

9. La fatica nei compositi

9.1. Generalità

Similmente a quanto avviene nei materiali metallici, l'applicazione ad un composito di carichi variabili ciclicamente può dar luogo a rottura anche quando la massima sollecitazione risulta inferiore alla resistenza statica del materiale (fatica). Sollecitazioni di fatica sono presenti in svariate applicazioni dei compositi, dal campo aeronautico a quello automobilistico a quello navale ecc. Conseguentemente, rotture per fatica sono molto frequenti e per questo diversi studi sono stati condotti al fine di comprendere il comportamento a fatica dei compositi evidenziando i fattori che primariamente ne influenzano la durata.

Nei compositi, similmente a quanto accade nei materiali isotropi, la rottura per fatica è una rottura progressiva che si manifesta con la formazione e propagazione di difetti. Il fenomeno è comunque ben più complesso di quello osservato nei materiali metallici e può involgere uno o più dei seguenti processi di danneggiamento:

- 1) scollamento fibra matrice (debonding);
- 2) fessurazione della matrice;
- 3) rottura della fibra;
- 4) scollamento delle lamine (delaminazione).

Contrariamente a quanto accade nei materiali isotropi in cui la formazione di un difetto è generalmente seguita da una crescita relativamente veloce e con legge esponenziale, in un composito il danneggiamento per fatica può iniziare molto prima del cedimento e la formazione di cricche di fatica può in alcuni casi, a causa della intima struttura del laminato, subire un arresto e non portare affatto alla rottura dell'elemento. Per esempio la cricca originatasi nella matrice di una lamina può arrestarsi quando essa incontra la fibra così come la cricca propagantesi in una lamina di un laminato si può arrestare quando essa incontra l'interfaccia con la lamina adiacente avente diverso orientamento.

Sovente, al fine di evitare ogni possibile danneggiamento del materiale, nella progettazione a fatica si fa in modo che il carico applicato sia sempre inferiore a quello che produce danneggiamento del materiale (approccio conservativo, vita infinita).

Laddove invece può essere tollerato un danneggiamento a fatica del componente, occorre tenere presente che il concetto di danneggiamento è strettamente legato alla particolare applicazione. Per esempio nelle applicazioni in cui è di fondamentale importanza la rigidezza del componente, il danneggiamento corrisponde in termini pratici alla diminuzione della rigidezza ed il cedimento al raggiungimento di un valore minimo di rigidezza consentito; in altri casi il danneggiamento coincide con l'aumento delle deformazioni sotto carico, ed il cedimento corrisponde al raggiungimento di una certa deformazione limite.

Il fenomeno delle fatica dei compositi è comunque piuttosto complesso ed ancora non completamente compreso. Per questo, contrariamente a quanto accade per i materiali tradizionali, per i compositi non sono ancora ben affermate relazioni attendibili che consentono la previsione della resistenza e/o della vita a fatica sotto una determinata sollecitazione applicata.

9.2. Meccanismi di propagazione dei difetti

Vari studi sperimentali condotti sulla fatica dei materiali compositi fibro-rinforzati hanno evidenziato che il danneggiamento per fatica inizia quasi sempre mediante la formazione di cricche nelle lamine in cui la direzione delle fibre forma l'angolo più grande con la direzione di applicazione del carico. In un laminato cross-ply, per esempio, le cricche di fatica iniziano sempre nelle lamine a 90° e risultano disposte sempre in direzione ortogonale al carico applicato. Solitamente esse interessano l'intera sezione resistente della lamina (vedi fig.1a) e possono formarsi

anche dopo breve periodo di esercizio sotto carichi anche inferiori al 20% della resistenza a trazione del laminato.

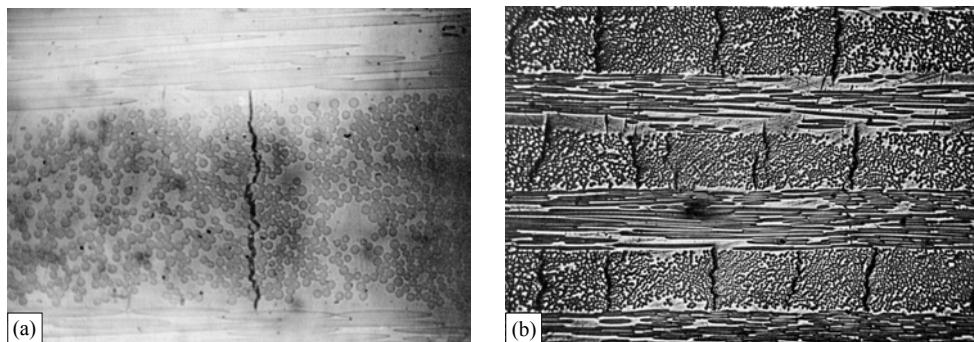


Fig.1 – Cricca semplice (a) e cricche multiple (b) in laminato cross-ply (lamine ortogonali) con $P < 20\%P_r$.

Tali difetti iniziali possono interessare facilmente tutte le lamine ortogonali (fig.1b) e solitamente non si propagano sulle lamine adiacenti se queste sono con fibre sufficientemente allineate col carico (vedi fig.1b).

Per livelli di carico al di sopra del 25-30% circa della resistenza statica, al crescere del numero di cicli di fatica i fenomeni di concentrazione di tensione provocati dalle cricche in prossimità dell'interfaccia tra le lamine finiscono con il produrre cricche di delaminazione disposte parallelamente all'interfaccia (vedi fig.2a).

