

15. Giunzioni di materiali compositi

15.1. Generalità

Per la costruzione di macchine e sistemi meccanici complessi è in genere necessario unire i vari componenti mediante opportune giunzioni.

Tenendo conto che le giunzioni costituiscono quasi sempre l'elemento più debole di un sistema e sovente anche quello più costoso, nella progettazione è buona norma minimizzare il numero di giunti al fine di aumentare la resistenza e/o l'affidabilità e di ridurre i costi.

A tal fine si osservi che, sebbene i materiali compositi permettono di produrre più facilmente pezzi relativamente complessi e/o di grandi dimensioni, l'uso delle giunzioni resta sempre necessario almeno per l'applicazione di vincoli e carichi alle strutture nonché, come si verifica frequentemente, per collegare elementi in composito con elementi di altro materiale.

Si possono avere pertanto unioni tra materiali compositi e unioni tra elementi metallici ed elementi in materiale composito. In dettaglio, queste possono essere realizzati mediante:

- 1) **giunti incollati**, nei quali il carico viene trasmesso attraverso la superficie incollata degli elementi con sforzi prevalentemente di taglio sull'adesivo;
- 2) **giunti meccanici** nei quali il carico viene trasmesso attraverso elementi metallici (bulloni, rivetti, ecc.), con sforzi prevalentemente di compressione sugli elementi collegati;

Ciascuno dei due tipi di giunzione è caratterizzata da pregi e difetti. In genere i collegamenti più efficienti si ottengono con giunzioni della prima categoria (giunti incollati), essendo questi caratterizzati da relativa semplicità ed economia uniti a basso peso e limitati fenomeni di concentrazione delle tensioni.

La tabella seguente riporta un elenco sintetico di vantaggi e svantaggi di ciascuna delle due tipologie di giunto.

Tab.1 – Vantaggi e svantaggi di giunti incollati e giunti meccanici.

Vantaggi	Svantaggi
Giunti incollati	
Assenza di concentrazione di tensioni	Spessori limitati dei componenti da unire
Elevata rigidezza	Difficile ispezione
Buona resistenza a fatica	Facile decadimento per fattori ambientali
Peso contenuto	Tensioni residue, specie con mat. diversi
Non ci sono problemi di fretting/corrosione	Non smontabile
Superfici continue	Scarsa resistenza allo sfogliamento
Giunti meccanici	
Nessuna limitazione degli spessori	Concentrazione delle tensioni
Semplicità costruttiva	Scarsa resistenza a fatica
Non si hanno tensioni residue	Soggetti a fretting e/o corrosione
Smontabilità	Rigidezza limitata
Facile ispezione	Danneggiamento parti da unire (fori ecc)

15.2. Giunti incollati

Con questi giunti, se ben progettati, è possibile ottenere un trasferimento degli sforzi tra gli elementi collegati senza dannosi effetti di concentrazione di tensione e/o pericolose tensioni di sfogliamento dell'adesivo. Le usuali configurazioni di una giunzione incollata composito-composito o metallo-composito sono illustrate in fig.1.

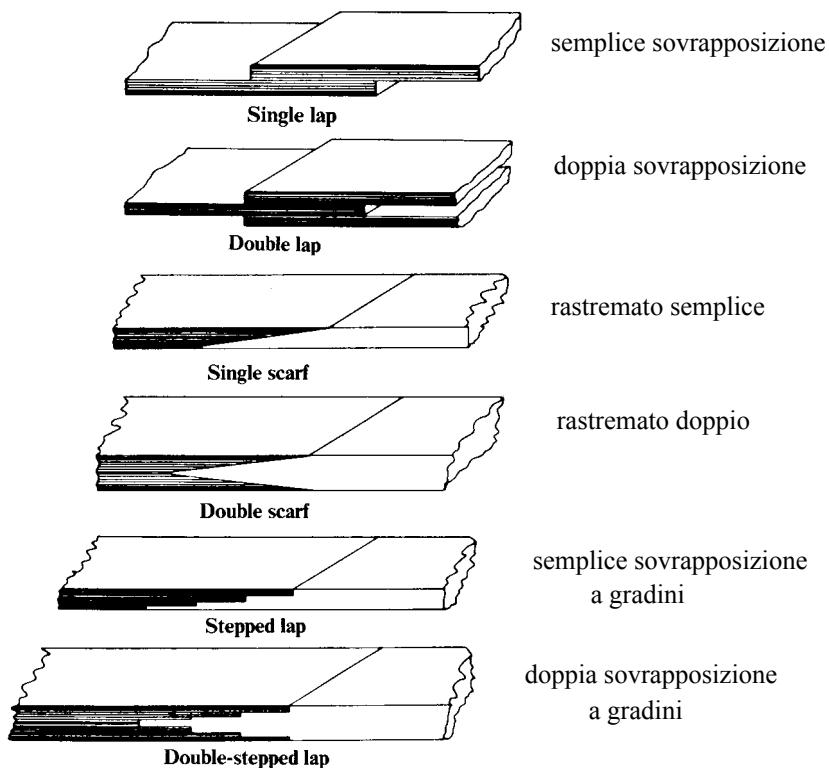


Fig.1 – Varie configurazioni di giunzioni incollate.

Al crescere dello spessore degli elementi da collegare e quindi della resistenza richiesta, si va dal giunto a semplice sovrapposizione (*single lap joint*) al giunto a doppia sovrapposizione a gradini (*double-stepped lap*, per spessori maggiori a 6-7 mm). Anche il costo cresce passando dal giunto a semplice sovrapposizione a quello a sovrapposizione a gradini. Conseguentemente, tra le varie configurazioni che assicurano la resistenza voluta, il progettista userà quella semplice che risulta anche la più economica (dall'alto verso il basso).

Alla categoria dei giunti incollati appartengono anche i cosiddetti giunti *co-cured*, nei quali non è presente un vero e proprio adesivo e l'incollaggio degli elementi è ottenuto sfruttando le proprietà di adesivo della matrice del composito (solitamente resina epossidica). In pratica tali giunti si ottengono accostando gli elementi da collegare (compositi o compositi e metalli) con applicazione opportuna pressione allorquando la matrice si trova in uno stato di parziale polimerizzazione; realizzato così il giunto si procede alla cura dello stesso contemporaneamente a quella del materiale composito (*co-cured*).

L'obiettivo di una buona progettazione di un collegamento incollato è quello di ottenere un giunto che abbia la stessa resistenza degli elementi collegati (efficienza 100%) in modo da evitare sia inutili sovradimensionamenti del giunto (limitando così anche i relativi costi) sia sottodimensionamenti dello stesso che potrebbero vanificare gli sforzi compiuti per ottimizzare le prestazioni degli elementi collegati (giunto = anello debole della catena).

I parametri essenziali nella progettazione di una giunzione incollata sono:

- 1) resistenza, rigidezza e coefficienti di dilatazione termica delle parti da unire;
- 2) resistenza dell'adesivo;
- 3) direzione di applicazione del carico.

Per la previsione della resistenza di una giunzione incollata è necessario tenere conto delle varie modalità di cedimento caratteristiche di tali manufatti, quali in particolare:

- a) taglio dell'adesivo;
- b) sfogliamento dell'adesivo;
- c) sfogliamento e/o delaminazione del materiale composito;
- d) trazione o compressione degli elementi collegati.

Per giunzioni incollate di forma complessa, è difficile in generale eseguire previsioni teoriche attendibili della resistenza in quanto risulta difficile prevedere il cimento dell'adesivo e dei materiali in prossimità del giunto, nonché la effettiva modalità di rottura dello stesso. In questi casi una accurata stima della resistenza può essere ottenuta soltanto mediante analisi sperimentale condotta mediante prototipi o provini aventi forma e dimensioni confrontabili con la giunzione stessa, soggetti ad un regime di sollecitazione prossimo o eguale a quello di esercizio.

Una alternativa alla analisi sperimentale è in linea di principio offerta dallo studio numerico del problema mediante elementi finiti (FEM), elementi di contorno (BEM) ecc.. In tal senso diversi studi numerici sono stati compiuti negli ultimi decenni da vari ricercatori, con lo scopo di individuare dei criteri di previsione della resistenza di un giunto incollato. A causa della elevata influenza di fenomeni come la non-linearietà dei materiali (adesivo, componenti) e la singolarità delle tensioni (discontinuità geometriche e del materiale), nonché a causa delle difficoltà di previsione del meccanismo di danneggiamento e rottura, allo stato attuale però una accurata progettazione di un giunto non può prescindere da una adeguata sperimentazione.

Ciò nonostante, la conoscenza teorica o numerica dello stato di tensione è certamente utile per una progettazione di massima del giunto, per una analisi sistematica dello stesso finalizzata ad evidenziare l'influenza dei vari parametri, nonché per la corretta comprensione dei risultati sperimentali.

Se il cedimento del giunto avviene secondo le modalità di cui ai precedenti punti a) e b), allora per una attendibile previsione della resistenza è necessario conoscere la resistenza propria dell'adesivo e lo stato di sollecitazione in cui questo si trova nel giunto considerato.

La resistenza dell'adesivo può essere determinata mediante prove di trazione eseguite utilizzando provini spessi incollati a sovrapposizione oppure mediante il cosiddetto "*napkin-ring*" test che fa uso di provini cilindrici ottenuti incollando per sovrapposizione due cilindri di cui uno avente diametro esterno pari al diametro interno dell'altro.

Con queste prove si ottengono le curve tensione tangenziale-scorrimento del tipo di quelle riportate in Fig.2 (adesivo tipo FM 300) per varie temperature di esercizio.

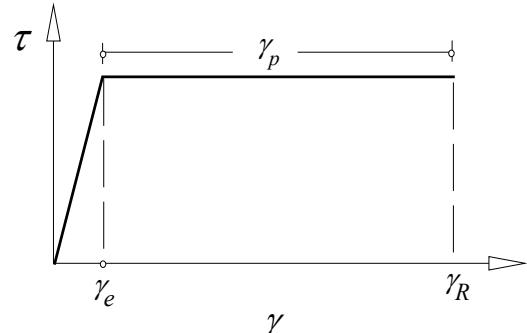
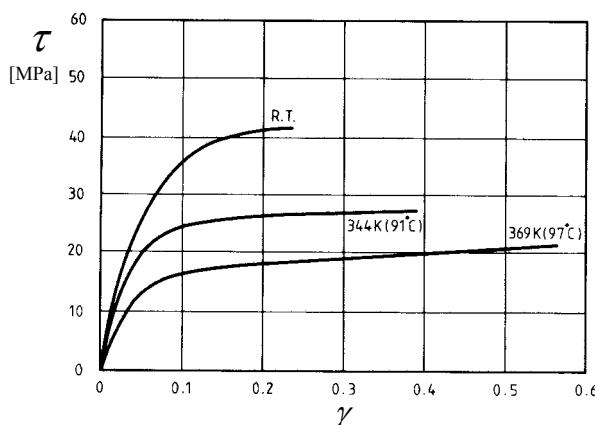


Fig.2 – Curve caratteristiche $\tau-\gamma$ per adesivo tipo FM 300 ottenute mediante *napkin-ring* test.

Si vede come al crescere della temperatura aumenta la duttilità dell'adesivo: si ha un abbassamento della tensione di scorrimento ed un aumento significativo dello scorrimento a rottura.

Nel seguito sono considerati i principali fattori che influenzano la resistenza ed il comportamento di una giunzione a doppia sovrapposizione (*double lap joint*), che è nella pratica la configurazione (semplice e robusta) più utilizzata. Come si vedrà meglio più avanti, i concetti esposti per il giunto a doppia sovrapposizione possono essere in genere facilmente estesi anche alle altre configurazioni di giunto.

15.3. Giunto a doppia sovrapposizione: resistenza a taglio

15.3.1 Distribuzione delle tensioni tangenziali

Sebbene modernamente si dispone di efficienti codici di calcolo numerico (FEM, BEM), l'analisi numerica dello stato di tensione di un giunto incollato è compito relativamente impegnativo e dispendioso in termini di potenza di calcolo e di tempi di elaborazione necessari; gli elevati effetti di intaglio presenti in un giunto infatti richiedono modelli numerici con mesh molto rifinite ed una analisi sistematica dei vari parametri che influenzano il comportamento del giunto (lunghezza, spessore dell'adesivo, rigidezza dei componenti ecc.) richiede la ripetizione di tali elaborazioni. Ciò giustifica largamente gli studi teorici eseguiti da vari autori sull'argomento, e l'uso dell'approccio analitico alla progettazione dei giunti.

Nella pratica, la stima della resistenza di un giunto incollato viene eseguita anzitutto considerando la rottura di questo per cedimento a taglio dell'adesivo. A tal fine lo stato di sollecitazione cui è soggetto l'adesivo in un giunto composito-composito o composito-metalllo viene eseguita in modo approssimato mediante la teoria classica dei giunti incollati sviluppata sin dalla prima metà del secolo scorso per i giunti metallo-metallo. Questa teoria si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- (a) l'adesivo ha un comportamento elastico lineare;
- (b) sono assenti tensioni interlaminari (dovute alle diverse proprietà elastiche di materiali ed adesivo a contatto);
- (c) sono assenti sollecitazioni flettenti.

La figura seguente mostra lo schema utilizzato per la determinazione della distribuzione delle tensioni tangenziali nell'adesivo di un giunto a doppia sovrapposizione.

