

11. Resistenza all'urto

11.1. Generalità

Sollecitazioni dinamiche ed urto si verificano facilmente in molte applicazioni ingegneristiche dei materiali strutturali. Secondo una definizione classica si parla di urto allorquando il tempo di applicazione del carico è inferiore al 50% del periodo proprio di vibrazione dell'elemento considerato. In presenza di sollecitazioni dinamiche è noto che il comportamento dei materiali tradizionali differisce significativamente da quello esibito in condizioni quasi-statiche (carico applicato lentamente). Per esempio nei metalli al crescere della velocità di applicazione del carico si verifica un aumento della tensione di rottura e ancor più della tensione di snervamento con conseguente infragilimento del materiale.

Sotto sollecitazioni di urto anche i compositi esibiscono proprietà differenti da quelle stimabili sulla base delle caratteristiche rilevate in condizioni statiche. La caratteristica fondamentale che descrive la resistenza all'urto di un materiale è costituita dalla capacità di assorbire energia prima della rottura sotto sollecitazioni dinamiche.

Il test principe è costituito, almeno per i materiali isotropi, dalla prova Charpy (prova di resilienza) che utilizza un provino percosso, con velocità di 5-7 m/s, da una massa battente terminante con un coltello (vedi fig.1a) ed avente al momento iniziale dell'urto una energia pari a 30 kgm (se si usa una energia diversa al valore di resilienza K va apposto un pedice che indica l'esatto valore di energia di impatto). La stessa prova è pure utilizzata per caratterizzare la resistenza all'urto dei materiali compositi.

Altra prova pure usata è quella di Izod che sostanzialmente differisce da quella Charpy per la diversa configurazione del provino che invece di essere costituito da un elemento appoggiato alle due estremità e caricato in mezzeria, è incastrato ad una estremità e caricato dalla massa battente all'altra estremità (vedi fig.1).

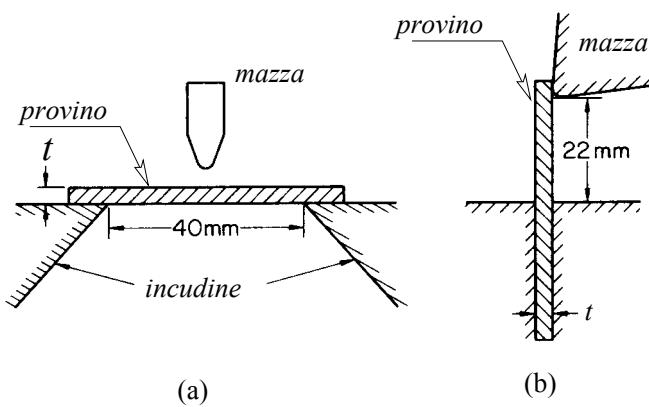


Fig.1 - Setup sperimentale per prova Charpy (a) e prova Izod (b).

Nella caratterizzazione dei compositi i risultati di una prova di impatto sono significativamente influenzati da vari parametri della prova, quali principalmente (1) velocità di impatto, (2) forma e dimensioni dei provini, (3) orientamento delle fibre e sequenza di impacchettamento, (4) resistenza alla delaminazione. Tali parametri vanno pertanto debitamente fissati al fine di rendere confrontabili i risultati.

Per una più completa caratterizzazione del materiale è utile eseguire il rilievo dell'andamento del carico applicato durante il periodo che va dall'inizio dell'impatto sino alla rottura del materiale. E' possibile in questo modo rilevare, oltre che l'energia totale assorbita dal materiale sino alla rottura, l'intimo comportamento del materiale.

A titolo di esempio la fig.2 mostra l'andamento tipico della registrazione del carico applicato in funzione del tempo per una prova di impatto.

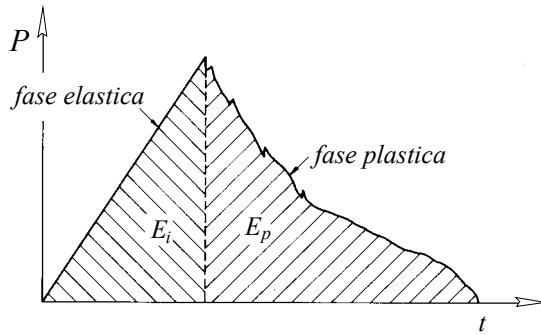


Fig.2 - Tipico andamento della storia di carico durante una prova di impatto.