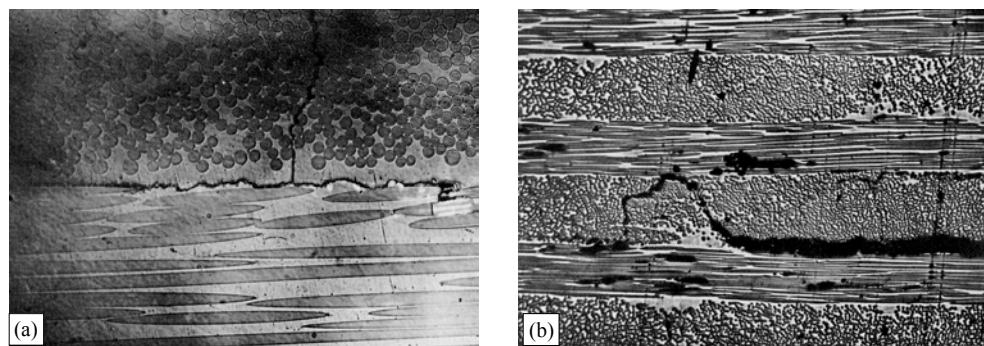


Fig.2 - Formazione (a) e propagazione (b) di cricche in laminato cross-ply (lamine allineate) con $P \geq 25\%P_r$.

Il propagarsi di tali cricche produce fenomeni di delaminazione crescente coi cicli di applicazione del carico (fig.2b) e può portare ad una completa separazione delle lamine che evidentemente trasformando il laminato in un insieme di lamine praticamente indipendenti, finisce per ridurre notevolmente la rigidezza del manufatto. In queste condizioni si verifica facilmente la rottura della lamina più debole o più caricata. A partire da quest'ultima condizione la vita residua del laminato è generalmente inferiore al 10% della vita totale.

Nella parte finale della vita, in molti casi cricche di fatica si presentano anche nelle lamine con fibre parallele al carico. Queste possono originarsi dalla concentrazione di tensione prodotta dalla rottura di una fibra come illustrato in fig.3a. In questo caso la cricca si propaga lungo l'interfaccia sotto sollecitazione di taglio (shear crack).

In altri casi la cricca si origina nella matrice ed avvicinandosi alla fibra può produrre debonding quando la concentrazione di tensione all'apice della cricca involge la zona di interfaccia (fig.3b). Tale fenomeno è caratteristico di compositi con bassa adesione fibra-matrice.

Se invece l'adesione fibra-matrice è elevata la cricca, specie in presenza di matrice poco resistente, può facilmente aggirare la fibra e continuare a propagarsi al di là di questa (fig.3c).

In presenza infine di fibre poco resistenti a fatica la cricca può interessare direttamente la fibra stessa. In particolare per fibre duttili essa si può propagare in modo stabile all'interno della fibra (fig.3d) mentre in presenza di fibre fragili essa può provocare rottura fragile (propagazione instabile) della fibra stessa (fig.3e).

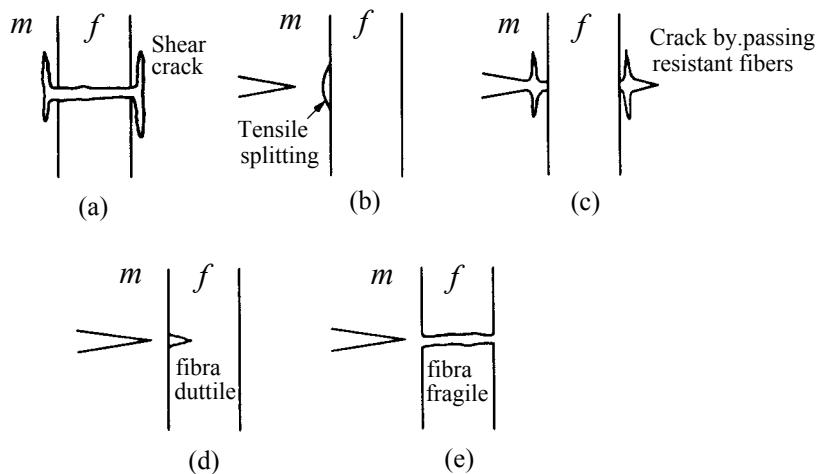


Fig.3 - Varie modalità di formazione e propagazione di una cricca in composito fibro-rinforzato.

9.3. Determinazione sperimentale del danneggiamento a fatica

Lo studio del comportamento a fatica dei materiali compositi necessita l'uso di appropriate tecniche sperimentali che consentano il monitoraggio del danneggiamento subito dal materiale a seguito della formazione e propagazione di cricche e difetti di vario tipo.

Uno dei metodi più attendibili di analisi del danneggiamento a fatica è certamente costituito dalla analisi microscopica di sezioni trasversali mediante tecniche di metallografia che consentono di determinare l'entità del danneggiamento per esempio sulla base del numero di cricche per unità di superfici. Tale metodo ha l'inconveniente di essere distruttivo e quindi se si vuole monitorare il processo di danneggiamento nel tempo occorre disporre di un elevato numero di provini. Essi poi non consentono di controllare il danneggiamento di un componente in servizio senza metterlo fuori servizio. Particolarmente interessanti sono per questo i metodi di indagine non distruttiva come ultrasuoni, termografia, raggi X, interferometria olografica ecc.

Con la tecnica ad ultrasuoni, la cui applicazione a i compositi è in fase di sviluppo, è possibile rilevare la presenza di fessurazioni interne e la loro estensione (vedi letteratura specializzata).

Anche l'indagine termografica, eseguita mediante misura della distribuzione di temperatura durante l'applicazione di una sollecitazione di fatica, permette di rilevare l'entità del danneggiamento. L'energia racchiusa dal ciclo di isteresi meccanica viene dissipata in calore che provoca il riscaldamento del materiale. Sperimentalmente si osserva che l'aumento della temperatura è ben correlato con la entità del danneggiamento, cioè le zone più calde sono quelle con maggiore densità dei difetti.

Pure l'interferometria olografica può essere vantaggiosamente utilizzata per l'analisi qualitativa di difetti superficiali e sub-superficiali evidenziati da irregolarità del campo di frange osservate.

Un metodo interessante di analisi del danneggiamento è rappresentato infine dalla misura della rigidezza. In questo metodo il danneggiamento D è associato direttamente alla variazione relativa di rigidezza del materiale, cioè si assume:

$$D = \frac{E_{iniz} - E}{E_{iniz}} \quad (1)$$

Il valore corrente della rigidezza è in particolare desunto dalla diagonale del ciclo di isteresi del materiale.