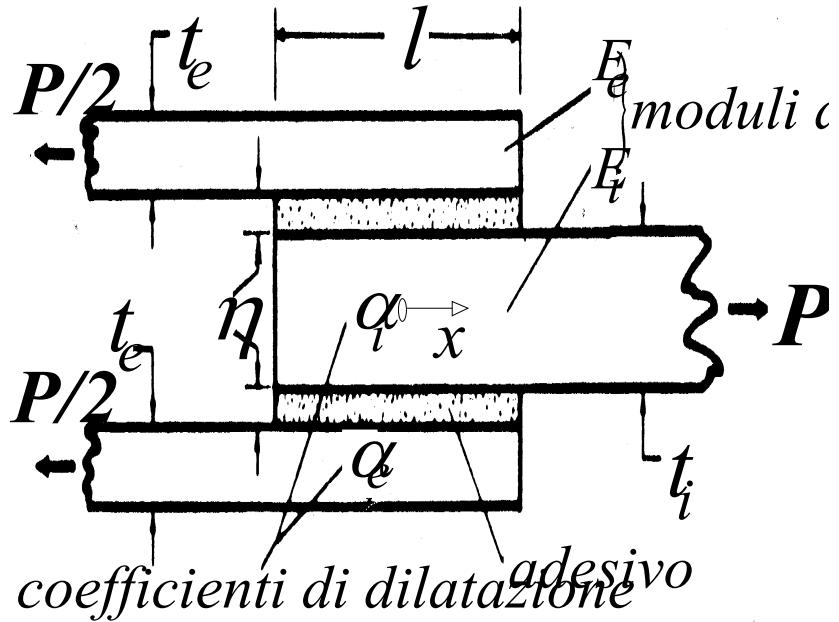


Fig.3 – Giunto a doppia sovrapposizione: geometria e notazione generale utilizzata.

Con riferimento alla Fig.3, considerando l'equilibrio di un tratto infinitesimo di ciascuno degli elementi collegati (interno ed esterno) si ha:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Diagram showing two differential elements: one internal (i) of width } dx \text{ and height } t_i, and one external (e) of width } dx \text{ and height } t_e. \text{ The internal element has a normal force } P_i \text{ and shear stress } \tau. \text{ The external element has a normal force } P_e \text{ and shear stress } \tau. & \left\{ \begin{array}{l} P_e = P_e + dP_e + \tau dx \\ P_i + 2\tau dx = P_i + dP_i \end{array} \right. & \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_e}{dx} + \tau = 0 \\ \frac{dP_i}{dx} - 2\tau = 0 \end{array} \right. \quad (1)
 \end{array}$$

Avendo indicato con P_i e P_e lo sforzo normale presente nella generica sezione dell'elemento interno e degli elementi esterni rispettivamente. La distribuzione delle tensioni tangenziali produce quindi un progressivo trasferimento del carico da un elemento all'altro. Considerando per esempio l'elemento interno le tensioni normali variano in pratica dal valore P/t_i a 0 andando dalla sezione di attacco alla sezione di estremità. Per l'elemento interno e per gli elementi esterni, ipotizzando una distribuzione uniforme delle tensioni normali nella generica sezione si può scrivere:

$$\begin{cases} P_e = \sigma_e t_e \\ P_i = \sigma_i t_i \end{cases} \quad (2)$$

Le (2) in termini di deformazione e di spostamenti si possono scrivere come:

$$\begin{cases} P_e = E_e \varepsilon_e t_e = E_e \frac{du_e}{dx} t_e \\ P_i = E_i \varepsilon_i t_i = E_i \frac{du_i}{dx} t_i \end{cases} \quad (3)$$

avendo indicato con u_i ed u_e lo spostamento della generica sezione dell'elemento interno e degli elementi esterni rispettivamente. Lo scorrimento γ dell'adesivo nella generica sezione del giunto è

dato da:

$$\gamma = \frac{(u_i - u_e)}{\eta} \quad (4)$$

Nella ipotesi di comportamento elastico lineare dell'adesivo, a tale scorrimento è associata la tensione tangenziale:

$$\tau = G_a \gamma = \frac{G_a}{\eta} (u_i - u_e) \quad (5)$$

avendo indicato con G_a il modulo di elasticità trasversale dell'adesivo. Derivando rispetto a x la (5) si ha:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G_a}{\eta} \left(\frac{du_i}{dx} - \frac{du_e}{dx} \right) \quad (6)$$

Sostituendo la (3) nella (6) si ha quindi:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G_a}{\eta} \left(\frac{P_i}{E_i t_i} + \frac{P_e}{E_e t_e} \right) \quad (7)$$

Derivando rispetto a x la (7) si ottiene:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} = \frac{G_a}{\eta} \left(\frac{dP_i}{dx} \frac{1}{E_i t_i} - \frac{dP_e}{dx} \frac{1}{E_e t_e} \right) \quad (8)$$

Sostituendo le (1) nelle (8) si ottiene infine:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} = \tau \frac{G_a}{\eta} \left(\frac{2}{E_i t_i} + \frac{1}{E_e t_e} \right) \quad (9)$$

Indicando con λ^2 il termine che a secondo membro della (9) moltiplica la tensione tangenziale, cioè:

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_a}{\eta} \left(\frac{2}{E_i t_i} + \frac{1}{E_e t_e} \right)} = \sqrt{\frac{G_a}{E \eta} \left(\frac{1+S}{S} \right)} \quad (10)$$

avendo indicato con S il cosiddetto sbilanciamento del giunto, definito dal rapporto tra la rigidezza dell'elemento interno e la somma delle rigidezze degli elementi esterni, cioè:

$$S = \frac{E_i t_i}{2 E_e t_e} \quad (11)$$

Con tale posizione l'equazione differenziale (9) assume la forma notevole:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} = \lambda^2 \tau \quad (12)$$

la cui soluzione generale, come è facile verificare, è data da:

$$\tau = A \sinh(\lambda x) + B \cosh(\lambda x) \quad (13)$$

La costante B si può valutare imponendo la condizione di equilibrio:

$$P = 2\tau_m l = 2 \int_{-l/2}^{l/2} \tau dx = 2 \left[\frac{A \cosh(\lambda x)}{\lambda} + \frac{B \sinh(\lambda x)}{\lambda} \right]_{-l/2}^{l/2} = \frac{4B \sinh(\lambda \frac{l}{2})}{\lambda} \quad (14)$$

da cui si ottiene immediatamente:

$$B = \frac{P\lambda}{4 \sinh(\lambda \frac{l}{2})} \quad (15)$$

La costante A invece si può valutare invece introducendo le condizioni:

$$\begin{cases} T_e = 0, & T_i = T \quad \text{per } x = l/2 \\ T_i = 0, & T_e = T/2 \quad \text{per } x = -l/2 \end{cases} \quad (16)$$

nella eq. differenziale del primo ordine (7), che tenendo conto della (13) fornisce:

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\tau}{dx} \right]_{x=l/2} &= \frac{G_a}{\eta} \left(\frac{P}{E_i t_i} \right) = A \lambda \cosh(\lambda \frac{l}{2}) + B \lambda \sinh(\lambda \frac{l}{2}); \\ \left[\frac{d\tau}{dx} \right]_{x=-l/2} &= -\frac{G_a}{\eta} \left(\frac{P}{2 E_e t_e} \right) = A \lambda \cosh(\lambda \frac{l}{2}) - B \lambda \sinh(\lambda \frac{l}{2}); \end{aligned} \quad (17)$$

Sommendo membro a membro le (17) si ottiene:

$$2A\lambda \cosh(\lambda \frac{l}{2}) = \frac{P}{2} \frac{G_a}{E t \eta} \left(\frac{1-S}{S} \right) = \frac{P\lambda^2}{2} \left[\frac{1-S}{1+S} \right] \quad (18)$$

da cui si ottiene infine:

$$A = \frac{P\lambda}{2 \cosh(\lambda \frac{l}{2})} \left[\frac{1-S}{1+S} \right] \quad (19)$$

Sostituendo la (15) e la (19) nella (13) si ottiene che la distribuzione delle tensioni tangenziali nell'adesivo è data in generale dalla relazione:

$$\tau = \frac{P\lambda}{4 \cosh(\lambda \frac{l}{2})} \left[\frac{1-S}{1+S} \right] \sinh(\lambda x) + \frac{P\lambda}{4 \sinh(\lambda \frac{l}{2})} \cosh(\lambda x) \quad (20)$$

Un caso notevole è quello del giunto bilanciato ($S=1$) a cui si fa riferimento nella progettazione e per il quale si ha in particolare:

$$\tau = \frac{P\lambda}{4 \sinh(\lambda \frac{l}{2})} \cosh(\lambda x) \quad (21)$$

Tenuto conto della parità della funzione coseno iperbolico, si ha che in un giunto bilanciato la distribuzione delle tensioni tangenziali è simmetrica rispetto al piano medio del giunto come mostra a titolo di esempio la Fig.4 che riporta l'andamento della tensione tangenziale normalizzata $\tau/P\lambda$ per un giunto bilanciato con $\lambda=1 \text{ mm}^{-1}$, al variare dell'ascissa adimensionale x/l .

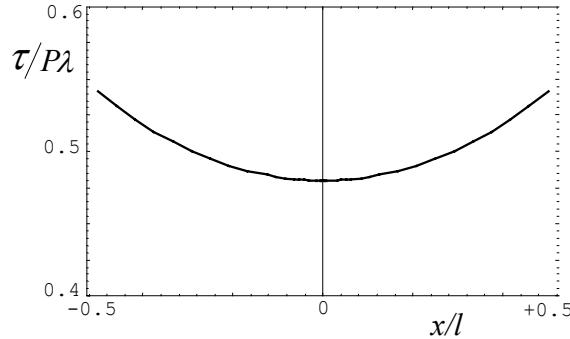


Fig.4 – Andamento delle tensioni tangenziali nell'adesivo ($\lambda=1$).

Si vede in particolare come la massima tensione tangenziale si verifica in corrispondenza degli estremi del giunto; in dettaglio dalla (21) si ha:

$$\tau_{\max} = \tau(l/2) = \tau(-l/2) = \frac{P\lambda}{4 \tanh(\lambda \frac{l}{2})} \quad (22)$$

La (22) mostra come fissato il carico applicato al giunto, la massima tensione tangenziale decresce al crescere della lunghezza del giunto tendendo asintoticamente al valore $P\lambda/4$ (essendo $\tanh(\infty)=1$) come mostra la seguente Fig.5.

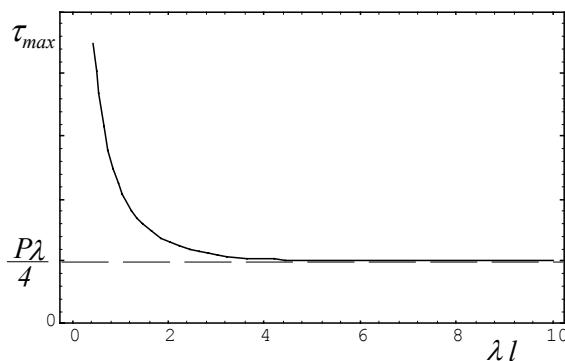


Fig.5 – Andamento della massima tensione tangenziale al variare della lunghezza normalizzata λl .

15.3.2 Lunghezza del giunto e carico massimo sopportabile

Tenuto conto che, come mostra la Fig.5, la massima tensione tangenziale raggiunge in pratica il suo

minimo per $\lambda l=10$ (vedi anche Eq.(22)), si ha che ad un aumento della lunghezza del giunto al di là del valore $l=10/\lambda$ non corrisponde un significativo aumento del carico sopportabile. La lunghezza minima del giunto a cui corrisponde il massimo carico sopportabile dallo stesso vale pertanto:

$$l_{min} = \frac{10}{\lambda} \quad (23)$$

Al fine di tener conto delle variazioni che la resistenza dell'adesivo può subire con umidità e temperatura, nonché al fine di *stabilizzare* il giunto nei confronti di eventuali fenomeni di creep mediante una zona centrale soggetta a tensioni relativamente basse, nella progettazione pratica si assume solitamente una lunghezza effettiva del giunto pari ad 1.25 volte la lunghezza minima indicata dalla (23); si assume cioè:

$$l_{min} = \frac{12.5}{\lambda} \quad (23')$$

Tale incremento della lunghezza consente anche di tener conto di eventuali diminuzioni della resistenza dell'adesivo a causa di difetti, soffiature ecc, ovvero a causa di decadimento operato da fattori ambientali.

Se la lunghezza del giunto è non inferiore alla lunghezza minima, allora in virtù della (22) il carico massimo sopportabile P_{max} , corrispondente alla condizione $\tau_{max}=\tau_R$, risulta pari a:

$$P_{max} = \frac{4\tau_R}{\lambda} = 4 \sqrt{\frac{\tau_R^2}{2G_a} Et\eta} = 4\sqrt{A_{\tau-\gamma} Et\eta} \quad (24)$$

La (24) mostra come il carico massimo sopportabile da un giunto bilanciato (cedimento per taglio dell'adesivo) è proporzionale all'area $A_{\tau-\gamma}$ sottesa dal diagramma $\tau-\gamma$ dell'adesivo, al modulo di Young degli elementi collegati, al loro spessore t ed allo spessore η dell'adesivo.

Le (17') e (24) consentono rispettivamente un immediato dimensionamento di massima ed una stima del massimo carico sopportabile da un giunto bilanciato note geometria e caratteristiche degli elementi da collegare nonché dell'adesivo. La (24), inoltre, si dimostra essere valida anche nel caso in cui l'adesivo abbia un comportamento elastico-perfettamente plastico come indicato in Fig.2.