Ovviamente per potere rilevare la storia temporale del carico è necessario che le macchine di prova sia dotate di idonea strumentazione. Dalla fig.2 si osserva chiaramente la presenza di una fase iniziale con carico crescente in cui si ha l'assorbimento di energia in campo elastico, ed una seconda fase con carico decrescente in cui si ha assorbimento di energia in campo plastico con propagazione della frattura, evidenziata dalle irregolarità del diagramma che invece appare piuttosto rettilineo nella precedente fase elastica. Dall'esame del diagramma è così possibile individuare una energia di impatto E_i associata con la deformazione elastica del materiale ed una seconda energia E_p associata con la deformazione plastica e la propagazione della rottura.

L'analisi della storia temporale consente in pratica di discriminare materiali con comportamento fragile da materiali con comportamento duttile. Un materiale fragile ed uno duttile possono infatti avere la stessa resistenza all'urto, cioè essere caratterizzati dalla stessa energia totale $E_t = E_i + E_p$ assorbita, con la differenza che il materiale fragile presenta una elevata energia E_i ed una bassa energia E_p mentre il materiale duttile presenta una elevata E_p ed una bassa E_i .

In realtà l'area sottesa dalla storia di carico ($P-t$) rappresenta l'impulso e non esattamente l'energia assorbita E_a che in prima approssimazione può essere calcolata moltiplicando l'impulso per la velocità iniziale di impatto nota v_o (5-7 m/s), cioè:

$$E_a = v_o \int P dt \quad (1)$$

Più precisamente l'energia assorbita può essere calcolata considerando la velocità media di impatto $\bar{v} = (v_f + v_o)/2$ che può essere valutata a partire dalla stima della energia assorbita E_a e dal valore della energia iniziale E_o . Da considerazioni energetiche si ottiene:

$$\bar{v} = v_o \left(1 - \frac{E_a}{2E_o}\right) \quad (2)$$

cosicché l'energia effettivamente assorbita E vale:

$$E = \bar{v} \int P dt = v_o \left(1 - \frac{E_a}{2E_o}\right) \int P dt = E_a \left(1 - \frac{E_a}{2E_o}\right) \quad (3)$$

E' questo ultimo il valore utilizzato per la valutazione della resistenza all'urto di un materiale, espressa dalla energia per unità di superficie di rottura.

11.2. Parametri che influenzano la resistenza all'urto dei compositi

Come accennato, la resistenza all'urto dei laminati compositi è significativamente influenzata da vari parametri quali velocità di impatto, dimensione e geometria del componente, che sono parametri generali validi per qualunque materiale, e parametri come orientamento delle fibre e sequenza di impacchettamento, resistenza alla delaminazione ecc, che sono parametri specifici per i materiali compositi.

Per quanto concerne i primi due parametri, è noto che l'energia specifica assorbita e quindi la resistenza all'urto diminuiscono all'aumentare della velocità di impatto ed all'aumentare delle dimensioni. Anche la forma gioca un ruolo essenziale: la resistenza all'urto diminuisce se la variazione di forma produce un aumento della rigidezza del componente.

Per quanto concerne invece l'influenza dell'orientamento delle fibre, le osservazioni sperimentali mostrano che in genere in una prova Charpy la resistenza massima corrisponde ad un orientamento delle fibre di 0° , cioè fibre parallele all'asse del provino, mentre la resistenza minima corrisponde ad un angolo di circa 60° . Per laminati cross-ply la massima resistenza si ha per orientamento delle fibre $0-90^\circ$ mentre la resistenza minima si ha per fibre orientate a $\pm 45^\circ$ (vedi fig.3).