A titolo di esempio la fig.4 mostra l'andamento del numero relativo di cricche, del modulo di Young e della resistenza a trazione residua di un laminato cross-ply in fibre di vetro-resina epossidica al variare del numero di cicli di applicazione del carico di fatica.

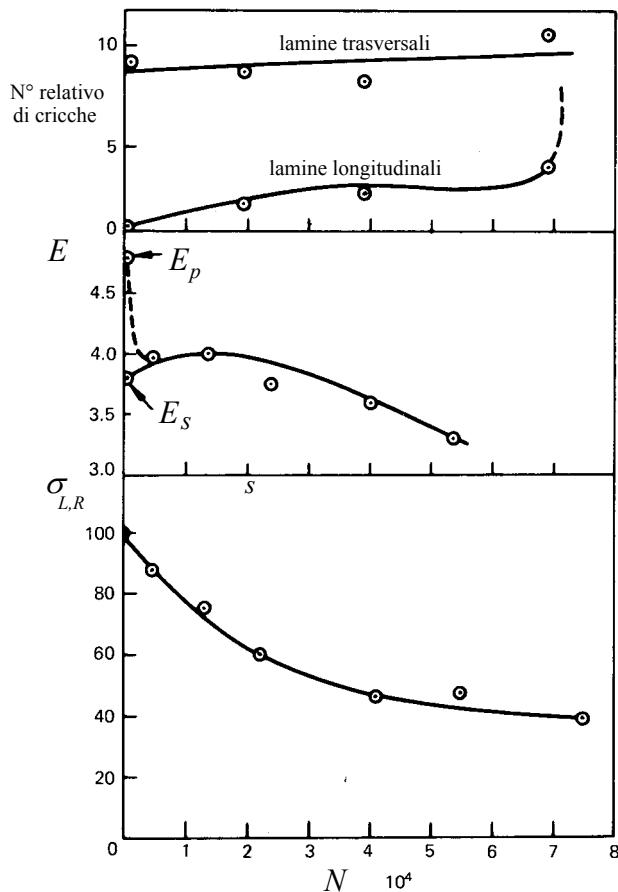


Fig.4 - Andamento di vari parametri al variare del numero di cicli per laminato cross-ply

Si vede come nelle lamine ortogonali il numero di cricche per unità di superficie cresce in modo pressoché lineare con il numero di cicli mentre i difetti nelle lamine longitudinali risultano dapprima crescenti poi hanno un periodo di stabilizzazione per poi crescere repentinamente prima della rottura.

Il modulo di Young del materiale invece subisce inizialmente una forte diminuzione. Si osserva in particolare che esso risulta in un certo intervallo iniziale ben superiore del modulo (teorico) secondario per poi divenire anche significativamente inferiore a questo dopo alcune decine di migliaia di cicli di fatica.

Per quanto concerne infine la resistenza residua si osserva in pratica un andamento decrescente asintotico sino a poco prima della rottura in cui si assiste ad una rapida evoluzione del danneggiamento che porta ovviamente ad una brusca caduta della resistenza residua.

Un parametro significativo del danneggiamento a fatica, specie per laminati compositi cross-ply, è rappresentato dalla densità di difetti presenti. Tale densità è sovente indicata dal passo medio (p)

delle cricche, inteso come distanza media relativa tra due cricche successive in una lamina disposta in direzione ortogonale al carico ciclico applicato.

Vari studi sperimentali hanno evidenziato l'esistenza di una relazione quantitativa pressoché lineare tra la diminuzione relativa del modulo di Young $\Delta E/E$ ed il rapporto p/t tra il passo (p) delle cricche e lo spessore (t) della lamina (vedi fig.5).

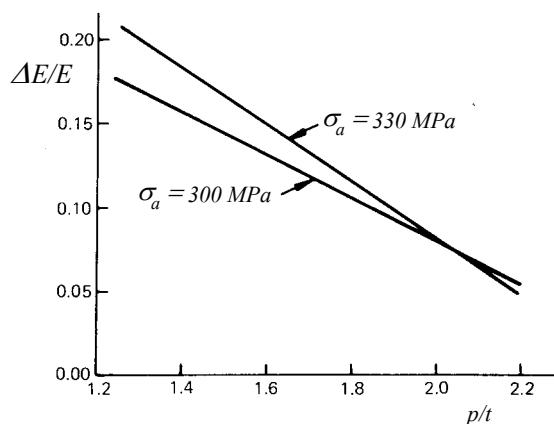


Fig.5 - Legame tra variazione della rigidezza e rapporto passo cricche/spessore della lamina.

Nella fig.6 è infine riportato l'andamento del decadimento del carico sopportato e dell'aumento della temperatura in un laminato polipropilene-fibra di vetro soggetto a flessione alternata a deformazione costante, al variare del numero di cicli di carico applicati.

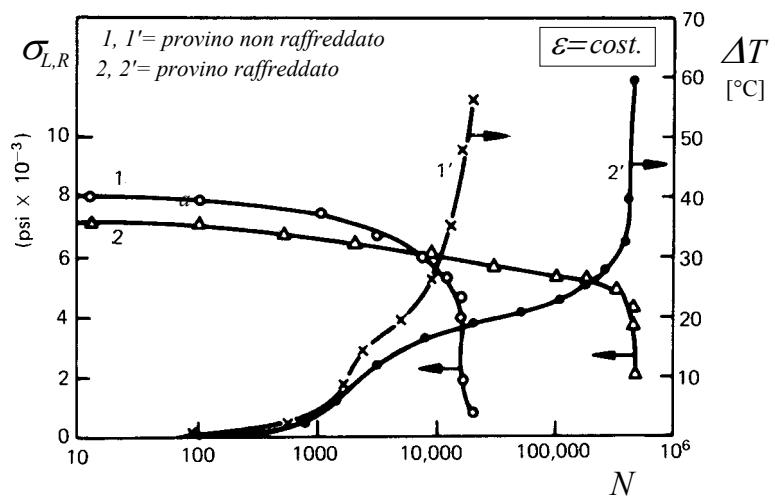


Fig.6 - Andamento del decadimento del carico sopportato e dell'aumento della temperatura in laminato polipropilene-fibra di vetro.