15.3.3 Effetto dello spessore del giunto

Dalla eq.(18) si vede che la capacità di carico massimo sopportabile da un giunto bilanciato è legata alla radice quadrata dello spessore t degli elementi accoppiati. Poiché la resistenza a trazione-compressione degli elementi giuntati cresce linearmente con lo spessore, eguagliando il massimo carico sopportabile dall'adesivo con quello sopportabile dagli elementi collegati, si ha:

$$P_{max} = 4\sqrt{A_{\tau-\gamma} Et\eta} = \sigma_R t \quad (25)$$

La (25) esprime la condizione di isoresistenza (efficienza 100%); da questa si ha che per elementi collegati con spessore superiore al valore critico:

$$t^* = [16\eta A_{\tau-\gamma} E]/\sigma_R^2 \quad (25)$$

la resistenza del giunto è limitata da quella dell'adesivo; in altre parole uno spessore degli elementi collegati maggiore di t^* porta ad un giunto con efficienza inferiore al 100% (giunto = nodo debole

della catena). Per esempio per un composito avente $\sigma_R \approx 450$ MPa ed adesivo tipo FM 300 ($A \approx 10$ MPa, vedi Fig.2) con spessore $\eta \approx 0.1$ mm, la (25) fornisce che lo spessore degli elementi a cui si ha equiresistenza di adesivo e metallo è pari a circa 6 mm. Uno spessore superiore porta a rottura del giunto per taglio dell'adesivo (efficienza $<100\%$) mentre uno spessore inferiore può dar luogo a cedimento degli elementi collegati (efficienza $>100\%$).

15.3.4 Effetto dello spessore dell'adesivo

Dalla eq.(18) si vede che il carico massimo sopportabile da un giunto bilanciato cresce con la radice quadrata dello spessore η dell'adesivo. Un aumento dello spessore dell'adesivo da luogo infatti ad una diminuzione dello scorrimento massimo dello stesso e quindi, in accordo con la (22) e la (10), ad una diminuzione della massima tensione tangenziale.

Lo spessore dell'adesivo pertanto va tenuto sufficientemente elevato al fine di non ridurre eccessivamente la resistenza. L'uso però di spessori troppo elevati è da sconsigliare in quanto al crescere dello spessore crescono pure i vuoti presenti con significativa diminuzione della resistenza. Un compromesso è costituito in genere da spessori dell'adesivo compresi tra 0.1 e 0.25 mm.

Al fine di conferire all'adesivo una certa consistenza, necessaria ad ottenere la formazione di strati di sufficiente spessore (evitando spessori troppo piccoli dell'adesivo) si aggiungono sovente a questo una certa percentuale di fibre.

15.3.5 Effetto dello sbilanciamento

Un giunto a doppia sovrapposizione si dice sbilanciato allorquando la rigidezza dell'elemento centrale è diversa dalla somma delle rigidezze degli elementi esterni. In questa situazione la distribuzione delle tensioni tangenziali nell'adesivo non è più simmetrica come indicato schematicamente nella seguente figura che si riferisce al caso in cui l'elemento interno ha una rigidezza inferiore alla somma degli elementi esterni.

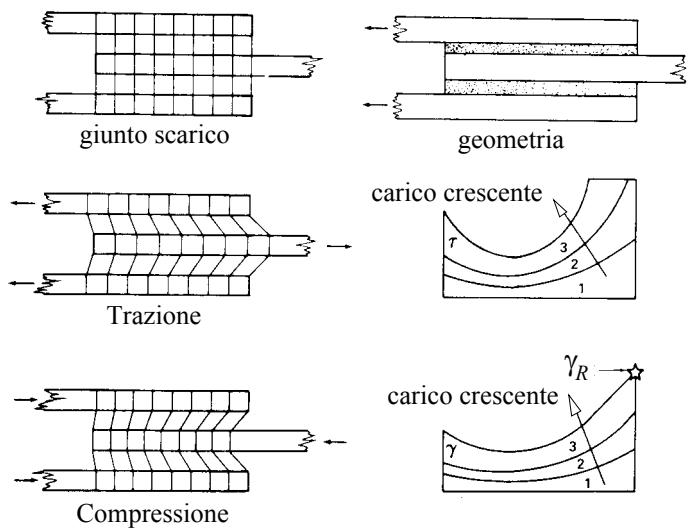


Fig.5 - Distribuzione delle tensioni tangenziali in giunto sbilanciato a doppia sovrapposizione

Si vede in particolare come in un giunto sbilanciato si verifica un innalzamento (sbilanciamento) delle tensioni dal lato dell'elemento meno rigido e ciò indipendentemente dal verso di applicazione del carico (trazione o compressione).

Ciò evidentemente porta ad una diminuzione della capacità portante del giunto sbilanciato rispetto alla condizione di giunto bilanciato (avente una distribuzione simmetrica). La distribuzione delle

tensioni in un giunto sbilanciato è fornito dalla Eq.20.

Per quanto detto, nel caso di sbilanciamento con $S > 1$ (rigidezza dell'elemento interno maggiore della somma degli elementi esterni) la massima tensione si verifica per $x=-l/2$ ed è pari a:

$$\tau_{\max} = \frac{P\lambda}{4} \left[\frac{S-1}{1+S} \right] \tanh\left(\lambda \frac{l}{2}\right) + \frac{P\lambda}{4 \tanh\left(\lambda \frac{l}{2}\right)} \quad (26)$$

Per lunghezza del giunto $l > l_{\min} = 10/\lambda$ la massima tensione tangenziale risulta pertanto pari a:

$$\tau_{\max} = \frac{P\lambda}{4} \left(1 + \left[\frac{S-1}{1+S} \right] \right) = \frac{P\lambda}{4} \left[\frac{2S}{1+S} \right] \quad (27)$$

Alla condizione limite $\tau_{\max} = \tau_R$ corrisponde un carico massimo sopportabile pari a:

$$P_{\max} = \frac{4\tau_R}{\lambda} \frac{(1+S^{-1})}{2} = \frac{4\tau_R}{\lambda^{(S=1)} \sqrt{\frac{(1+S^{-1})}{2}}} \frac{(1+S^{-1})}{2} = P_{\max}^{(S=1)} \sqrt{\frac{(1+S^{-1})}{2}} \quad (28)$$

In pratica pertanto uno sbilanciamento con $S > 1$ porta ad un carico massimo sopportabile pari a:

$$P_{\max}(S > 1) = P_{\max}^{(S=1)} \sqrt{(1+S^{-1})/2} \quad (29)$$

Con procedimento analogo si dimostra immediatamente che nel caso di sbilanciamento con $S < 1$ (rigidezza dell'elemento interno minore della somma degli elementi esterni, massima tensione per $x=l/2$), il carico massimo sopportabile è dato da:

$$P_{\max}(S < 1) = P_{\max}^{(S=1)} \sqrt{S(1+S)/2} \quad (30)$$

Tenuto conto che scambiando la posizione degli elementi collegati lo sbilanciamento si inverte ($S' = 1/S$), mediante le (29) e (30) è facile mostrare che alla configurazione del giunto con materiale più cedevole all'esterno corrisponde una più bassa diminuzione del carico sopportabile.

A titolo di esempio la Fig.6 mostra come in presenza di uno sbilanciamento con $S=3$ (elementi esterni più cedevoli) si verifica una riduzione del carico massimo sopportabile pari a circa il 20%, mentre invertendo la posizione degli elementi collegati ($S'=1/3$) si verifica una riduzione del 60% del carico sopportabile, cioè circa tre volte superiore.

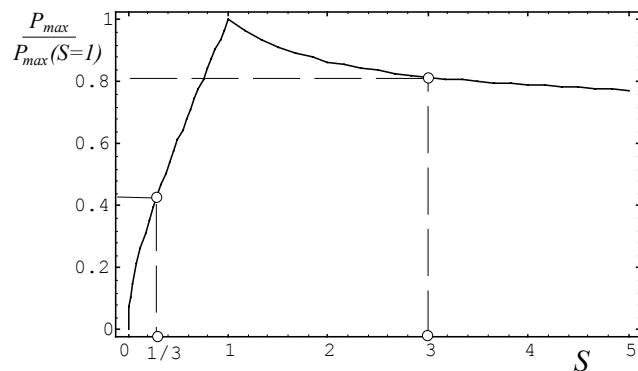


Fig.6 – Diminuzione del massimo carico sopportabile in funzione dello sbilanciamento del giunto.

In presenza di sbilanciamento è bene pertanto configurare il giunto in modo da porre sempre gli elementi più cedevoli all'esterno.

15.3.6 Effetto del mismatch del coefficiente di dilatazione termica

Un diverso coefficiente di dilatazione termica delle parti accoppiate si spesso nelle giunzioni metallo-composito soprattutto per compositi rinforzati con fibra di carbonio o Kevlar. Il coefficiente di dilatazione di tali compositi è infatti generalmente inferiore a $2-3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ mentre il coefficiente di dilatazione dei metalli tecnici risulta ben superiore ($11 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ per acciaio, $23 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ per alluminio).

Una variazione di temperatura produce quindi in questi giunti da sola deformazioni differenziali delle parti accoppiate a cui è associata una distribuzione di tensioni tangenziali autoequilibrate (antisimmetriche) sull'adesivo (vedi per esempio Fig.7). La differenza tra la temperatura di cura del giunto e la temperatura di esercizio dello stesso determina quindi un sistema di tensioni residue autoequilibrate a cui si sovrappongono le tensioni indotte dai carichi di esercizio. Poiché le tensioni residue termiche sono antisimmetriche si ha che anche per un giunto bilanciato (distribuzione delle τ simmetrica) la distribuzione complessiva delle tensioni tangenziali risulta avere andamento non simmetrico (Fig.7).

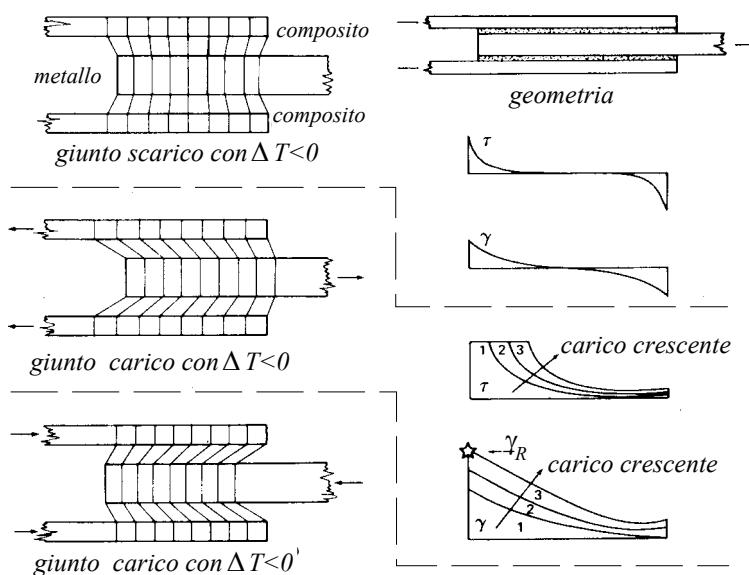


Fig.7 - Distribuzione delle tensioni tangenziali in giunto soggetto a variazione di temperatura $\Delta T < 0$.

Le sollecitazioni associate ad una generica variazione di temperatura ΔT possono essere facilmente stimate considerando il legame tra la deformazione termica del giunto ε , le deformazioni meccaniche ε_i ed ε_e degli elementi accoppiati e relative dilatazioni termiche $\alpha_i \Delta T$ e $\alpha_e \Delta T$, cioè:

$$\begin{cases} \varepsilon = \alpha_i \Delta T + \varepsilon_i \\ \varepsilon = \alpha_e \Delta T + \varepsilon_e \end{cases} \quad (31)$$

Le (31) consentono di valutare immediatamente le deformazioni meccaniche ε_i ed ε_e degli elementi accoppiati e quindi le relative tensioni termiche σ_i ed σ_e date da:

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \varepsilon - \alpha_i \Delta T \\ \varepsilon_e = \varepsilon - \alpha_e \Delta T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_i = E_i \varepsilon_i = E_i (\varepsilon - \alpha_i \Delta T) \\ \sigma_e = E_e \varepsilon_e = E_e (\varepsilon - \alpha_e \Delta T) \end{cases} \quad (32)$$

Alle tensioni termiche corrispondono degli *sforzi termici* $P_i^{(\Delta T)}$ e $P_e^{(\Delta T)}$ sugli elementi accoppiati pari a:

$$\begin{cases} P_i^{(\Delta T)} = \sigma_i t_i = E_i \varepsilon_i t_i = E_i t_i (\varepsilon - \alpha_i \Delta T) \\ P_e^{(\Delta T)} = \sigma_e t_e = E_e \varepsilon_e t_e = E_e t_e (\varepsilon - \alpha_e \Delta T) \end{cases} \quad (33)$$

Tenuto conto che tali sforzi costituiscono un sistema autoequilibrato dalle (33) si ottiene:

$$P_i^{(\Delta T)} + 2P_e^{(\Delta T)} = 0 \Rightarrow E_i t_i (\varepsilon - \alpha_i \Delta T) + 2E_e t_e (\varepsilon - \alpha_e \Delta T) \Rightarrow \varepsilon = \frac{(S\alpha_i + \alpha_e)}{(S+1)} \Delta T \quad (34)$$

Sostituendo la deformazione termica del giunto fornita dalla (34) nella prima della (33) si ottiene immediatamente il *carico termico* a cui risulta soggetto il giunto:

$$P^{(\Delta T)} = P_i^{(\Delta T)} = E_i t_i \left[\frac{(S\alpha_i + \alpha_e)}{(S+1)} - \alpha_i \right] \Delta T = 2E_e t_e \frac{(\alpha_e - \alpha_i)}{S+1} \Delta T = \frac{2E_e t_e \Delta \alpha \Delta T}{S+1} \quad (35)$$

Tale carico produce una distribuzione (autoequilibrata) antisimmetrica di tensioni tangenziali che possono essere valutate immediatamente considerando l'eq. (13) e la eq.(7) scritta per esempio la sezione di attacco dell'elemento interno. L'antisimmetria fornisce immediatamente $B=0$, mentre la (7) fornisce:

$$A = \frac{P^{(\Delta T)} \lambda}{2 \cosh(\lambda \frac{l}{2})} = \frac{2E_e t_e \Delta \alpha \Delta T}{S+1} \frac{\lambda}{2 \cosh(\lambda \frac{l}{2})} \quad (36)$$