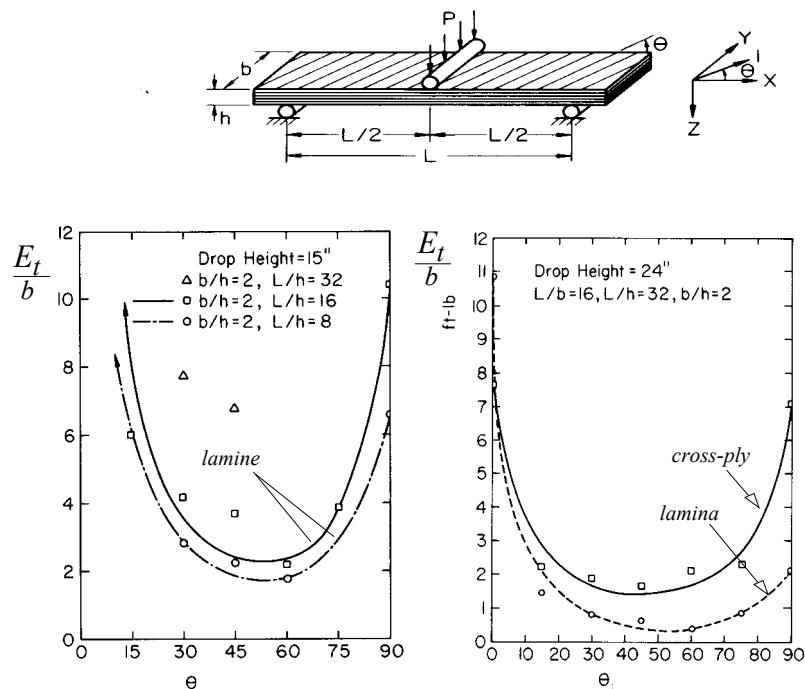


Fig.3 - Resistenza all'urto di compositi in fibra di vetro unidirezionali e cross-ply.

La fig.3° mostra anche come la resistenza all'urto diminuisce al diminuire della lunghezza della trave, cioè all'aumentare della rigidezza di questa. Inoltre in fig.3b è pure confrontata la resistenza dei cross-ply con quella degli unidirezionali: si vede chiaramente come la disposizione cross-ply sia sempre vantaggiosa rispetto a quella unidirezionale con la sola eccezione del caso di orientamento delle fibre allineato con l'asse della flessione.

Per quanto concerne poi l'influenza della resistenza alla delaminazione, cioè della bontà dell'adesione delle lamine, l'osservazione sperimentale mostra in pratica che se il cedimento del laminato avviene per delaminazione un aumento della resistenza statica (a taglio) dell'incollaggio produce solitamente una diminuzione della resistenza all'urto in quanto all'aumentare della bontà dell'adesione si ha in genere un comportamento più fragile e quindi una minore capacità di assorbire energia. In presenza invece di bassa resistenza statica a taglio dell'adesivo, lo scorrimento di questi aumenta l'energia assorbita e quindi la resistenza alla delaminazione in condizioni di urto. Se invece la rottura avviene essenzialmente per rottura delle fibre allora si verifica esattamente il contrario: la

resistenza all'urto aumenta con l'aumentare della resistenza alla delaminazione. Ciò è chiaramente mostrato nelle figure 4a,b in cui sono riportati i risultati relativi ad un composito fibra di vetro-poliestere (a) e fibra di vetro-resina epoxidica (b).

Si osserva in particolare come per *glass-polyester* al crescere della resistenza alla delaminazione, ottenuta con idoneo trattamento superficiale delle lamine, si assiste ad una transizione delle modalità di rottura sotto urto: si va dalla delaminazione alla rottura delle fibre. Conseguentemente al migliorare della adesione tra le lamine la resistenza all'urto prima diminuisce e poi aumenta. Si osservi infine che la resistenza massima è per i due materiali pressoché simile, con la differenza che per *glass-epoxy* questa si ottiene ottimizzando la resistenza alla delaminazione mentre per *glass-polyester* questa corrisponde alla minima resistenza statica dell'incollaggio (facile scorrimento).