Si vede chiaramente come significative variazioni dei parametri considerati si verificano all'aumentare del numero di cicli di applicazione del carico. In particolare il carico si mantiene inizialmente pressoché costante per poi decrescere in modo pressoché esponenziale sino a rottura. Significativi miglioramenti della resistenza a fatica si ottengono raffreddando il provino in modo da smaltire il calore prodotto dalla dissipazione dell'energia viscoelastica assorbita dalla resina polimerica. In presenza di sollecitazioni di fatica ad alta frequenza, raffreddando il pezzo si possono ottenere miglioramenti della resistenza a fatica anche di un ordine di grandezza.

9.4. Parametri che influenzano la resistenza a fatica

La resistenza a fatica dei materiali compositi dipende da vari fattori legati alla intima natura e struttura del materiale nonché alle particolari condizioni di sollecitazione ed ambientali.

Fissate le caratteristiche delle fibre, la resistenza a fatica di un composito dipende essenzialmente da:

- 1) materiale della matrice;
- 2) orientamento delle fibre e sequenza di impacchettamento;
- 3) percentuale in volume di fibre;
- 4) adesione fibra-matrice;
- 5) tipologia di sollecitazione;
- 6) tensione media;
- 7) frequenza di applicazione del carico;
- 8) condizioni ambientali (umidità, corrosione ecc).
- 9) effetti di intaglio.

9.4.1. Materiale della matrice

Per quanto concerne l'influenza del materiale della matrice si rileva che la migliore resistenza a fatica si ottiene con materiali che presentano di per se elevata resistenza a fatica e, allo stesso tempo, una buona adesione fibra-matrice. Vari studi condotti su compositi con fibre di vetro (E) hanno mostrato come la più alta resistenza a fatica si ha con matrice epossidica (vedi fig.7).

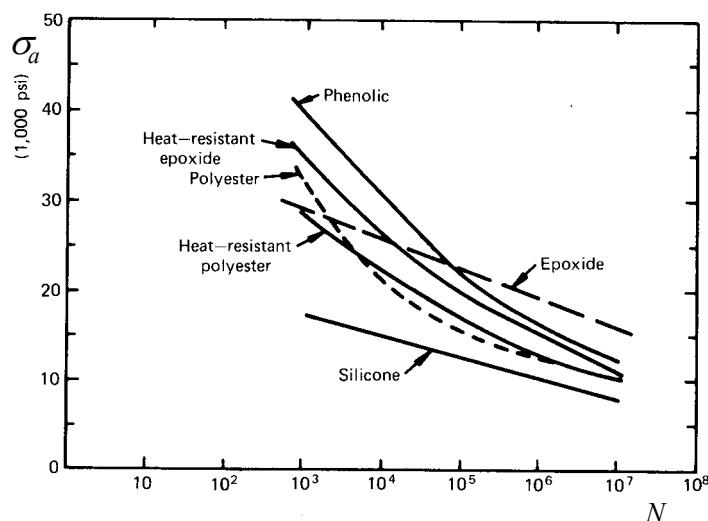


Fig.7 - Influenza del materiale della matrice sulla resistenza a fatica di compositi in fibra di vetro.

L'ottima resistenza a fatica ottenuta con la resina epossidica, specie ad elevato numero di cicli, è dovuta alla intrinseca durezza e resistenza al deterioramento della resina epossidica nonché al basso ritiro dopo la cura (basse tensioni residue). Le tensioni residue da ritiro, caratterizzati da elevati gradienti, facilitano infatti l'innesto della frattura e quindi danno luogo a significative diminuzioni della resistenza a fatica del composito.

9.4.2. Orientamento delle fibre e sequenza di impacchettamento

L'influenza dell'orientamento delle fibre sulla resistenza a fatica di un composito è piuttosto complessa. Sebbene la massima resistenza statica si ha nella direzione delle fibre, la resistenza a fatica non raggiunge il massimo per compositi con lamine tutte con fibre allineate col carico. In queste condizioni infatti si verificano abbastanza facilmente fenomeni di cedimento causati dalla

bassa resistenza del laminato in direzione trasversale: si formano facilmente fessurazioni in direzione parallela alle fibre che finiscono col danneggiare irreversibilmente il materiale. Migliori risultati si ottengono invece disponendo alcune lamine a 90° (cross-ply) in modo da evitare tali fenomeni di danneggiamento precoce. Ottimi risultati risultati si ottengono inoltre disponendo le varie lamine con angoli di $\pm 5\text{--}10^\circ$ (vedi fig.8).

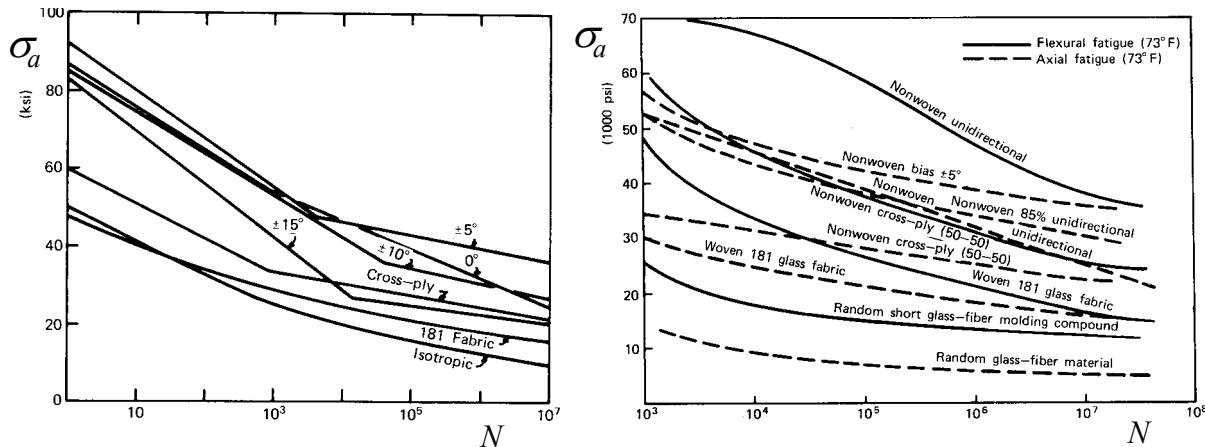


Fig.8 - Influenza dell'orientamento delle fibre sulla resistenza a fatica.