La distribuzione delle tensioni termiche è pertanto fornita dalla funzione:

$$\tau = \frac{2E_e t_e \Delta \alpha \Delta T}{S+1} \frac{\lambda}{2 \cosh(\lambda \frac{l}{2})} \sinh(\lambda x) \quad (37)$$

Le massime tensioni (in modulo) si verificano in corrispondenza degli estremi e valgono:

$$\tau_{\max} = \frac{\lambda}{S+1} \tanh(\lambda \frac{l}{2}) E_e t_e \Delta \alpha \Delta T \quad (38)$$

Tenendo conto delle proprietà della funzione $\tanh(\cdot)$ si ha che al crescere della lunghezza del giunto non si ha una crescita indefinita delle tensioni termiche; in particolare per giunto con lunghezza maggiore o uguale alla lunghezza minima la massima tensione è fornita da:

$$\tau_{\max} = \frac{\lambda}{S+1} E_e t_e \Delta \alpha \Delta T \quad (39)$$

Confrontando la (39) con la (27) si osserva che un carico termico produce in pratica una tensione

massima pari a quella prodotta da un carico meccanico doppio. Ai fini della valutazione della massima tensione tangenziale il carico termico pertanto un carico termico è equivalente ad un carico meccanico pari a $4E_e t_e \Delta \alpha \Delta T / (S+1)$. A tal fine occorre osservare che mentre in un giunto bilanciato (tensioni meccaniche simmetriche) le tensioni termiche producono sempre un incremento della massima tensione tangenziale indipendentemente dal segno della variazione di temperatura, della sollecitazione e del mismatch dei coefficienti di dilatazione, e quindi un decremento del massimo carico sopportabile dal giunto, per un giunto sbilanciato (tensioni meccaniche non simmetriche) invece le tensioni tangenziali termiche possono dar luogo ad un aumento oppure ad una diminuzione delle massime tensioni e quindi del massimo carico sopportabile. Infatti, per un giunto sbilanciato la distribuzione delle tensioni tangenziali è legata oltre che ai coefficienti di dilatazione anche al segno della variazione di temperatura e al verso della sollecitazione applicata (trazione o compressione).

Tenuto conto della sopra citata condizione di equivalenza tra carichi termici e meccanici, si ha che in giunto non bilanciato, il carico massimo sopportabile si può ottenere sottraendo al carico effettivamente sopportabile dal giunto in assenza di variazioni di temperatura (Eq.28 o 29) con il carico termico fornito dalla (35). In dettaglio, considerando una variazione di temperatura positiva, si ha che per $S>1$ la condizione cui corrisponde la minima capacità portante (massima tensione meccanica concorde con la corrispondente tensione termica) si verifica per $\alpha_e > \alpha_i$ e carico applicato di trazione (vedi Fig.8) ovvero per $\alpha_e < \alpha_i$ e carico applicato di compressione. Per $S<1$ invece la condizione di minima capacità portante si verifica per $\alpha_e < \alpha_i$ e carico applicato di trazione (vedi Fig.8) ovvero per $\alpha_e > \alpha_i$ e carico applicato di compressione. Tali regole si invertono nel caso di variazione di temperatura negativa, come è quella che si verifica nei giunti *co-cured* allorquando questi passano dalla temperatura di cura alla temperatura ambiente.

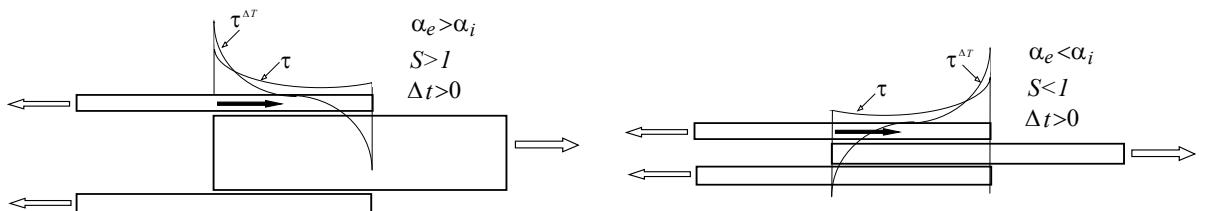


Fig.8 - Distribuzione delle tensioni tangenziali meccaniche e termiche in giunto sbilanciato soggetto a variazione di temperatura ΔT .

Con l'ausilio della Fig.8 si può osservare come per un giunto sbilanciato una variazione di temperatura (carico termico) può portare ad un aumento della capacità portante se questi è configurato in modo che la massima tensione meccanica sia discorde con la corrispondente tensione termica. In particolare per un giunto con $S>1$ tale condizione si verifica allorquando il prodotto del carico applicato per la variazione di temperatura per il mismatch $P\Delta T\Delta\alpha$ è positivo; il contrario si ha invece per giunti con $S<1$ ($P\Delta T\Delta\alpha$). Per quanto detto, in virtù delle equazioni (29),(30) e (35) in generale il carico massimo sopportabile da un giunto sbilanciato "non omogeneo" soggetto a variazioni di temperatura è dato da:

$$T_{\max} = \begin{cases} \pm [8\eta A E_e t_e (1+S)]^{\frac{1}{2}} + \frac{2E_e t_e (\alpha_e - \alpha_i) \Delta T}{S+1} & \text{per } (S < 1) \\ \pm [8\eta A E_e t_e S (1+S^{-1})]^{\frac{1}{2}} - \frac{2E_e t_e (\alpha_e - \alpha_i) \Delta T}{S+1} & \text{per } (S > 1) \end{cases} \quad (40)$$

Nelle (40) il segno (+) vale per carico meccanico di trazione, il segno (-) per carico di compressione.

15.4. Giunto a doppia sovrapposizione: resistenza allo sfogliamento

In un giunto a doppia sovrapposizione, sotto un carico trazione semplice gli elementi esterni tendono naturalmente ad incurvarsi per via del momento flettente prodotto dalla distribuzione asimmetrica (solo interna) delle tensioni tangenziali scambiate con l'adesivo. Conseguentemente in corrispondenza delle estremità degli elementi esterni nascono all'interfaccia con l'adesivo delle tensioni normali positive σ_{sf} , dette *tensioni di sfogliamento* (*peel stress* nella letteratura inglese) in quanto tendono a separare (sfogliare) le parti incollate (vedi Fig.9). Ovviamenete tali tensioni costituiscono un sistema autoequilibrato e quindi esse cambiano segno nella superficie incollata andando dal lembo esterno a quello interno del giunto (vedi Fig.9a). A causa della bassa resistenza a trazione dei laminati in direzione trasversale ($\sigma_{T,R} \ll \sigma_{L,R}$), nei giunti metallo-composito o composito-composito tali tensioni risultano molto pericolose e possono sovente dar luogo a danneggiamento o rottura prematura del giunto. Per questo è buona norma mettere in atto ogni provvedimento capace di ridurre tali pericolose tensioni.

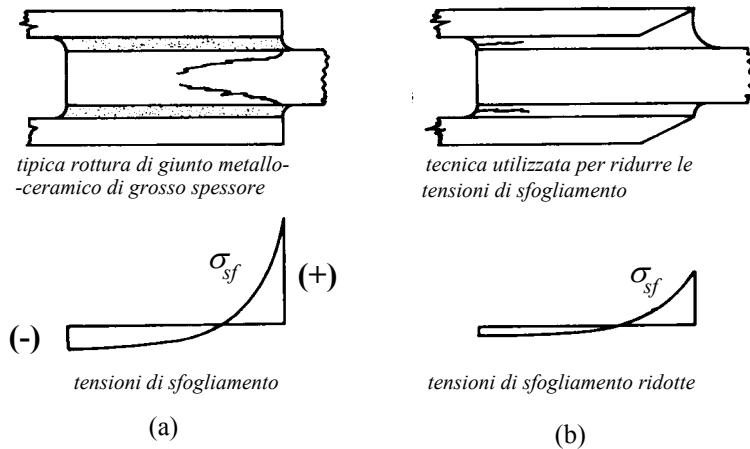


Fig.9 - Distribuzione delle tensioni di sfogliamento in giunto standard (a) e modificato (b).

In assenza di provvedimenti atti a limitare le tensioni di sfogliamento, il valore di picco è approssimativamente stimato mediante la seguente relazione:

$$\sigma_{sf,\max} = \tau \sqrt[4]{3 \frac{E_f t_e}{E_e \eta}} = \frac{P}{2l} \sqrt[4]{3 \frac{E_f t_e}{E_e \eta}} \quad (41)$$

essendo E_f la rigidezza trasversale del giunto e τ la tensione media sull'adesivo. Dalla (41) si vede come le tensioni di sfogliamento diminuiscono all'aumentare della rigidezza degli elementi esterni E_e del giunto e dello spessore di adesivo η , sebbene il parametro che governa principalmente la massima tensione di sfogliamento è la rigidezza trasversale del giunto E_f che decresce significativamente mettendo gli elementi più cedevoli all'esterno. Per questo nei giunti metallo-composito se $E_{met} > E_{comp}$ allora al fine di limitare le pericolose tensioni di sfogliamento è bene disporre sempre gli elementi metallici all'interno e quelli in composito all'esterno. Tale regola pratica è in genere in accordo con quella sopra enunciata per i giunti sbilanciati poiché la rigidezza dei compositi è solitamente inferiore a quella dei metalli con cui si accoppiano.

La presenza di tensioni di sfogliamento può divenire un problema rilevante nel caso in cui il composito abbia una bassa resistenza trasversale rispetto a quella dell'adesivo (adesivi duttili resistenti allo sfogliamento), nel qual caso si possono facilmente avere rotture per delaminazione

del composito. In questi casi pertanto una corretta progettazione del giunto deve prevedere una verifica a delaminazione del composito utilizzando per esempio il criterio di Ye:

$$\left(\frac{\sigma_{sf,max}}{\sigma_{T,R}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{max}}{\tau_{LT,R}} \right)^2 \leq 1 \quad (42)$$

In accordo con la (41) le tensioni di sfogliamento possono essere limitate allungando la lunghezza el giunto in modo da ridurre la tensione tangenziale media sull'adesivo. Per questo nei casi in cui lo sfogliamento è particolarmente temuto (giunti a semplice sovrapposizione e/o materiali a bassa resistenza allo sfogliamento) oltre ad adottare adesivi duttili si aumenta il rapporto l/t a valori dell'ordine di 30:1. Come mostrato in Fig.9, le tensioni di sfogliamento possono essere limitate anche rastremando opportunamente le estremità degli elementi esterni o aumentando lo spessore finale dell'adesivo come mostrato in Fig.9b. Tali accorgimenti danno luogo anche ad una benefica diminuzione della concentrazione delle tensioni tangenziali.

15.5. Analisi numerica

Al fine di verificare la bontà dei risultati forniti dalla analisi teorica diversi studi dello stato tensionale presente in un giunto incollato sono stati compiuti da vari autori mediante il metodo degli elementi finiti (FEM). In particolare, sono stati eseguiti tanto analisi numeriche lineari che non lineari, considerando diverse configurazioni geometriche del giunto.

A titolo di esempio la figura seguente riporta l'andamento delle tensioni nell'adesivo di un giunto sbilanciato a doppia sovrapposizione CFRP-CFRP, nel caso di comportamento elastico lineare dell'adesivo e di comportamento elasto-plastico con deformazione massima del 10% e del 20%.

Fig.10 – Tensioni tangenziali valutate mediante FEM per giunto a doppia sovrapposizione CFRP-CFRP (Fig.14°, pg.214)

Dalla Fig.10 si vede come, in accordo con la teoria, lo sbilanciamento produce effettivamente una asimmetria della distribuzione con un significativo fattore di concentrazione delle tensioni che nel caso illustrato risulta pari a circa 2.5. SI osserva inoltre come lo scorrimento plastico dell'adesivo diminuisce la asimmetria dovuta allo sbilanciamento portando ad un fattore di concentrazione di poco inferiore a 2 e ad 1.5 circa rispettivamente per $\varepsilon_{max}=10\%$ e $\varepsilon_{max}=20\%$.

In Fig.11a è inoltre riportato l'andamento delle tensioni nell'adesivo per il caso elementi costituiti da laminato unidirezionale e cross-ply bilanciato CFRP. In accordo con la teoria sviluppata si vede come al diminuire della rigidezza degli elementi collegati ($E_{cross-ply} < E_{unid}$) cresce l'effetto di concentrazione di tensione e quindi, in accordo con la teoria, decresce il carico massimo sopportabile (vedi Eq.25). E' confermato pertanto che, ove possibile, è conveniente aumentare la rigidezza delle estremità degli elementi da giuntare con l'introduzione di lamine aggiuntive disposte a 0° ovvero di lamine metalliche (laminati ibridi).

Nella Fig.11b è riportato l'andamento delle tensioni nell'adesivo per il caso di giunto alluminio-CFRP unidirezionale ($E_{Alluminio} < E_{CFRP-unid}$). In accordo con la teoria si vede come la configurazione con elementi esterni in alluminio (più cedevoli, $S>1$), è quella che da luogo alle più basse tensioni e quindi alla massima resistenza (vedi anche Fig.6).

Fig.11 – Tensioni tangenziali (Fem) per giunto a doppia sovrapposizione tra laminati unidirezionali e cross-ply bilanciati CFRP (Fig.15, pg.215) e tra alluminio e laminato unidirezionale CFRP (Fig.16, pg.216).