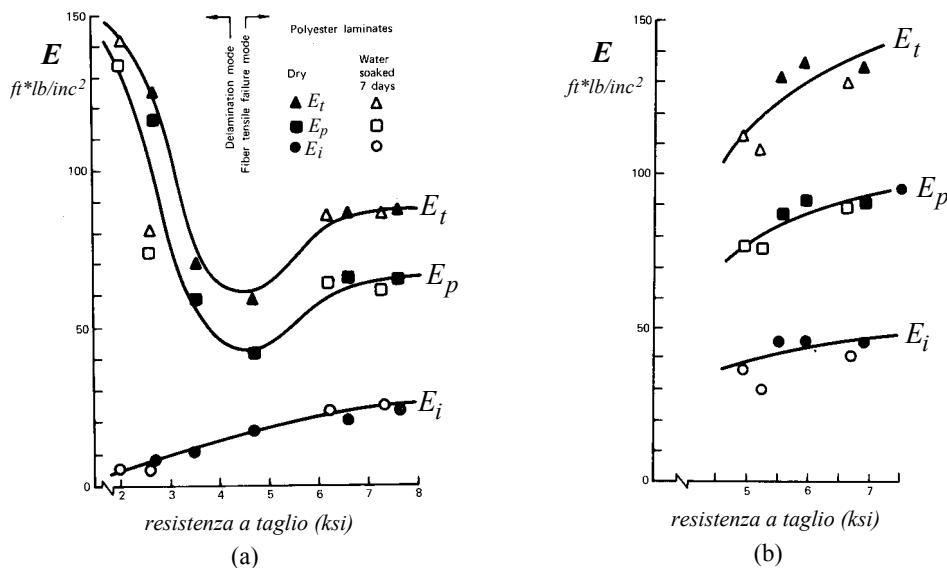


Fig.4 - Resistenza all'urto di compositi glass-polyester (a) e glass-epoxy (b).

11.3. Resistenza all'urto e meccanismi di rottura

La resistenza all'urto di un composito è ovviamente strettamente legata al particolare meccanismo che porta alla rottura dello stesso durante una sollecitazione di urto. Come precedentemente accennato, vari sono i meccanismi di cedimento di un composito che solitamente involgono la rottura della matrice, delle fibre con formazione e propagazione di cricche secondo varie modalità. Nel seguito si esaminano i vari meccanismi di rottura in relazione alla corrispondente energia assorbita.

11.3.1 Rottura delle fibre

Se il cedimento del composito avviene mediante formazione e propagazione di cricche in direzione ortogonale alle fibre, la rottura del materiale involge certamente quella delle fibre. Fibre fragili (anche se resistenti) come le fibre di carbonio, determinano quindi una bassa resistenza all'urto del materiale. L'energia specifica (per unità di superficie) u_f assorbita dalla rottura fragile delle fibre è data da una relazione del tipo:

$$u_f = \frac{V_f \sigma_{f,R}^2 l}{6E_f} \quad (4)$$

con ovvio significato dei simboli (l è la lunghezza delle fibre).

E' importante osservare che sebbene la resistenza statica di un composito è fortemente legata a

quella delle fibre, la resistenza all'urto dipende solo in parte dalla resistenza delle fibre: l'energia assorbita dalla rottura delle fibre è solo una piccola parte della energia totale assorbita ($u_f \ll u_t$). Per aumentare la resistenza all'urto del composito è pertanto bene aumentare ove possibile la duttilità delle fibre. Occorre comunque tenere presente che il comportamento e la resistenza delle fibre influenza sempre le modalità di rottura del composito e quindi (indirettamente) la capacità di assorbire energia.

11.3.2 Plasticizzazione e rottura della matrice

Se la matrice ha un comportamento fragile, come avviene per esempio per resine termoindurenti come resina epossidica e poliestere, il contributo di questa all'energia totale assorbita è piccolo. Se la matrice ha un comportamento elasto-plastico il contributo può divenire invece significativo. Il contributo maggiore è sempre legato alla plasticità essendo sempre piuttosto limitato il contributo legato alla formazione e propagazione delle cricche di frattura a meno che queste abbiano una spiccata tendenza a moltiplicarsi mediante diramazioni multiple. Similmente a quanto succede quindi per i materiali isotropi, per migliorare la capacità di assorbire energia, e quindi la capacità di sopportare urti, è necessario aumentare la duttilità del materiale piuttosto che la resistenza meccanica statica.

11.3.3 Sfilamento delle fibre (pull-out)

Questo fenomeno avviene solitamente in presenza di fibre fragili immerse in matrici molto resistenti. Lo sfilamento segue la rottura iniziale delle fibre che avviene in corrispondenza della sezione più debole. La rottura delle fibre provoca ovviamente un fenomeno di concentrazione delle tensioni che in definitiva si può evolvere con la formazione di una cricca nella matrice che può crescere in direzione ortogonale al carico o lungo l'interfaccia della matrice a seconda della maggiore o minore resistenza al debonding e della matrice. Se la matrice è molto resistente la rottura produce lo sfilamento della fibra. Lo sfilamento delle fibre non è però da confondere con il *debonding* che avviene allorquando le cricche presenti nella matrice non sono in grado di produrre la rottura cosicché finiscono col propagarsi in direzione parallela alle fibre stesse.

