

Accounting for Successive Ply Failure in Composite Laminates

Benoît Bidaine, Sandra Cherubini - e-Xstream engineering
Salvatore Russo - Alenia Aermacchi

Challenge: Improve Composite Design Thanks to Better Failure Understanding

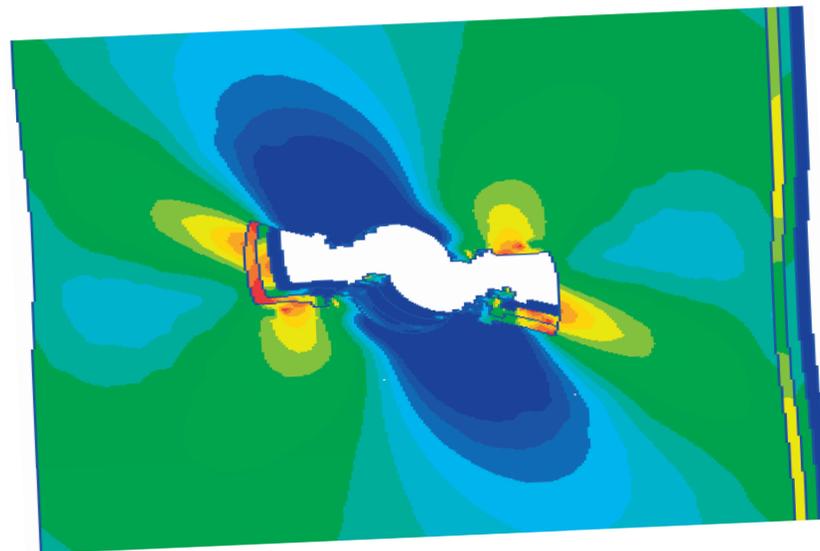
Continuous fiber composites are much more complex than metal, with respect to failure in particular. If they are so-called unidirectional (UD), they involve stacks of several plies, each ply being characterized by a single fiber orientation. Hence they fail because of various mechanisms taking place at the ply level (matrix cracking, fiber breakage, fiber-matrix debonding) or between the plies (delamination). These mechanisms remain not fully understood and are investigated through experimental and virtual testing. This complexity is usually not captured by simulation so that

UD composite material properties are currently obtained only from physical testing, requiring high investments in time and

money. Alenia Aermacchi, as a leader in the aerospace industry, faces these issues and has successfully applied a progressive

failure model to the simulation of an open-hole tensile test on a carbon-epoxy composite.

This progressive failure model is implemented in Digimat, the composite material modeling platform developed by e-Xstream Engineering since 10 years.




Considerare il cedimento successivo delle lamine nei laminati compositi

Benoît Bidaine, Sandra Cherubini - e-Xstream engineering
Salvatore Russo - Alenia Aermacchi

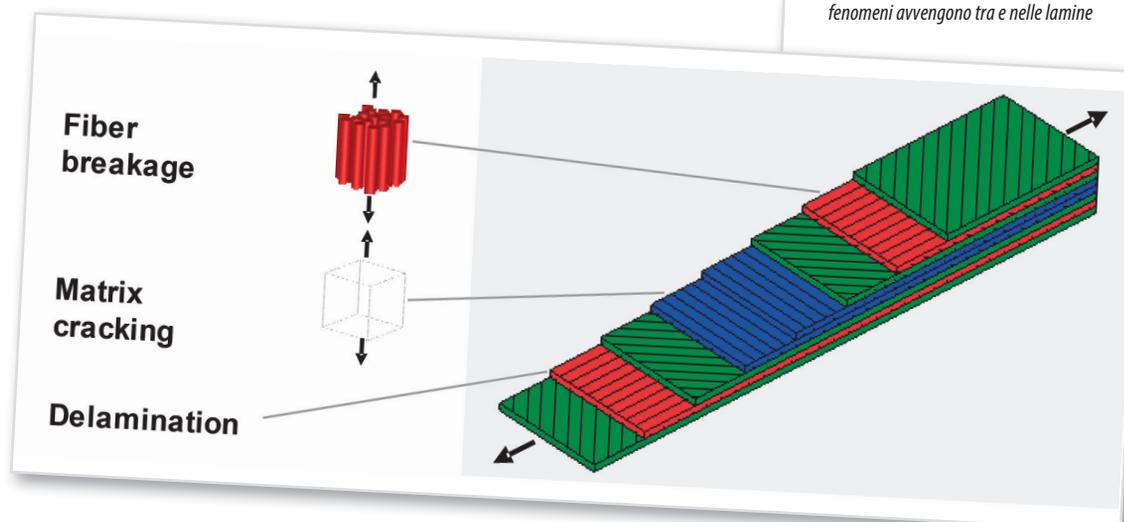
La sfida: migliorare la progettazione dei compositi grazie a una migliore comprensione del processo di degradazione