15.6. Analisi sperimentale

Sebbene i risultati delle analisi numeriche sono in genere in buon accordo con quelli teorici, una attendibile valutazione della resistenza del giunto non può essere eseguita senza la conoscenza delle effettive modalità di rottura che, come accennato può verificarsi per:

- 1) taglio dell'adesivo;
- 2) peeling dell'adesivo e/o delaminazione del composito;
- 3) rottura degli elementi collegati;

E' quindi in genere necessario procedere ad una analisi sperimentale del giunto in modo da evidenziare le effettive modalità di rottura e verificare le previsioni teoriche e numeriche. Per questo diversi studi sperimentali sono stati eseguiti da vari autori utilizzando diverse tecniche sperimentali quali fotoelasticità, interferometria moiré, ecc. A titolo di esempio nella seguente Fig.12 sono riportate le frange moiré (spostamenti lungo x) osservate in un giunto a semplice sovrapposizione. Gli studi compiuti mostrano che in genere le sollecitazioni effettive sono in buon accordo con le quelle previste numericamente e teoricamente specie per elementi collegati aventi una rigidezza a taglio relativamente elevata.

Fig.12– Fringe moiré osservate in giunto a semplice sovrapposizione alluminio-alluminio (Fig.3, pg.115).

Per quanto concerne le modalità di cedimento l'analisi sperimentale ha mostrato come in alcuni casi la rottura del giunto può avvenire anche in modo misto, cioè il danneggiamento può iniziare per esempio per cedimento a taglio dell'adesivo e continuare poi per delaminazione del composito come mostra la seguente figura che si riferisce al caso particolare di un giunto tra laminati compositi del tipo $[\pm 45/0/90]$ realizzato con adesivo FM-300.

Fig.13– Danneggiamento di giunto tra laminati $[\pm 45/0/90]$ incollati con adesivo FM-300 (pg.174).

15.7. Miglioramenti della teoria

Il confronto dei risultati forniti dalla analisi teorica riportata ai capitoli precedenti con i risultati numerici e sperimentali mostra che l'approccio teorico puo risultare poco accurato in presenza di elementi collegati costituiti da materiali dotati di bassa rigidezza a taglio, come si verifica in pratica per i laminati compositi, nonche di adesivo molto duttile (comportamento elasto-plastico). Ciò suggerisce che in questi casi una accurata previsione teorica può essere ottenuta solo se si tiene conto della cedevolezza a taglio degli elementi collegati, ovvero della plasticità dell'adesivo.

15.7.1 Materiali con bassa rigidezza a taglio

In presenza di elementi da collegare realizzati con materiali aventi bassa rigidezza trasversale, i risultati della teoria possono essere migliorati considerando gli effetti della deformabilità a taglio di tali materiali. Per elementi di spessore limitato, come è sempre il caso dei giunti incollati, si può ipotizzare che la generica sezione trasversale sia soggetta ad una distribuzione di tensioni

tangenziali variabili linearmente nello spessore. In particolare per gli elementi esterni si può assumere una distribuzione lineare con valore nullo sulla superficie esterna, mentre per l'elemento interno si può assumere una distribuzione lineare con valore nullo al centro (simmetria). Considerando per l'elemento esterno un riferimento y_e con origine sulla superficie esterna e per l'elemento interno un riferimento y_i con origine sulla superficie incollata si ha:

$$\tau_e = \tau \frac{y_e}{t_e}; \quad \tau_i = \tau \left(1 - \frac{y_i}{t_i/2}\right); \quad (43-44)$$

cui corrisponde nella usuale ipotesi di comportamento lineare dei materiali una distribuzione degli scorrimenti:

$$\gamma_e = \frac{\tau}{G_e} \frac{y_e}{t_e}; \quad \gamma_i = \frac{\tau}{G_e} \left(1 - \frac{y_i}{t_i/2}\right); \quad (45-46)$$

e dei corrispondenti spostamenti in direzione x pari a:

$$\bar{u}_e = u_e - \int_{y_e}^{t_e} \gamma_e dy_e = u_e - \frac{\tau t_e}{2G_e t_e} + \frac{\tau}{2G_e t_e} y_e^2; \quad \bar{u}_i = u_i + \int_0^{y_i} \gamma_i dy_i = u_i + \frac{\tau}{G_e} \left(y_i - \frac{y_i^2}{t_i}\right); \quad (47-48)$$

Sostituendo le (47-48) nella (5) con lo stesso procedimento esposto al cap.15.3.1 si perviene ad una equazione differenziale formalmente simile alla (12) e cioè:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} = \beta^2 \tau \quad (49)$$

con

$$\beta^2 = \frac{\lambda^2}{\alpha^2} \quad (50)$$

essendo

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{G}{\eta} \left(\frac{t_i}{6G_i} + \frac{t_e}{3G_e} \right)} \quad (51)$$

La (49) mostra quindi che in presenza di elementi con elevata deformabilità a taglio la distribuzione delle tensioni tangenziali nell'adesivo può essere valutata in pratica con le stesse formule già viste per il caso di elementi rigidi con la semplice sostituzione di λ con β ovvero dividendo il parametro λ per il parametro di cedevolezza α fornito dalla (51). Poiché tale parametro risulta sempre maggiore di 1, con riferimento a tale formulazione si ha che la cedevolezza a taglio dei materiali produce in pratica una diminuzione una diminuzione del parametro λ . Ciò porta in pratica ad una più uniforme distribuzione delle tensioni ovvero ad:

- 1) diminuzione della massima tensione tangenziale (vedi eq.22);
- 2) aumento della lunghezza minima (vedi eq.23);
- 3) aumento del carico massimo sopportabile (vedi eq.24);

A titolo di esempio nella seguente Fig.14 è riportato l'andamento del rapporto R_P tra il carico teorico massimo sopportabile da un giunto bilanciato ($t=5$ mm, $\eta=0.1$ mm) nella ipotesi di elementi deformabili a taglio e rigidi (eq.24) al variare del rapporto G_m/G_a tra la rigidezza dei materiali e

quella dell'adesivo.

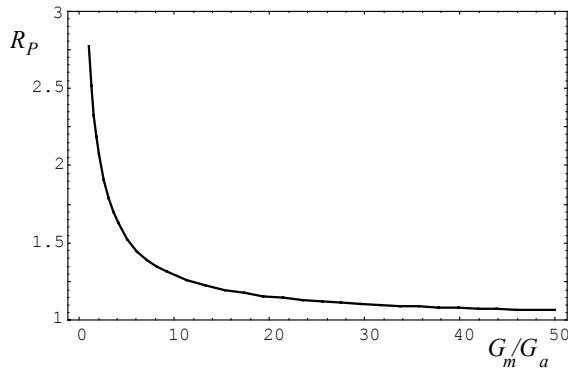


Fig.14 – Andamento di R_P al variare del rapporto G_m/G_a per giunto bilanciato ($t=5$ mm, $\eta=0.1$ mm).

Si vede come a rigidezze dei materiali pari a 4-5 volte quella dell'adesivo, situazione verosimile per materiali compositi a basso modulo, corrisponde un aumento della capacità portante di circa il 50%. Aumenti dello stesso ordine di grandezza subisce la lunghezza minima del giunto. La progettazione di giunti in composito pertanto deve in genere tener conto della limitata rigidezza a taglio di questi materiali. A tal fine il grafico di Fig.14 può essere vantaggiosamente utilizzato (giunto bilanciato) per una immediata correzione della capacità portante del giunto valutata mediante la (24).

15.7.2 Adesivo duttile

In presenza di un adesivo molto duttile i fenomeni di concentrazione di tensione che si verificano alle estremità del giunto possono dar luogo a significativi fenomeni di plasticità dell'adesivo, crescenti con il carico applicato.

Ipotizzando per l'adesivo un comportamento elastico-perfettamente plastico (Fig.2b), lo stato di deformazione presente in questo può essere valutato utilizzando lo stesso approccio esposto al cap.15.3.1. Per un giunto bilanciato, come è facile verificare, si ottiene l'equazione risolvente:

$$\gamma = B \cosh(\lambda x) \quad (52)$$

Il carico massimo sopportabile dal giunto corrisponde in questo alla condizioni per cui lo scorrimento massimo che si verifica alle estremità risulta pari allo scorrimento di rottura dell'adesivo. Considerando una lunghezza del giunto pari a $l_{min}=10/\lambda$ tale condizione fornisce immediatamente:

$$\gamma_R = B \cosh(5) \Rightarrow B \approx \frac{\gamma_R}{75} \quad (54)$$

per cui la distribuzione degli scorrimenti e delle tensioni elastiche sono date da:

$$\gamma = \frac{\gamma_R}{75} \cosh(lx) \quad (55)$$

$$t = G \frac{\gamma_R}{75} \cosh(lx) \quad (56)$$

La ascissa \bar{x} della sezione del giunto in cui lo scorrimento raggiunge il limite elastico si ottiene

dalla (55) imponendo:

$$\gamma_e = \frac{\gamma_R}{75} \cosh(l\bar{x}) \Rightarrow \bar{x} = \frac{1}{l} \cosh^{-1} \left[\frac{75\gamma_e}{\gamma_R} \right]^{-1} \quad (57)$$

Gli adesivi duttili utilizzati nella pratica sono caratterizzati da valori del rapporto $\gamma_R/\gamma_e > 7.5$ per cui \bar{x} risulta limitata superiormente dal valore $3/\lambda$. L'estensione della zona plastica risulta pertanto complessivamente pari a $4/\lambda$. In pratica si ha una zona plastica con estensione pari a circa il 40% della sezione. Considerando una lunghezza del giunto incrementata del 25%, il carico massimo corrispondente sopportato dal giunto si ottiene dalla condizione di equilibrio:

$$P_{\max} = 2 \left[\frac{5}{\lambda} \tau_s + \int_{-3/\lambda}^{3/\lambda} \tau dx \right] = \frac{8}{\lambda} \tau_s + G \frac{2\gamma_R}{75\lambda} [\sinh(\lambda x)]_{-3.75/\lambda}^{3.75/\lambda} \approx \frac{10}{\lambda} \tau_s + G \frac{80\gamma_R}{75\lambda} = \frac{10}{\lambda} \tau_s + G \frac{8\gamma_e}{\lambda} = \frac{10}{\lambda} \tau_s + \frac{8\tau_s}{\lambda} = 18 \sqrt{\frac{\tau_s^2}{2G} E t \eta} \approx 4 \sqrt{16 \left(\frac{\tau_s^2}{2G} \right) E t \eta} = 4 \sqrt{\tau_s \left(\frac{1}{2} \gamma_e + \gamma_R \right) E t \eta} = 4 \sqrt{A_{t-\gamma} E t \eta} \quad (58)$$

La (58) risulta in pratica formalmente identica alla analoga equazione (24) valida nella ipotesi di comportamento elastico lineare dell'adesivo.

15.8. Considerazioni sulla progettazione dei giunti incollati

Da quanto sopra esposto si evince che la resistenza di un giunto incollato è funzione di vari parametri e, conseguentemente, la sua previsione è attività non priva di difficoltà e incertezze. Molti sono i parametri che influenzano le modalità di rottura di un giunto. Per esempio all'aumentare dello spessore degli elementi esterni, per quanto sopra osservato, il cedimento del giunto passa dalla rottura degli elementi, alla rottura a taglio dell'adesivo, alla rottura per sfogliamento (vedi Fig.14).

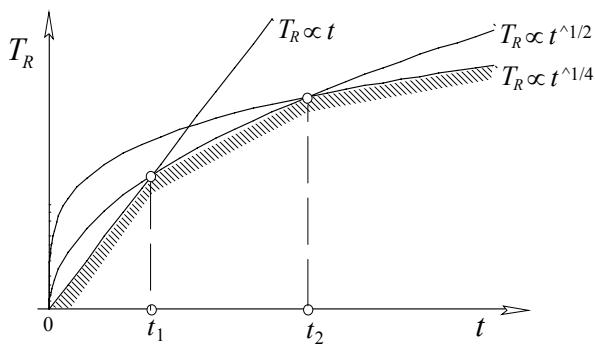


Fig.14– Modalità di rottura di adesivo al variare dello spessore degli elementi esterni.

Nella progettazione pratica dei giunti, inoltre, il comportamento viscoelastico degli adesivi va tenuto in debita considerazione: in corrispondenza delle estremità ove si hanno le massime tensioni, significativi fenomeni di creep possono verificarsi con conseguente rilassamento delle tensioni ed aumento del cimento della parte centrale dell'adesivo. Al fine pertanto di limitare tali fenomeni è buona norma adottare lunghezze del giunto superiori ai valori minimi calcolati teoricamente. Poiché come visto all'aumentare della lunghezza del giunto oltre un valore critico pari a circa $10/\lambda$ non si più una diminuzione della massima tensione, ma si ha invece una diminuzione della tensione minima, quest'ultima è di fatto un parametro significativo nella progettazione dei giunti incollati. Per assicurare una buona stabilizzazione dei fenomeni di creep ed una adeguata riserva di resistenza

dei giunti ai sovraccarichi si pone solitamente la condizione:

$$\tau_{\min} \leq \frac{\tau_s}{10} \quad (37)$$

Utilizzando la (15), per un giunto bilanciato [$\tau_{\min} = \tau(0)$] la (37) fornisce la relazione:

$$\tau_{\min} = \frac{T\lambda}{4 \sinh(\lambda \frac{l}{2})} \leq \frac{\tau_s}{10} \quad (38)$$

da cui si ottiene:

$$l_{\min} = \frac{2}{\lambda} \operatorname{ArcSinh} \left(\frac{5T\lambda}{2\tau_s} \right) \quad (39)$$

A titolo di esempio per un giunto con $t=5\text{mm}$ e $\lambda=0.35 \text{ mm}^{-1}$ ($G=1000 \text{ MPa}$, $E=35000 \text{ MPa}$, $\eta=0.1 \text{ mm}$) realizzato con adesivo avente $\tau_s=30 \text{ MPa}$ (valore usuale) e sottoposto ad un carico $T=1000 \text{ N/mm}$ ($\sigma_{app}=200 \text{ MPa}$), la (39) fornisce $l_{\min}=38 \text{ mm}$, che risulta in questo caso leggermente superiore al valore fornito dalla (17b), pari a circa 35 mm, basato sulla limitazione della massima tensione tangenziale. Si noti che la (39), a differenza delle (17), è legata all'effettivo carico applicato al giunto; essa pertanto risulta più restrittiva della (17b) per giunto soggetti a carichi elevati.