Nella ipotesi di fibre aventi lunghezza l_c e che lo sfilamento interessi spezzoni lunghi $l_c/4$ l'energia di pull-out, cioè l'energia dissipata durante lo sfilamento, è data dalla seguente espressione:

$$u_{\text{pull-out}} = \frac{V_f \sigma_{f,R} l_c}{12} \quad (5)$$

11.3.4 Delaminazione

La delaminazione di un laminato è in genere il risultato della propagazione delle cricche intralaminari che, giunte sulla superficie della lamina non sono in grado di propagarsi sulla lamina adiacente per via del diverso orientamento delle fibre; esse quindi si propagano lungo l'interfaccia dando luogo ad un processo di delaminazione progressivo. In presenza di sollecitazioni dinamiche la delaminazione è un fenomeno caratteristico di sollecitazioni flessionali come avviene per esempio nella prova Charpy e Izod.

Per quanto concerne il legame tra resistenza all'urto e resistenza alla delaminazione (adesione delle lamine) si è già osservato come la prima in genere aumenta al diminuire della seconda. Dovendo quindi progettare un materiale che debba avere una buona resistenza statica ma anche una buona resistenza all'urto è necessario realizzare un compromesso tra elevata resistenza alla delaminazione ed all'urto. Per esempio per aumentare la resistenza all'urto dei compositi in fibra ad elevato modulo (carbonio e boro in particolare, caratterizzati da bassa deformazione a rottura) si aggiunge una

percentuale di fibre di vetro caratterizzate da una maggiore deformazione a rottura e quindi da una maggiore capacità di assorbimento di energia. Si ottengono così i cosiddetti compositi ibridi.

11.3.5 Compositi ibridi

Come accennato al paragrafo precedente, al fine di aumentare la resistenza all'urto dei compositi ad elevato modulo, in particolare dei compositi in fibra di carbonio, si introduce appositamente in questi una certa percentuale di fibre di vetro caratterizzate da una maggiore duttilità a rottura (capacità di assorbire energia) ottenendo così i cosiddetti compositi ibridi (o semplicemente ibridi).

In particolare questi possono essere ottenuti in due modi distinti: 1) miscelando alle fibre di carbonio una certa percentuale di fibre di vetro (solitamente pari al 10-20%) durante il processo di produzione delle lamine unidirezionali, oppure (2) accoppiando insieme lamine in fibra di vetro con lamine in fibra di carbonio in modo da ottenere un laminato ibrido. La prima modalità è più complicata per via delle difficoltà di ottenere una distribuzione uniforme delle fibre di vetro nella lamina. La seconda modalità di fatto è quella più seguita (laminati ibridi).

L'aggiunta di una percentuale pari al 10-20% di fibre di vetro ad un composito in fibre di carboni consente mediante di raddoppiare la resistenza all'impatto, mentre l'aggiunta di una percentuale intorno al 40% permette addirittura di quintuplicare tale resistenza come mostra la figura seguente riportante dati sperimentali ottenuti al variare della percentuale di fibre di vetro aggiunte ad un composito in fibra di carbonio.

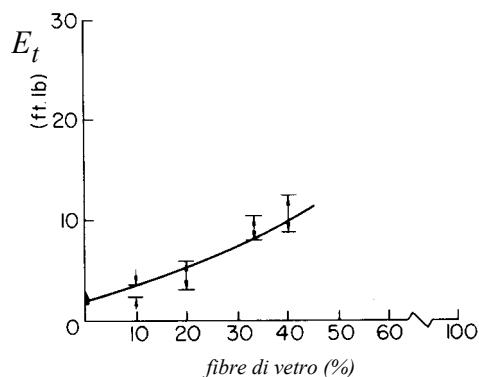


Fig.5 - Resistenza all'urto di compositi ibridi in fibra di carbonio con aggiunta di fibre di vetro.

In alcuni casi oltre che fibre di vetro si aggiungono anche percentuali di Kevlar che è una fibra caratterizzata da una elevata energia di propagazione della frattura.

Per quanto concerne gli effetti della sequenza di impacchettamento dei laminati ibridi, l'esperienza mostra che i migliori risultati (massima energia assorbita) si realizzano disponendo le lamine "più duttili" (fibra di vetro o Kevlar) all'interno e confinando quelle più fragili all'esterno.