109	0,102	0,103	0,102	0,102	0,102	0,102	0,034
-0,089	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,082
-0,069	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,146
-0,050	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,144
-0,030	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,113
-0,010	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,105
0,010	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,105
0,030	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,114
0,050	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,146
0,069	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,147
0,089	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,083
0,109	0,102	0,103	0,102	0,102	0,102	0,102	0,034
0,129	0,103	0,103	0,102	0,103	0,102	0,103	-0,008
0,149	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	-0,045
0,168	0,103	0,104	0,103	0,103	0,103	0,103	-0,077
0,188	0,104	0,105	0,104	0,104	0,104	0,104	-0,103
0,208	0,105	0,105	0,104	0,104	0,104	0,105	-0,122
0,228	0,105	0,106	0,105	0,105	0,105	0,106	-0,136
0,248	0,106	0,108	0,106	0,106	0,106	0,107	-0,145
0,267	0,107	0,109	0,107	0,107	0,107	0,108	-0,147
0,287	0,109	0,111	0,109	0,109	0,109	0,110	-0,144
0,307	0,111	0,113	0,111	0,111	0,111	0,112	-0,135
0,327	0,113	0,116	0,113	0,113	0,113	0,114	-0,119
0,347	0,115	0,119	0,115	0,115	0,115	0,117	-0,100
0,366	0,119	0,123	0,119	0,119	0,119	0,120	-0,073
0,386	0,124	0,128	0,123	0,123	0,123	0,125	-0,041
0,406	0,129	0,134	0,128	0,128	0,129	0,131	-0,004
0,426	0,134	0,140	0,133	0,133	0,134	0,136	0,041
0,446	0,141	0,148	0,140	0,140	0,141	0,144	0,090
0,465	0,151	0,158	0,150	0,150	0,151	0,154	0,145
0,485	0,163	0,172	0,162	0,162	0,163	0,166	0,207
0,505	0,175	0,185	0,174	0,174	0,175	0,179	0,272
0,525	0,190	0,200	0,188	0,188	0,190	0,194	0,346
0,545	0,209	0,222	0,208	0,208	0,209	0,214	0,424
0,564	0,235	0,249	0,233	0,233	0,235	0,240	0,507
0,584	0,264	0,279	0,262	0,262	0,265	0,270	0,598
0,604	0,296	0,313	0,293	0,293	0,297	0,302	0,693
0,624	0,338	0,357	0,335	0,335	0,339	0,345	0,794
0,644	0,392	0,413	0,388	0,387	0,393	0,398	0,902
0,663	0,456	0,476	0,452	0,452	0,458	0,463	1,014
0,683	0,523	0,543	0,517	0,517	0,526	0,529	1,134

0,703	0,602	0,629	0,596	0,596	0,605	0,609	1,259
0,723	0,701	0,727	0,696	0,696	0,705	0,709	1,387
0,743	0,822	0,849	0,816	0,816	0,828	0,830	1,525
0,762	0,969	0,999	0,962	0,962	0,977	0,976	1,666
0,782	1,149	1,174	1,141	1,140	1,156	1,154	1,810
0,802	1,378	1,401	1,368	1,368	1,386	1,378	1,971
0,822	1,650	1,672	1,635	1,634	1,663	1,641	2,129
0,842	1,965	1,960	1,954	1,953	1,979	1,953	2,267
0,861	2,243	2,225	2,220	2,222	2,266	2,224	2,456
0,881	2,563	2,570	2,542	2,543	2,588	2,543	2,706
0,901	2,985	2,935	2,971	2,968	3,017	2,960	3,346
0,921	3,412	3,349	3,318	3,336	3,440	3,329	4,013
0,941	4,007	3,945	3,904	3,946	3,908	3,825	4,706
0,960	5,584	5,391	5,510	5,498	5,572	5,388	5,578
0,980	7,746	7,120	7,551	7,470	7,672	7,253	6,048
1,000	7,493	10,437	11,809	11,119	5,136		

BIBLIOGRAFIA

- [1] Robert Lacombe "Adhesion Measurement Methods: Theory and Practice"
- [2] Cong N. Duong & Chun Hui Wang "Composite Repair: Theory and Design"
- [3] M.D.Banea & L.F.M. da Silvia "Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview"
- [4] Turaga V.R.S Umamaheswar e Ripudman Singh "Modelling of a Patch Repair to a Thin Cracked Sheet"
- [5] Brian D. Flinn "Improving Adhesive Bonding of Composites Through Surface Characterization"
- [6] B.Ehrhart, B.Valeske, C.E.Muller e C.Bockenheimer "Methods for the Quality Assessment of Adhesive Bonded CFRP Structures - A Resumé"
- [7] Tohsio Abe "Composite Application Challenge in Primary Aircraft Structures"
- [8] R. F. Johnson "NDI Method for Qualification of Weak Bonding Strength of Composite Structures"
- [9] "FEA Modeling on Adhesive Joint for Composite Fuselage Model", F. Mustapha, N.W.Sim & A.Shahrjerdi
- [10] R.K.Krishna, K.S.Sajikumar e Dr.N.Asok Kumar "FEA of Composite Bonded Single Lap Joint Under Axial Tensile Force"
- [11] D.Castagnetti, A.Spaggiari & E.Dragoni "Ricerche a Reggio Emilia sui Sistemi di Giunzione"
- [12] G.Mazzucco, V.Salomoni, C.Pellegrino e C.E.Majorana "Comparisons Between Numerical and Experimental Results for FRP Strengthened Concrete Elements: Role of Normal Stresses at Interface"
- [13] A.Pirondi e F.Moroni "Simulazione della Propagazione di Difetti a Fatica in Giunti Incollati in Condizioni di Modo Misto Attraverso un Modello Modificato di Zona Coesiva"
- [14] ASTM standard approved by agencies of the Department of Defense "Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)"
- [15] F.L.Ribeiro, L.Borges e J.R.M.d'Almeida "Numerical stress analysis of carbon-fiber-reinforced epoxy composite single-lap joints"
- [16] "Joint Materials:Design and Application" vol.223 Part I JMDA219 IMechE 2009