15.8. Applicazioni

15.9. Altri tipi di giunto

15.9.1 Giunto a semplice sovrapposizione (*single lap joint*)

Nel giunto a semplice sovrapposizione l'asimmetria del sistema determina la nascita di un momento flettente e conseguentemente di rilevanti tensioni di sfogliamento che ne condizionano significativamente la resistenza. In funzione della entità del carico applicato si possono avere significative deformazioni locali (anche permanenti) degli elementi collegati e soprattutto fenomeni di delaminazione (vedi Fig.15).

Fig.15 – Modalità di danneggiamento di giunto a semplice sovrapposizione con elementi di vario tipo (Fig.48, pg.171).

Tenuto conto che i compositi hanno bassa resistenza allo sfogliamento (delle lamine) questo tipo di giunto non dovrebbe essere utilizzato per la realizzazione di giunzioni composito-composito o composito-metallo. In altre parole nel campo dei compositi il suo uso, caratterizzato da notevole semplicità ed economia, è possibile soltanto quando possano essere messi in atto dispositivi che consentono in pratica di limitare o annullare gli effetti della flessione (bloccaggio o serraggio del giunto). Tali dispositivi sono assolutamente necessari allorquando il giunto è essere soggetto a carichi di compressione.

In presenza di opportuno bloccaggio la resistenza del giunto può essere valutata in modo analogo a quanto visto per il giunto a doppia sovrapposizione, tenendo conto che il giunto a semplice

sovraposizione equivale a mezzo giunto doppio (capacità di carico dimezzata rispetto a quella del giunto a doppia sovrapposizione).

Qualora sia difficile supportare adeguatamente il giunto e la realizzazione di configurazioni alternative dello stesso siano di difficile realizzazione o troppo onerose, al fine di limitare le tensioni di sfogliamento, ove possibile si procede sempre a rastremare l'estremità degli elementi collegati e, molto importante, si assumono lunghezze del giunto molto superiori ai valori minimi forniti dalla (17b) e/o dalla (39). Ciò, in accordo con la (35), consente infatti di limitare la tensione tangenziale media e quindi la massima tensione di sfogliamento. In questo modo in un giunto a semplice sovrapposizione vengono limitati significativamente anche gli effetti flessionali.

Nella seguente Fig.16 a titolo di esempio è riportato l'andamento della efficienza di un giunto a semplice sovrapposizione tra elementi in CFRP [0/±45/90] al variare dello spessore e del rapporto caratteristico l/t .

Fig.16 – Efficienza di giunto a semplice sovrapposizione al variare dello spessore degli elementi collegati. (Fig.17, pg.292).

Dalla Fig.16 si vede come agli usuali valori di l/t indicati dalla analisi teorica dei giunti a doppia sovrapposizione ($l/t=7-8$) corrisponde una efficienza compresa tra il 30 e il 40%, in molti casi pari alla metà di quella corrispondente ai giunti a doppia sovrapposizione(70-80%). Per portare l'efficienza a valori prossimi all'unità è necessario utilizzare una lunghezza del giunto pari a circa 100 volte lo spessore degli elementi. Nella ordinaria progettazione si adottano sovente giunti a semplice sovrapposizione per spessori inferiori a 1.5 mm circa, con valori di efficienza del 80-90% cui corrispondono valori di $l/t =50-100$, cioè $l=75-150$ mm. Tali limiti diventano più restrittivi per applicazioni spinte o in presenza possibile degrado ambientale del giunto.

15.9.2 Giunto a sovrapposizione rastremato (*scarf joint*)

In questo tipo di giunto (vedi fig.1) l'adesivo è soggetto a tensioni normali e tangenziali. Se la rigidezza delle parti collegate è la stessa, la distribuzione delle tensioni risulta praticamente uniforme e calcolabile da semplici considerazioni di equilibrio. Indicando con θ l'angolo di inclinazione della parte rastremata si ha:

$$\begin{cases} \sigma \cos \theta = \tau \sin \theta \\ (\sigma \sin \theta + \tau \cos \theta)t / \sin \theta = P \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma / \tau = \tan \theta \\ (\tau \tan \theta + \sigma / \tan \theta) = P / t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma = (P / t) \sin^2 \theta \\ \tau = (P / 2t) \sin 2\theta \end{cases} \quad (40)$$

Poiché le superfici incollate attraversano l'intero spessore degli elementi, con questo tipo di collegamento non si ha in pratica alcuna limitazione nello spessore delle parti che possono essere unite. Nella ipotesi di elementi con eguale resistenza ed eguale coefficiente di dilatazione termica lineare, per piccoli angoli di ammorsamento θ ($\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$) trascurando il contributo delle tensioni normali all'interfaccia, la condizione di isoresistenza del giunto (efficienza 100%) porta alla seguente relazione:

$$\theta = \frac{\tau_{s, \text{adesive}}}{\sigma_{R, \text{element}}} \quad (41)$$

che si ottiene immediatamente dalla seconda delle (40). Ovviamente se l'angolo di ammorsamento effettivo risulta inferiore al valore indicato dalla (41) la rottura del giunto avviene per cedimento a taglio dell'adesivo (efficienza <100%). Se gli elementi collegati hanno però rigidezza diversa (giunto sbilanciato), come succede facilmente nei giunti metallo-composito, la distribuzione delle tensioni non è più uniforme e si verifica un picco di tensione in corrispondenza dell'estremità del

giunto posto dalla parte dell'elemento più cedevole, come mostra per esempio la seguente Fig.17.

Fig.17 – Distribuzione delle tensioni tangenziali nell'adesivo di un giunto rastremato e doppia sovrapposizione. (Fig.18, pg.220).

Si verifica che in un giunto rastremato sbilanciato il rapporto tra la tensione tangenziale media, calcolabile con le formule precedenti, e la tensione di picco tende con buona approssimazione al rapporto delle rigidezze delle parti unite, cioè:

$$\frac{\tau_{bil}}{\tau_{\max}} \approx \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \quad (15)$$

Nella seguente figura è riportato l'andamento di tale rapporto nel caso di giunto realizzato tra elementi di diverso spessore.

Fig.18 – Effetto dello sbilanciamento in giunto rastremato (Fig.26, pg.302).

Tale grafico semplifica significativamente il progetto di tali giunti a partire dalla valutazione della tensione media eseguita mediante le (40). Evidentemente nel caso di spessore diverso la massima tensione si verifica in corrispondenza del punto A in figura, che è il punto di attacco dell'elemento a più bassa rigidezza.

Fenomeni concentrazione di tensione possono pure verificarsi facilmente nei giunti rastremati a cause del fatto che l'estremità ha sempre per ovvi motivi uno spessore finito. Al fine di contrastare tale effetto si procede ad aumentare opportunamente la lunghezza del giunto stabilizzando lo stesso nei confronti di eventuale *creep* dell'adesivo. Poiché lo stato di tensione nell'adesivo è pressoché uniforme, è necessario in genere utilizzare a tal fine angoli di rastremazione molto bassi (dimezzare il valore teorico) che danno luogo a lunghezze relativamente elevate che finiscono sovente per limitare l'applicazione di tale tipo di giunto.

A titolo di esempio per un giunto bilanciato composito-composito con $\sigma_R=350$ MPa e $\tau_s=30$ MPa la (41) fornisce $\theta=5^\circ$, cui corrisponde per uno spessore $t=10$ mm una lunghezza del giunto di $l=120$ mm circa. Dimezzando l'angolo di rastremazione ($\theta=5^\circ$) per contrastare effetti di intaglio e creep, si ottiene invece una lunghezza quasi doppia, cioè $l=230$ mm.

Per questo per elementi di elevato spessore si ricorre comunemente ai giunti a doppia sovrapposizione a gradini. Questi, allo stesso tempo, permettono di limitare i problemi legati alla eventuale diversa rigidezza e al mismatch dei coefficienti di dilatazione degli elementi collegati.

15.9.3 Giunto a doppia sovrapposizione a gradini (*double stepped lap joint*)

Questo tipo di giunto può essere considerato come la sovrapposizione (in serie) di tanti giunti a doppia sovrapposizione (vedi fig.8).

Similmente a quanto succede in questo ultimo, in regime elastico la distribuzione delle tensioni su ciascun gradino non è uniforme ma presenta dei picchi alle estremità.

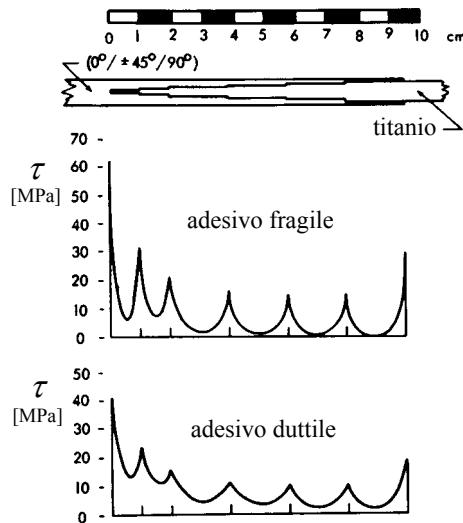


Fig.19 - Distribuzione delle tensioni tangenziali in giunto a doppia sovrapposizione a gradini tra laminato in fibra di carbonio-resina epossidica e titanio.

Tenendo conto delle considerazioni già fatte per i giunti a doppia sovrapposizione, per aumentare la capacità di carico di un giunto a doppia sovrapposizione gradini piuttosto che aumentare la lunghezza dei gradini (che non riduce le massime tensioni) è bene aumentarne il numero come mostra esplicitamente la seguente Fig.20

Fig.20- Distribuzione delle tensioni tangenziali in giunto a doppia sovrapposizione a gradini al variare della lunghezza dei gradini. (fig.24, pg.298)

Si vede come quadruplicando circa la lunghezza del giunto si ottiene un aumento della capacità portante soltanto del 14%. Ciò evidenzia la notevole differenza tra giunti rastremati (capacità di carico proporzionale alla lunghezza) e giunto a gradini. Utilizzando un elevato numero di gradini invece è possibile aumentare la capacità portante e unire anche elementi di notevole spessore. Tenendo costante la larghezza dei gradini, per materiali accoppiati con diversa rigidezza le massime tensioni si verificano sempre alle estremità. Per questo è bene ridurre opportunamente la lunghezza dei gradini finali come mostrato in fig.19 (risultati numerici). Al fine di limitare i rischi di delaminazione è necessario anche limitare opportunamente anche lo spessore di questi: per giunti con materiale composito è buona norma usare un gradino per ogni lamina costituente il laminato.

Una accurata progettazione di questi giunti necessita in genere l'uso di modelli numerici adeguati per una attendibile previsione dello stato tensionale. Similmente a quanto accade per i giunti a doppia sovrapposizione anche per questi è buona norma limitare le minime tensioni al fine di stabilizzare eventuali fenomeni di creep dell'adesivo.

Dalla fig. 19 si osserva come l'aumento progressivo della rigidezza del giunto che sia spostandosi da sinistra verso destra per via della più elevata rigidezza del titanio, comporta un progressivo decadimento delle tensioni tangenziali con riduzione del carico complessivamente sopportabile dal giunto. Un significativo miglioramento della distribuzione delle tensioni si può ottenere modificando la geometria del giunto in modo da rendere pressoché costante la rigidezza, come mostrato per esempio nella seguente figura 21.

Fig.21- Distribuzione delle tensioni tangenziali in giunto a doppia sovrapposizione a gradini al variare della rigidezza del giunto (fig.19, pg.295)

Si vede come in pratica l'eliminazione di materiale (e non l'aggiunta) permette di ottenere una distribuzione simmetrica delle tensioni e quasi un raddoppiamento del carico sopportabile. Si osservi infine che le tensioni di sfogliamento non costituiscono per questo tipo di giunto un problema rilevante in quanto a causa del piccolo spessore delle parti esterne terminali, queste risultano adeguatamente ridotte e sovente trascurabili.

15.5.5 Giunti incollati e bullonati (o rivettati)

L'uso dei giunti misti, incollati e bullonati o rivettati, è praticato allorquando si vuole aumentare la resistenza dei giunti incollati soprattutto nei confronti di sovraccarichi e/o sollecitazioni di fatica in elementi di grosso spessore. E' in genere difficile ripartire il carico su incollaggio e bulloni in parte proporzionale alle loro capacità di resistenza in quanto si tratta di collegamenti caratterizzati da rigidezza ben diversa (il giunto incollato ha maggiore rigidezza di quello meccanico).

Un problema notevole è legato al corretto posizionamento degli elementi meccanici di collegamento che deve possibilmente avvenire nelle zone meno sollecitate dell'incollaggio. La posizione ideale è quindi quella centrale in cui, come visto in precedenza, si hanno le minime tensioni (cap.15.3.1).

L'uso di rivetti è comunque frequente nei giunti a semplice sovrapposizione al fine di limitare gli effetti flessionali e quindi le tensioni di sfogliamento. A tal fine i rivetti sono posizionati alle estremità del giunto contravvenendo alla regola sopra enunciata di posizionare bulloni e rivetti nelle zone meno sollecitate. Tale soluzione è pertanto da sconsigliare specie nelle applicazioni più impegnative preferendo ai rivetti soluzioni alternative di bloccaggio del giunto.