Dalla stessa fig.8 si vede che nei confronti della fatica non è conveniente usare compositi con fibre a tessuto (*fabric*) che manifestano una resistenza ben inferiore di quella di equivalenti laminati cross-ply.

Ciò è dovuto al fatto che nei laminati cross-ply le fibre sono rettilinee e parallele mentre nei laminati a tessuto le fibre presentano una pieghettatura che ne provoca una diminuzione della resistenza.

Oltre all'orientamento delle lamine anche la sequenza di impacchettamento influenza significativamente la resistenza a fatica. Ciò si spiega in gran parte in termini di tensioni interlaminari. Si è già visto come le tensioni interlaminari dipendono anche dalla sequenza di impacchettamento e che, fermo restando numero ed orientamento delle lamine, in alcune sequenze di impacchettamento si possono avere basse tensioni tangenziali interlaminari e/o tensioni normali di compressione mentre per altre sequenze si possono avere elevate tensioni tangenziali e/o tensioni normali di trazione che facilitano il verificarsi di fenomeni di delaminazione a partire dai contorni liberi con formazione di cricche che si propagano più o meno velocemente verso l'interno.

9.4.3. Percentuale di fibre

L'osservazione sperimentale mostra che per la quasi totalità dei materiali compositi la resistenza a fatica aumenta con l'aumentare della percentuale di fibre presenti, cioè, contrariamente a quanto succede per molti materiali tradizionali (vedi per esempio l'acciaio per il quale il rapporto di fatica decresce all'aumentare della resistenza statica), la resistenza a fatica aumenta con l'aumentare della resistenza statica.

La fig.9 mostra, a titolo di esempio, la resistenza a fatica assiale (fig.9a) ed a flessione rotante (fig.9b) di compositi con fibra di vetro.

In generale la resistenza a fatica aumenta con l'aumentare della resistenza statica sebbene osservazioni sperimentali mostrano che per compositi resina epossidica-fibra di vetro la resistenza a fatica, come la resistenza statica e per gli stessi motivi, non aumenta al crescere della percentuale di fibre oltre il 70% circa.

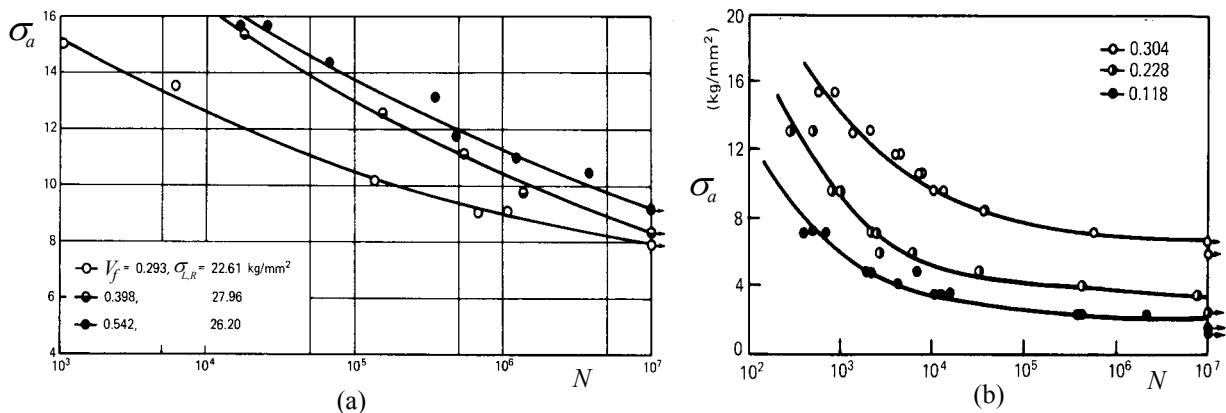


Fig.9 - Influenza della percentuale di fibre sulla resistenza a fatica assiale (a) e flessione rotante (b).

9.4.4. Adesione fibra-matrice

La resistenza a fatica di un composito può essere notevolmente influenzata dalla bontà della adesione fibra-matrice. Ovviamente ciò è vero allorquando la formazione e la propagazione delle cricche di fatica da luogo a fenomeni di debonding più o meno diffusi. Vari studi condotti considerando diversi trattamenti superficiali della fibra finalizzati ad ottenere miglioramenti della adesione hanno confermato l'influenza di questo parametro sulla vita a fatica. Bisogna comunque tenere conto anche delle condizioni ambientali in cui si verifica la sollecitazione di fatica. Per esempio è stato osservato che composti rinforzati con fibre di vetro senza alcun trattamento superficiale esibiscono in ambiente asciutto un comportamento a fatica migliore di quello di fibre trattate. Queste ultime però subiscono una minore riduzione della resistenza in ambiente umido. In altre parole il trattamento superficiale delle fibre è efficace solo in ambiente umido.

9.4.5. Tipo di sollecitazione

La resistenza a fatica, come la resistenza statica di un composito è strettamente legata al tipo di sollecitazione agente. Contrariamente a quanto avviene per i metalli, per i composti non vi è in genere alcuna relazione tra le resistenze a sollecitazioni diverse. In particolare, la resistenza a taglio ed a trazione risultano praticamente indipendenti.

Per alcuni materiali composti, come fibra di vetro in resina epossidica, il rapporto di fatica (rapporto tra resistenza a fatica e resistenza statica) per sollecitazione di taglio è superiore di quello relativo alla trazione. Tale risultato non è però generale. Per esempio, esso si inverte nettamente per fibro-rinforzati in boro o grafite come mostra la seguente fig.10.