I compositi a fibra continua sono materiali molto più complessi del metallo in particolare per quanto riguarda il loro cedimento. Se sono unidirezionali (UD), implicano la presenza di molteplici lamine sovrapposte e caratterizzate da specifici orientamenti di fibra. Il cedimento avviene a causa di vari meccanismi che hanno luogo a livello della lamina (frattura della matrice, rottura della fibra, distacco fibramatrice) oppure fra le lamine

(delaminazione). Questi meccanismi rimangono ancora non del

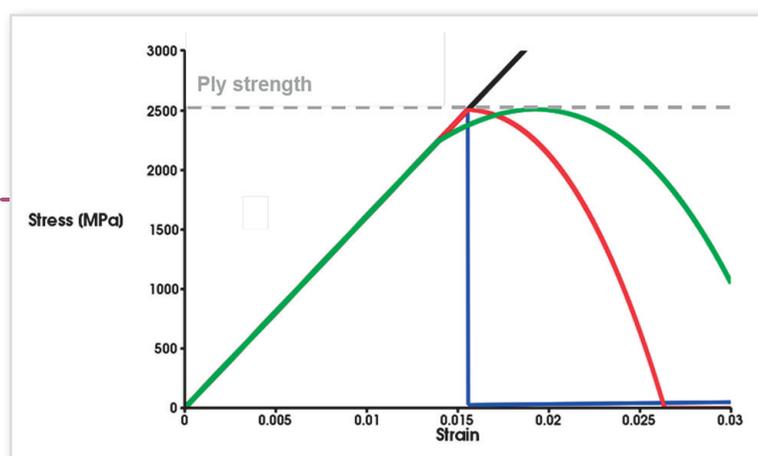
tutto compresi e sono oggetto di approfondite ricerche e analisi virtuali.

Failure of UD laminate under tensile loading. Various mechanisms occur in and between plies. Cedimento di un laminato UD in trazione. Diversi fenomeni avvengono tra e nelle lamine



Solution: Simulate Successive Ply Failure Through Stiffness Degradation

To accurately predict the properties of UD composites, Digimat advantageously combines micromechanics, deriving composite properties from constituent properties through mean-field homogenization, and progressive failure. At the constituent ply level, Digimat is employed to define and reverse-engineer the matrix – e.g. epoxy – and fiber – e.g. carbon – stiffnesses. These properties are combined depending on the fiber volume fraction to predict different composite stiffnesses in different directions with respect to the fiber orientation, accounting for the composite anisotropy. At the ply level, Digimat uses a Hashin failure criterion to compute damages in matrix and fiber constituents. Several combinations of composite stresses and strengths are monitored and used to declare failure in tension or compression, along or transverse to the fiber direction, once they reach a critical value. In addition, Digimat enables a stiffness degradation according to the Matzenmiller-Lubliner-Taylor model. Once one combination of stresses and strengths reaches a critical value, the stiffness in the corresponding direction is reduced according to a chosen damage law. Such a damage law can represent a brittle failure behavior (instantaneous degradation) or a nonlinear stress evolution such as the one observed in shear tests.