Per i compositi tale teoria può dar luogo a risultati largamente approssimati in quanto questa si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- (a) elementi di piccolo spessore;
- (b) deformazione a taglio degli elementi trascurabile;

Tali ipotesi risultano spesso troppo restrittive per i materiali compositi: lo spessore degli elementi collegati può essere non proprio piccolo e soprattutto la deformabilità a taglio dei compositi è in genere piuttosto elevata anche per materiali (laminati) che esibiscono elevate proprietà meccaniche nel piano. E' noto infatti che la rigidezza a taglio di un metallo è generalmente dell'ordine del 40% del modulo di Young mentre per un composito la rigidezza trasversale è in genere molto bassa (solitamente pari a 3-4 volte la rigidezza trasversale della matrice).

15.6. Materiali e preparazione delle superfici

Nel seguito si considerano gli effetti che le caratteristiche peculiari dei materiali costituenti gli elementi accoppiati e l'adesivo hanno sulla resistenza di un giunto incollato.

15.6.1 Orientamento delle lamine

La resistenza di un giunto incollato dipende in modo particolare dalla resistenza del materiale in prossimità della superficie. Trattando quindi di compositi laminati è possibile affermare che, fermo restando ogni altra condizione, la resistenza del giunto è legata alla resistenza a taglio delle lamine superficiali. E' noto che la resistenza a taglio di una lamina unidirezionale è massima nella direzione delle fibre e minima in quella ortogonale; conseguentemente l'orientamento delle lamine di estremità deve sempre essere a 0° (fibre allineate con il carico applicato) al fine di massimizzare la resistenza del giunto. Tale considerazione è valida per giunti a sovrapposizione (semplice, doppia ed a gradino) ma non risulta applicabile al caso dei giunti rastremati (scarf joint) nei quali come è facile comprendere la sequenza di impacchettamento del laminato non ha significativi effetti sulla resistenza.

15.6.2 Adesivi

Per la realizzazione di giunti incollati metallo-compositi si usano solitamente adesivi a base di resina epossidica precatalizzata. In particolare per temperature normali si usano adesivi duttili e possi-nitrilici caratterizzati da elevata resistenza allo sfogliamento. Questi adesivi si curano a temperatura di circa 120° e sono solitamente rinforzati con fibre di vetro o polimeri come nylon o poliestere. Essi mantengono le loro caratteristiche per temperature sino a 80° C circa.

Per temperature più elevate, sino a circa 120° C , è necessario ricorrere agli adesivi epossi-fenolici che hanno una temperatura di cura di circa 180° C . Questi hanno però un comportamento più fragile e quindi una minore resistenza allo sfogliamento.

L'aggiunta delle fibre in entrambi i tipi di adesivo ha lo scopo sia di dare una certa consistenza meccanica all'adesivo prima della cura al fine di facilitarne l'uso, sia di evitare l'assottigliamento eccessivo dello strato di adesivo durante l'incollaggio.

La presenza delle fibre permette inoltre di evitare il contatto diretto dei due materiali collegati che può in alcuni casi (es. alluminio e fibre di carbonio) portare a pericolosi fenomeni di corrosione galvanica. La loro presenza però può anche facilitare l'infiltrazione di umidità e quindi il degrado dell'adesivo e/o del legame adesivo struttura.

15.6.3 Preparazione delle superfici

Una corretta preparazione delle superfici da incollare è requisito fondamentale per una buona resistenza del giunto. E' necessario avere superfici pulite ed incontaminate, con una certa rugosità.

Il procedimento di preparazione della superficie di elementi metallici prevede quindi nell'ordine:

- (a) lo sgrassaggio con opportuni solventi;
- (b) l'irruvidimento della superficie con carta abrasiva o sabbiatura;
- (c) la pulizia con opportuno detergente;
- (d) l'anodizzazione (solo per alluminio e simili) al fine di formare uno strato stabile di ossido;
- (e) la protezione con anticorrosivo, generalmente un sottile strato di una soluzione di cromo in resina epossidica.

Per quanto concerne la preparazione della superficie del composito, è in genere sufficiente una adeguata pulizia ed irruvidimento della superficie. Tale operazione talvolta è evitata dotando i laminati, durante il rispettivo processo di produzione, di una strato superficiale di nylon o simili che può essere sfogliato prima dell'incollaggio del giunto. In questo modo dopo sfogliatura del rivestimento si ha una superficie pulita e sufficientemente rugosa ma con il pericolo di avere piccoli frammenti del rivestimento ancora attaccati al composito. Per questo problema si considera sempre migliore il risultato ottenuto mediante irruvidimento e pulizia della superficie.

L'irruvidimento della superficie deve portare sempre ad una rugosità tale da aumentare la superficie di contatto ma non dar luogo a facile intrappolamento di bolle d'aria che possono ridurre drasticamente la resistenza dell'adesivo.

In alternativa, un modo per ottenere un buon incollaggio consiste nel curare il laminato insieme all'adesivo. Si evita così la formazione di una netta interfaccia tra composito ed adesivo nonché la necessità di una pulizia spinta ed un irruvidimento adeguato delle superfici del giunto da realizzare.

15.7. Manifattura del giunto

15.7.1 Compositi pre-curati

Nel caso usuale in cui il materiale composito abbia già subito trattamento di cura, la formazione del giunto avviene disponendo, dopo trattamento delle superfici, sulle due parti da unire un piccolo strato di adesivo e disponendo così le parti in un apposito attrezzo che serve a tenere queste nella corretta posizione di incollaggio. Per piccoli giunti si applica quindi una pressione e si somministra calore utilizzando una pressa riscaldata. Per giunti di dimensioni più grandi tale operazione viene eseguita in autoclave in depressione in modo da estrarre i gas e l'aria eventualmente intrappolata dall'adesivo. Eliminati tali gas si procede all'applicazione della pressione ed alla somministrazione del calore.

15.7.2 Compositi non curati

Come accennato in precedenza, al fine di migliorare la bontà dell'adesione tra le parti, è buona norma ove possibile curare il composito contemporaneamente con l'adesivo ottenendo così un legame composito-adesivo senza soluzione di continuità. In questo caso, specie per giunti di notevole dimensione, la procedura di incollaggio è più complessa. In genere utilizzando preimpregnati si esegue dapprima la parte centrale dell'elemento in composito, poi si avvicina questo al componente in metallo disponendolo nella corretta posizione di incollaggio mediante l'ausilio di un opportuno banco di posizionamento, quindi si depone l'adesivo sulle superfici da incollare e si completa la formazione dell'elemento composito disponendo le estremità da incollare sopra la parte metallica pre-posizionata. A questo punto mediante autoclave si estraggono i gas (solventi ecc) e l'aria eventualmente inglobata quindi si procede al trattamento di cura.

Al fine di assicurare una corretta cura oltre che dell'adesivo anche del materiale composito, è necessario che adesivo e matrice del composito siano "compatibili" cioè abbiano simili temperature e tempi di cura.

15.8. Controllo della qualità del giunto

Il controllo della qualità di un incollaggio deve prevedere un controllo (a) della qualità delle superfici, (b) della procedura di incollaggio e (c) del componente finale ottenuto.

Esistono a tal proposito diversi metodi di indagine usati per controllare la qualità delle superfici metalliche, in grado di valutare la qualità dello strato di ossido ottenuto dopo anodizzazione e la presenza di eventuali sostanze inquinanti. Mezzi e modalità di indagine sono comunque strettamente legati al tipo di giunto ed ai materiali impiegati.

Per quanto concerne invece il controllo della qualità del procedimento di incollaggio questo va eseguito controllando opportunamente il ciclo di temperatura e pressione effettivamente realizzato.

La qualità finale del componente viene infine controllata mediante tecniche non distruttive come ultrasuoni (C-scan) e raggi X, capaci di rilevare la presenza di difetti di vario tipo. Allo stato attuale non sono però ancora stati messi a punto tests di tipo non distruttivo che consentano la valutazione della capacità di resistenza del giunto analizzato.

15.9. Giunti meccanici

Tra i giunti meccanici composito-metallo, di particolare importanza e diffusione sono i giunti

ottenuti mediante uso di bulloni e rivetti. Pure utilizzati per speciali applicazioni sono i giunti ad incastro (ottenuti per doppio incollaggio ovvero mediante formazione nell'elemento composito di una estremità rastremata che va ad incastrarsi nell'elemento metallico) o quelli ottenuti avvolgendo opportunamente le fibre attorno al perno di carico in modo da minimizzare gli effetti di concentrazione della tensioni (così sono modellate per esempio le estremità delle pale di elicotteri a formare una capsula di innesto al rotore).

15.9.1 Resistenza di giunti bullonati

A differenza di quanto accade nei giunti incollati, nei giunti bullonati o rivettati la trasmissione del carico avviene essenzialmente attraverso regioni limitate degli elementi accoppiati che risultano soggette a sollecitazioni prevalentemente di compressione e taglio.

Sebbene infatti l'eventuale serraggio dei bulloni può consentire la trasmissione di una parte del carico attraverso le forze di attrito, in genere a queste non si fa affidamento nella progettazione in quanto il precarico può facilmente venire meno a seguito di vibrazioni e/o deformazioni flessionali del giunto o del bullone.

Similmente a quanto si verifica nei giunti metallo-metallo, il cedimento di un giunto metallo-composito bullonato avviene prevalentemente per (vedi anche fig.9):

- 1) sforzo normale sulla sezione ridotta;
- 2) taglio del labbro;
- 3) compressione superficiale (schiacciamento);

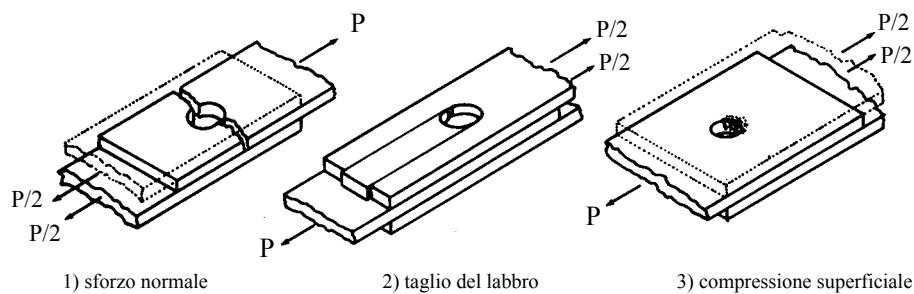


Fig.9 – Principali modalità di cedimento di giunti meccanici composito-metalllo.

In particolari condizioni (errato montaggio, errato dimensionamento, sollecitazioni anomale ecc.) sono pure possibili cedimenti per (vedi anche fig.10):

- 4) spaccatura del labbro;
- 5) sfilamento del bullone;
- 6) rottura del bullone (taglio, flessione)

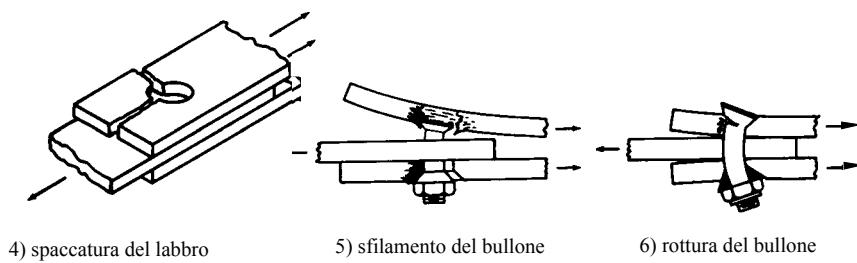


Fig.10 – Altre modalità di cedimento di giunti meccanici composito-metalllo

Nel seguito si esaminano in dettaglio ciascuna delle modalità di rottura di cui ai punti 1)-3) determinando la corrispondente resistenza del giunto. Per le modalità di cui ai punti 4) e 5) è in genere necessaria una analisi sperimentale della giunzione per verificare l'assenza di tali possibili cedimenti. Per la modalità di cui al punto 6) invece è sufficiente una verifica a flessione e taglio del bullone.

15.9.1.1 Sforzo normale sulla sezione ridotta

Si consideri il caso di giunto imbullonato a doppia sovrapposizione e con singola fila di bulloni (o rivetti).

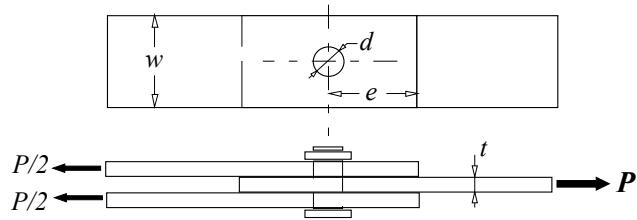


Fig.11 - Giunto imbullonato a doppia sovrapposizione: geometria e notazione generale.

Con riferimento alla notazione indicata in fig.11 si ha che la massima tensione presente nella sezione netta degli elementi accoppiati è espressa dalla formula:

$$\sigma_{\max} = K_T \frac{P}{(w-d)t} \quad (16)$$

in cui K_T è il coefficiente di concentrazione delle tensioni, valido per il materiale costituente l'elemento considerato.

Nel caso di giunzioni metallo-compositi, detto coefficiente di concentrazione delle tensioni è solitamente trascurato per l'elemento metallico considerando i benefici effetti legati al rilassamento delle tensioni a seguito di plasticizzazione del materiale.

Per l'elemento composito la valutazione dell'effetto di intaglio è piuttosto complessa in quanto è necessario valutare l'effettiva concentrazione delle tensioni nel laminato. Considerando per semplicità il laminato come un ortotropo macroscopicamente omogeneo, il fattore di intaglio per piastra forata è definito dalla relazione:

$$K_T = 1 + \sqrt{2\sqrt{E_x/E_y} - 2\nu_{xy} + E_x/G_{xy}} \quad (17)$$

Questo coefficiente varia da circa 7.4 in presenza di lamine disposte tutte a 0° , a valori anche inferiori a quelli corrispondenti al caso di materiale isotropo ($K_T=3$) in presenza di elevata percentuale di lamine disposte a $\pm 45^\circ$.