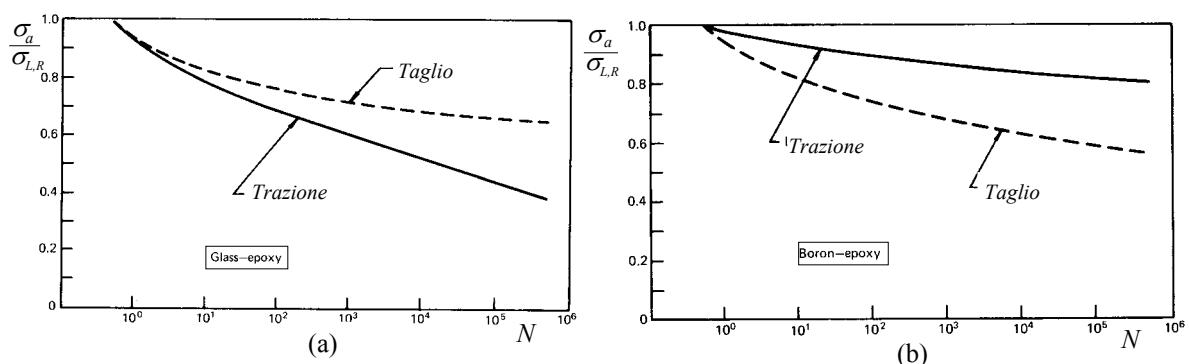


Fig.10 - Influenza del tipo di sollecitazione in composti in fibra di vetro (a) e fibra di boro (b).

Non è possibile pertanto generalizzare i risultati ottenuti per un materiale nemmeno ad altri simili, essendo questi strettamente legati alle peculiari proprietà del materiale, dell'interfaccia ecc.

Per ciascun tipo di sollecitazione non vi sono ancora teorie affermate che consentano di mettere in relazione l'entità della sollecitazione con la corrispondente durata a fatica.

Contrariamente a quanto accade nei materiali tradizionali ove il danneggiamento è progressivo con legge di tipo esponenziale, nei compositi il danneggiamento subito durante la vita è si progressivo ma in genere caratterizzato da distinti momenti e velocità.

Per esempio gli studi eseguiti su compositi in fibra di vetro-resina epossidica hanno mostrato come in presenza di carichi che producono sforzi in direzione trasversale, un notevole danneggiamento, evidenziato da una perdita di rigidezza sino al 30%, si manifesta sin dai primi cicli di vita, cioè prima che sia trascorso il 5% circa della vita del materiale.

9.4.6. Tensione media

Per quanto concerne l'influenza dalla tensione media, l'osservazione sperimentale mostra che per i compositi, limitatamente alla trazione, questa è simile a quanto già noto per i materiali isotropi. In particolare, al crescere della tensione media la tensione alternata cui corrisponde una vita a fatica prefissata decresce sempre e tende a zero quando la tensione media tende alla tensione di rottura del materiale.

Similmente a quanto si fa per gli isotropi, l'influenza della tensione media è rilevata eseguendo delle curve di fatica a tensione media costante. A temperatura ambiente ed in presenza di cicli trazione-trazione ($R>0$) i risultati sperimentali (vedi per esempio fig.11) mostrano la validità di una legge, detta di Goodman-Boller, analoga a quella valida per i materiali metallici, cioè:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_l} + \frac{\sigma_m}{\sigma_R} = 1 \quad (2)$$

Come per i metalli, la (2) è valida tanto per resistenza a vita infinita che a termine. In quest'ultimo caso la tensione limite σ_l rappresenta piuttosto che il limite di fatica, la resistenza a fatica a termine (vita prefissata). La (2) comunque trova in genere un miglior accordo con i dati sperimentali nel campo della vita infinita (vedi fig.11).

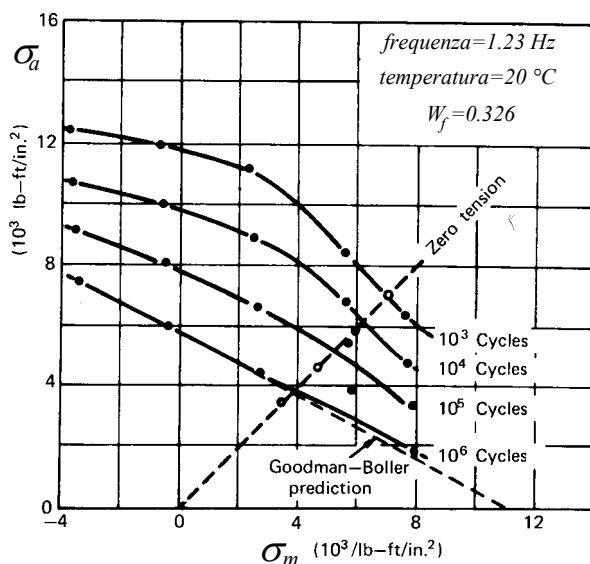


Fig.11 - Influenza della tensione media sulla resistenza a fatica di composito poliestere-fibra di vetro.

La validità della (2) non è però generale. Per esempio per compositi in fibra di carbonio l'esperienza mostra che, contrariamente a quanto accade per i metalli, la presenza di tensioni medie negative determina una più drastica diminuzione della resistenza a fatica specie in presenza di fenomeni di concentrazione delle tensioni. La presenza di una componente media di compressione da luogo in tali materiali a progressivo danneggiamento della matrice con conseguenti fenomeni di *buckling* misti a delaminazione e *splitting* delle fibre. Anche alle elevate temperature la (2) non trova in genere un buon accordo con i risultati sperimentali.

In tutti questi casi per una attendibile valutazione della resistenza e/o della vita a fatica del componente in progetto è necessario disporre di dati sperimentali.

9.4.7. Frequenza di applicazione del carico

A differenza di quanto si verifica per i metalli, un aumento della frequenza di applicazione del carico produce sempre nei compositi un aumento della temperatura ed una conseguente diminuzione della vita a fatica. Gli effetti della frequenza di applicazione del carico sono comunque in genere piuttosto modesti, specie per compositi rinforzati con fibre di vetro. Ciò si giustifica con il fatto che in questi casi la resistenza a fatica è strettamente legata alla resistenza delle fibre che in definitiva è poco sensibile a limitate variazioni (innalzamenti) di temperatura.