In pratica l'uso di lamine a $\pm 45^\circ$ permette di distribuire il carico sul bordo del foro e quindi di limitare l'effetto di intaglio. Poiché però la resistenza del laminato certamente diminuisce all'aumentare della percentuale di lamine disposte a $\pm 45^\circ$, la configurazione solitamente usata per ottenere un buon compromesso tra resistenza del laminato e resistenza del giunto è quella che prevede l'uso di un 50% di lamine a $\pm 45^\circ$. Ciò in pratica consente di massimizzare il rapporto σ_R/K_T e quindi per la (15) il carico P sopportabile dal giunto.

Tutte queste considerazioni sono approssimate in quanto non considerano anzitutto ne la presenza del perno ne le effettive modalità di trasmissione del carico. Inoltre, esse non considerano le tensioni interlaminari ne le variazioni che le tensioni subiscono passando da una lamina all'altra

(ipotesi di laminato microscopicamente omogeneo).

Valutazioni più accurate delle tensioni in prossimità della sezione netta possono essere fatte con metodi numerici (BEM, FEM) considerando l'effettivo stato tensionale biassiale che si ha al bordo del foro per la presenza della compressione operata dal bullone, ed utilizzando un opportuno criterio di resistenza. In alternativa, sono stati pure sviluppati metodi semi-empirici di valutazione della massima tensione.

In ogni caso (metodi numerici o procedimenti empirici) la procedura di valutazione della resistenza del giunto si complica significativamente e per questo in valutazioni di prima approssimazione si usa correntemente la relazione (15) che ha una accettabile rispondenza con i dati sperimentali.

La trattazione sopra esposta si riferisce al caso di sollecitazione di trazione. Diversa è la situazione nel caso di compressione in quanto ora la resistenza degli elementi nella sezione ridotta è legata ai fenomeni di instabilità delle fibre e quindi essa risulta dominata dalla resistenza a taglio della matrice. Conseguentemente, tenendo conto della notevole influenza di umidità e temperatura sulla resistenza della matrice, si ha che la resistenza a compressione del giunto è fortemente dipendente da tali parametri ambientali. All'aumentare della temperatura (sempre inferiore a 120° per matrice epossidica) e dell'umidità la resistenza a compressione del giunto può ridursi sino al 50% di quella che si ha in ambiente secco a temperatura ambiente.

In compressione, inoltre, la resistenza del giunto non è valutabile considerando il caso semplice di piastra forata in quanto la presenza del bullone da luogo ad una vantaggiosa stabilizzazione del materiale attorno al foro. Nella progettazione è necessario quindi fare riferimento a risultati sperimentali.

15.9.1.2 Taglio del labbro

Per sollecitazione di trazione semplice la rottura del labbro si verifica allorquando la tensione tangenziale (supposta uniforme) eguaglia la tensione di rottura del laminato, cioè (vedi fig.9 e 11):

$$\tau = \frac{P}{2et} = \tau_R \quad (18)$$

La (18) è la relazione comunemente utilizzata per le lamiere metalliche eseguite in genere con acciai a bassa resistenza (duttili) per i quali è possibile trascurare gli effetti di intaglio. Il suo uso in presenza di materiali compositi, con comportamento fragile è in genere non corretto in quanto non tiene debitamente conto dei fenomeni di concentrazione delle tensioni.

L'osservazione sperimentale mostra in particolare che la (18) è valida solo per laminati che presentano una significativa percentuale di lamine disposte a $\pm 45^\circ$ che determinano una distribuzione del carico attorno al foro con trascurabili effetti di concentrazione delle tensioni.

Ben diversa è, come è facile intuire, la situazione per lamine disposte tutte disposte a 0° . In questo caso infatti si hanno notevoli effetti di concentrazione delle tensioni. Tale configurazione è comunque proibitiva in quanto la resistenza del giunto è affidata unicamente alla resistenza a taglio della matrice cosicché la rottura per splitting (strappo del composito) avviene con estrema facilità.

Similmente a quanto accade per il cedimento per sforzo normale sulla sezione ridotta, anche in questo caso la condizione ottimale di massima resistenza si realizza per laminati che abbiano un 50% delle lamine a $\pm 45^\circ$, con la restante parte orientata a 0° .

15.9.1.3 Compressione superficiale

In presenza di elevate pressioni specifiche il danneggiamento della giunzione può avvenire a seguito dello schiacciamento subito dal materiale posto nella zona compressa attorno al foro. In questa zona la tensione media di compressione è data dalla semplice relazione (vedi fig.9 e 11):

$$\sigma = \frac{P}{td} \quad (18)$$

La resistenza allo schiacciamento del materiale composito è fortemente dipendente dall'orientamento delle lamine. Come è intuitivo, questa è massima per lamine disposte a 0° in quanto le fibre sono molto efficienti nel sostenere carichi di schiacciamento specie se sono inibiti fenomeni di instabilità. Quest'ultima condizione può essere realizzata, entro certi limiti, mediante applicazione di un precarico al bullone che determina un serraggio degli elementi accoppiati. Osservazioni sperimentali hanno a tal proposito mostrato che per composti in fibra di vetro-resina epossidica, la resistenza allo schiacciamento si massimizza utilizzando pressioni di serraggio di circa 20 MPa; al di là di tale pressione non si ottengono ulteriori miglioramenti della resistenza. Comunque, per la facile rottura del labbro non è possibile usare laminati con molte lamine disposte a 0° , ma è necessario disporre un sufficiente numero di lamine a $\pm 45^\circ$. Con una percentuale del 50% di lamine a 45° si assicura in genere anche una elevata resistenza allo schiacciamento superficiale.

Contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, la resistenza allo schiacciamento non è molto influenzata da umidità e temperatura in quanto essi determinano non solo un abbassamento della resistenza del materiale ma anche un positivo "addolcimento" del materiale che mitiga, specie in presenza di serraggio, i fenomeni di concentrazione delle tensioni.

15.10. Resistenza a fatica dei giunti meccanici

In presenza di sollecitazioni di fatica la resistenza di un giunto meccanico metallo-composito risulta strettamente legata al verso di applicazione del carico (trazione o compressione). In presenza di sollecitazione di fatica con trazione predominante ($R>-1$) la ripetizione del carico applicato provoca cedimenti localizzati della matrice e possibili fenomeni di debonding intorno alla zona di concentrazione delle tensioni con conseguente rilassamento locale delle tensioni. Dopo un periodo iniziale di esercizio la resistenza residua del giunto può quindi migliorare significativamente. In sollecitazioni cicliche con trazione predominante gli effetti della fatica possono pertanto migliorare la resistenza statica a meno che il danneggiamento del materiale non porti alla formazione e propagazione di cricche responsabili di successivi severi fenomeni di delaminazione.

Molto diversa è la situazione in presenza di sollecitazioni di fatica con compressione dominante ($R<-1$). In questo caso le rotture locali provocano come prima una distensione dei picchi di tensione e la propagazione delle cricche da luogo a delaminazione che però ora risulta molto più dannosa in quanto, determinando un significativo abbassamento della rigidezza del laminato, da luogo a facili fenomeni di instabilità ed innalzamento delle tensioni di compressione nelle parti più rigide della struttura danneggiata. La sollecitazione di fatica quindi provoca in questo caso un abbassamento della resistenza residua del giunto.

Per questo, nella progettazione di giunti metallo-compositi, in presenza di sollecitazioni di fatica con trazione predominante si è soliti fare riferimento in modo conservativo alla resistenza statica. Per sollecitazioni con compressione predominante si considera invece la resistenza a fatica risultando questa inferiore a quella statica.

Le considerazioni sopra esposte possono essere applicate tanto in presenza che in assenza dell'elemento di collegamento. La presenza del bullone infatti non modifica sostanzialmente l'evoluzione del fenomeno di danneggiamento per fatica in quanto anche nei casi in cui il collegamento viene eseguito con forzamento, questi in genere viene meno dopo un certo periodo di funzionamento a causa di inevitabili cedimenti parziali del materiale per schiacciamento. Allo schiacciamento segue l'allentamento del precarico e la comparsa di effetti flessionali che inducono

ulteriori allargamenti del foro. A questo punto la situazione in termini di tensioni non risulta significativamente diversa dal caso di foro libero.

Nella fatica di un giunto, la situazione peggiore si verifica in genere in presenza di carichi di fatica alternati (trazione-compressione, $R \approx 1$). In questi casi il danneggiamento della giunzione avviene solitamente secondo le seguenti fasi successive:

- a) perdita della pressione di serraggio, causata da deformazioni locali, inversione di carico, vibrazioni ecc;
- b) schiacciamento locale ed allargamento del foro;
- c) rottura del singolo bullone;
- d) rottura finale del giunto prodotto dal sovraccarico di bulloni e fori adiacenti.

In molte applicazioni, al fine di evitare la pericolosa propagazione di fenomeni di delaminazione che possono originarsi nelle zone di concentrazione delle tensioni, nella progettazione si limita opportunamente la deformazione massima delle zone lontane dal giunto. Per esempio nella progettazione in campo aeronautico, si assumono per le zone lontane dai fori deformazioni ammissibili con valori compresi tra 3000 e 4000 $\mu\text{m/m}$.

15.11. Mezzi per migliorare la resistenza

Diverse procedure sono impiegate nella pratica costruttiva al fine di migliorare la resistenza dei giunti meccanici.

La maggior parte di queste procedure prevedono l'inglobamento nel composito, nella zona prossima al foro, di lamine addizionali opportunamente disposte (es. a 45°). Tali accorgimenti risultano però piuttosto costosi e pertanto sono limitati ad applicazioni di notevole pregio.

In alternativa, la resistenza del giunto può essere migliorata aggiungendo nella zona dei fori fibre più resistenti (es. boro) o più duttili (a basso modulo come fibre di vetro o Kevlar) al fine di addolcire il materiale in prossimità del giunto ed evitare i pericolosi picchi di tensione.

Risultati simili si possono ottenere irrigidendo localmente il laminato con l'aggiunta di sottili lamine di titanio. Quest'ultima soluzione risulta molto efficace nel migliorare la resistenza allo schiacciamento.

Una soluzione più semplice ed economica delle precedenti consiste nell'incollare sulle due superfici esterne del giunto dei rinforzi in composito o in titanio. E' necessario in questi casi sagomare opportunamente (rastremare) i rinforzi in modo da limitare le tensioni tangenziali e le tensioni di sfogliamento.

Studi sperimentali condotti considerando le diverse soluzioni migliorative hanno evidenziato che la soluzione più leggera si ottiene utilizzando lamine addizionali a 45° , mentre la soluzione che da luogo al minimo spessore è quella che fa uso di lamine di titanio. L'uso del titanio però da luogo a non pochi problemi legati alla manifattura per via del necessario pre-trattamento del materiale nonché delle difficoltà di esecuzione dei fori in quanto il titanio tende a produrre facile delaminazione attorno al foro.

15.12. Accorgimenti per una corretta esecuzione del giunto

15.12.1 Esecuzione del foro

Al fine di evitare danneggiamenti del materiale composito durante la esecuzione dei fori, eseguiti solitamente mediante utensile in carburo di tungsteno a bassa velocità, è necessario sostenere il laminato disponendo lo stesso tra un sandwich di laminati di risulta o inserendo lo stesso in apposita guida di foratura. Il problema principale è la delaminazione sul lato di uscita dell'utensile. Questo problema, mai completamente assente nella foratura industriale può essere minimizzato ricoprendo preventivamente il laminato con un sottile strato di resina epossidica che può anche

essere usata all'occorrenza per riparare limitate delaminazioni causate dalla foratura.

Nel caso in cui l'esecuzione del giunto prevede l'applicazione di elementi con testa svasata a filo con la superficie dei componenti, le svasature dei fori vanno eseguite evitando la realizzazione di bordi a coltello che nei compositi sono causa di facile danneggiamento per via della fragilità del materiale.

15.12.2 Realizzazione del collegamento

Per quanto concerne le modalità di alloggiamento dei bulloni è bene in generale evitare il forzamento che può essere responsabile di pericolosa delaminazione intorno al foro. Per questo si usano generalmente accoppiamenti con piccolo gioco (0.05-0.1 mm) con limitate tolleranze.

Per quanto concerne invece la spaziatura dei bulloni, al fine di ottenere una buona resistenza del collegamento si raccomanda in genere uno spessore minimo del labbro pari a 2-3 volte il diametro del bullone ed un passo minimo (distanza tra bulloni successivi) pari a 3-4 volte il diametro.

Per la pressione di serraggio, come accennato, si raccomanda un valore intorno ai 20 MPa, mentre il momento torcente può essere stimato considerando l'uso di una rondella di diametro pari a $2.2d$.

15.12.3 Protezione contro la corrosione

Per quanto concerne infine la protezione da possibili fenomeni corrosivi va notato anzitutto che compositi in fibra di carbonio danno luogo a fenomeni di corrosione galvanica se a contatto con la parte metallica del giunto, mentre nessun problema di questo tipo sussiste per i compositi in fibra di vetro e boro. Per evitare tali inconvenienti è sconsigliato l'uso di bulloni in acciaio o alluminio mentre possono essere vantaggiosamente utilizzati materiali come il titanio o l'acciaio inox.

In ogni caso è buona norma proteggere opportunamente le parti del bullone che vanno a contatto con alluminio o fibra di carbonio. A tal fine si usano solitamente protettivi a base di resina epossidica con fibra di vetro.

Altra pratica pure diffusa è quella di sigillare i bulloni con sigillante anticorrosivo a base di gomma di polisolfito-cromato, sebbene quest'ultima precauzione non è essenziale per bulloni in titanio con eccezione del caso in cui si è in presenza di particolari sostanze corrosive o sia necessaria la tenuta (carburanti ecc).