9.4.8. Condizioni ambientali

Vari sono i fattori ambientali che possono influenzare la vita a fatica di un materiale composito. Tra questi i più importanti sono la temperatura T , la cui crescita determina sempre un decadimento della resistenza, e la umidità U , che pure da luogo ad una diminuzione della resistenza a fatica.

L'influenza dei fattori ambientali, significativa per compositi in fibra di vetro, è comunque relativamente bassa per compositi in fibra di carbonio, Kevlar e in fibra di boro.

Esistono pochi dati quantitativi sulla influenza delle condizioni ambientali sulla resistenza a fatica e, allo stato attuale, lo studio degli effetti dei parametri ambientali sui compositi è ancora ai primi passi.

9.4.9. Concentrazione delle tensioni

Per molti compositi gli effetti dei fenomeni di concentrazione delle tensioni sulla resistenza a fatica sono esattamente opposti a quelli osservati nei materiali tradizionali. In un materiale metallico la presenza di un intaglio produce in genere limitati effetti sulla resistenza statica ma significative diminuzioni della resistenza a fatica. La situazione sembra invertirsi per i compositi (aventi nella stragrande maggioranza dei casi un comportamento fragile) nei quali la presenza di intagli riduce significativamente la resistenza statica e solo in modo molto limitato quella a fatica. Tale risultato sorprendente è da attribuire essenzialmente ai fenomeni di danneggiamento che un carico variabile induce nel materiale che si trova nella zona di concentrazione delle tensioni. Tale danneggiamento produce un vero e proprio effetto di rilassamento delle tensioni e quindi un incremento della resistenza statica residua dell'elemento. Per esempio la presenza di un foro di 2 mm in un provino di 25 mm di larghezza può produrre una diminuzione del 25-50% della resistenza statica, ma solo trascurabili variazioni della resistenza a fatica. Dopo un certo numero di cicli la resistenza statica dell'elemento può raggiungere valori prossimi a quelli di un elemento privo di intaglio.

9.5. Stima della vita a fatica.

Come precedentemente accennato, contrariamente a quanto accade per i metalli, per i compositi non si hanno attendibili relazioni che possono essere utilizzate in sede di progetto per la stima della vita a fatica di un componente.

Vista la grande quantità di compositi realizzabili (in termini di materiali di fibra e matrice, di

orientamento e numero di lamine ecc.) non è d'altra parte facile avere a disposizione i dati di fatica del composito che si vuole utilizzare.

Per una progettazione accurata quindi, fissate le caratteristiche del laminato che si vuole utilizzare, è necessario, dopo una progettazione di massima del componente, procedere ad una caratterizzazione a fatica di questo possibilmente in condizioni simili a quelle effettive di esercizio. Diverse relazioni empiriche sono state proposte per mettere in relazione vita a fatica con carico e caratteristiche della sollecitazione. Si tratta di relazioni sostanzialmente simili a quelle in uso per materiali isotropi ma che necessitano una apposita determinazione sperimentale delle costanti caratteristiche che intervengono. Tali costanti infatti non sono in genere facilmente correlabili con le altre caratteristiche meccaniche del composito di più facile determinazione (resistenza statica, deformazione a rottura ecc).

Per esempio nella fatica a termine il numero di cicli è legato alla sollecitazione ed alle caratteristiche del materiale da una relazione del tipo:

$$\frac{\Delta S}{\sigma_R} = m \log N + b \quad (3)$$

in cui m e b sono due costanti il cui valore mediamente vale rispettivamente 0.1 ed 1. Tali valori medi però non possono essere applicati a qualunque materiale in quanto i valori effettivi possono subire grandi variazioni relative. E' necessario quindi una indagine sperimentale per una attendibile stima di relazioni empiriche da potersi utilizzare in fase di progettazione.

9.6. Compositi ad elevato modulo

Il comportamento a fatica dei compositi cosiddetti ad elevato modulo Young, quali i compositi in fibra di carbonio (ad elevato modulo), boro e Kevlar, risulta in genere molto diverso dagli usuali compositi in fibre di vetro.

Sperimentalmente si rileva che la resistenza a fatica trasversale di tali materiali è confrontabile con quella dei compositi con fibra di vetro, ma la resistenza a fatica longitudinale risulta di gran lunga più elevata. Tale maggiore resistenza è in gran parte da attribuire alla elevata resistenza di tali materiali agli agenti ambientali e soprattutto alla bassa deformazione a rottura che assicura anche basse deformazioni della matrice (e quindi basso danneggiamento) durante la sollecitazione di fatica.

L'elevata anisotropia delle fibre di carbonio da luogo inoltre ad un singolare comportamento a fatica dei compositi ottenuti con questa fibra. Considerando per esempio un composito unidirezionale in fibra di carbonio (fig.12), l'esperienza mostra che la resistenza a fatica di tali

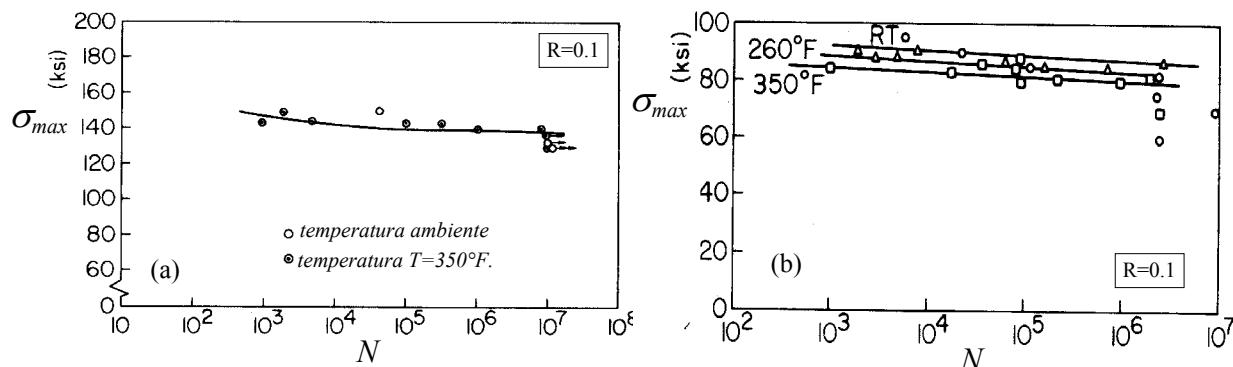


Fig.12 - Curve di fatica di lamina unidirezionale (a) e laminato [0/±45/90] in fibra di carbonio (b).

compositi è pressoché indipendente dal numero di cicli di applicazione del carico, almeno quando questi variano da 1000 a 10 milioni: in questo range la resistenza a fatica è molto prossima alla resistenza statica, spesso addirittura interna allo stesso range di incertezza della resistenza statica. Inoltre, molto importante, tale elevata resistenza rimane pressoché invariata fino a temperature di 350° F (vedi fig.12a).

Poco diversa è la situazione per laminati angle-play in fibra di carbonio: le curve di fatica sono ora leggermente inclinate e lievemente influenzate dalla temperatura di prova (vedi fig.12b).

Come per i compositi in fibra di vetro, la resistenza a fatica dei compositi ad elevato modulo subisce significative variazioni con il tipo di sollecitazione (trazione, compressione, taglio ecc): a compressione è molto più basso che a trazione. Conseguentemente in flessione alternata, contrariamente a quanto accade nei metalli, la resistenza a fatica corrisponde in pratica alla resistenza a compressione.

Anche i compositi unidirezionali in fibre di boro esibiscono un particolare comportamento a fatica: per sollecitazione alternata simmetrica le curve di fatica sono praticamente piatte almeno sino a 10 milioni di cicli ed a temperature sino a 350° F. Le curve assumono invece un andamento decrescente per rapporti di carico R diversi da -1 (vedi fig.13a) e per laminati di vario tipo (vedi fig.13b).

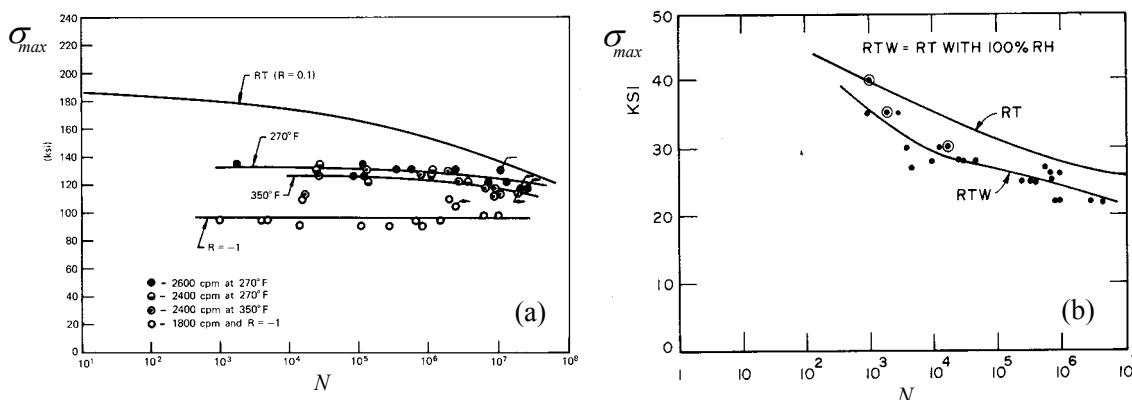


Fig.13- Curve di fatica di lamina unidirezionale (a) e laminato [0/±45/90] fibra di boro-resina epossidica (b).

Anche i compositi in fibra di boro esibiscono una elevata resistenza a fatica: per tensioni sino al 70% della resistenza statica la vita a fatica è praticamente infinita (rapporto di fatica non inferiore a 0.7).

Considerando infine i compositi in Kevlar, è possibile affermare che il loro comportamento a fatica è paragonabile a quello dei compositi in fibra di boro, come mostrato nella seguente figura.

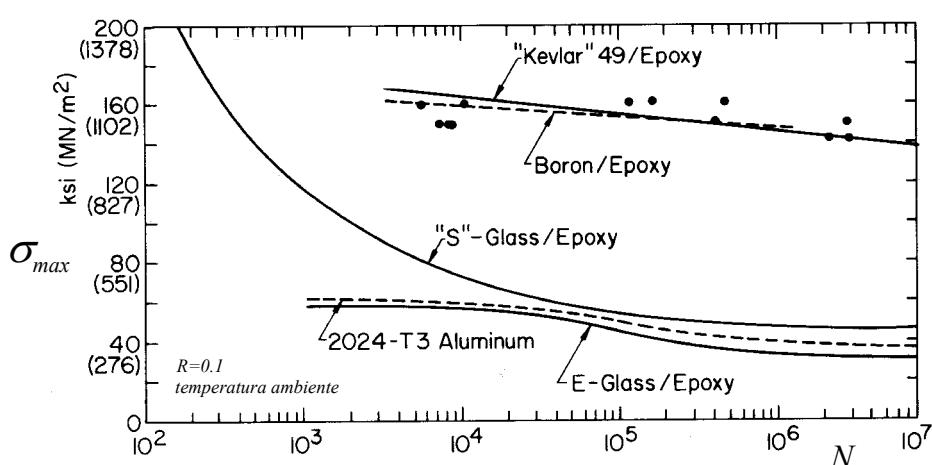


Fig.14- Curve di fatica di varie lamine composite unidirezionali e dell'alluminio.

Dalla fig.14 si vede come la resistenza a fatica dei compositi ad elevato modulo risulta sempre ben superiore a quella dei compositi in fibra di vetro che risulta, in un largo range ($N>10^4$), non molto diversa da quella dell'alluminio (termine di confronto usato frequentemente nella progettazione meccanica).