Stiffness degradation according to different damage laws for Matzenmiller-Lubliner-Taylor model. For a given loading, the stress at a material point increases linearly until its combination with material strengths reaches a critical value. Then it continues to increase nonlinearly or decreases either abruptly or progressively

Perdita progressiva della rigidità in base a differenti meccanismi di danneggiamento secondo il modello Matzenmiller-Lubliner-Taylor. Dato un certo carico, la sollecitazione in un punto del materiale aumenta in modo lineare fino a quando la sua combinazione con la resistenza raggiunge un valore critico. Poi continua ad aumentare in modo non-lineare o a decrescere, improvvisamente o per gradi



Non essendo tale complessità normalmente evidenziabile a livello della simulazione, le proprietà del materiale composito vengono definite allo stato attuale soltanto mediante test reali che richiedono notevoli investimenti in termini di tempo e di denaro. Alenia Aermacchi, leader nell'ambito dell'industria aerospaziale, ha affrontato queste tematiche e ha applicato con successo un modello di danneggiamento progressivo nella simulazione di un test di trazione open-hole di una resina epossidica rinforzata con



Digimat works from appropriate input gathered within material models according to a well-established workflow. A first material model represents the nominal material behavior: it involves nominal constituent properties obtained from datasheets. As a given batch of composite material does not behave nominally, a second material model is built from the calibration of constituent properties on measured lamina properties, usually obtained from tension / compression tests on 0°/90° coupons. Such calibration can also provide access to material data not available from datasheets or measurements. A last material model completes the input about progressive failure: the appropriate damage law is chosen depending on the targeted application. Digimat is then coupled to a finite

element solver to provide the solver with the material properties. Such coupled analyses can be run for implicit or explicit solvers, both available within MSC Nastran for instance. With information given by the FE solver, such as strain increments, the software calculates stress increments according to models. Taking into account the specific requirements of test standards and the systematic collection of experimental data, it enables a high level of automation for the purpose of computing material properties.

Benefits: Virtualize Coupon Tests

At Alenia Aermacchi, we have applied Digimat's progressive failure to the simulation of a quasi-isotropic open-hole tensile test. We are manufacturing aerospace parts from various

fibres di carbonio. Questo modello di danneggiamento progressivo è implementato in Digimat, la piattaforma di modellazione di materiali compositi, sviluppata ormai da oltre dieci anni da e-Xstream Engineering.

Soluzione: simulare il progressivo cedimento laminare mediante perdita della rigidità

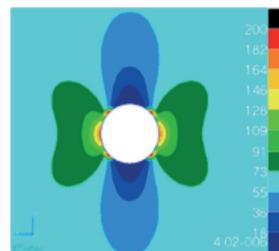
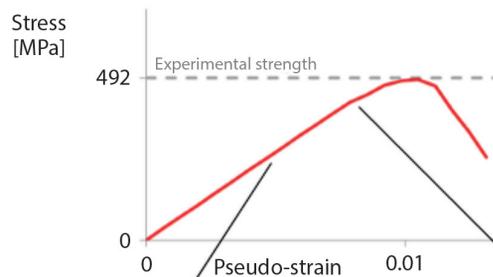
Per predire accuratamente le proprietà dei compositi UD, il software combina sinergicamente la micromeccanica, e il concetto di cedimento progressivo, derivando le proprietà dei compositi dalle caratteristiche delle fasi costituenti tramite omogenizzazione mean-field. A livello dei costituenti è impiegato per definire e ottenere le proprietà della matrice (per esempio epossidica), tramite reverse-engineering, e della fibra (es: carbonio). Queste

proprietà vengono combinate in base alla frazione volumetrica di fibre per prevedere i differenti gradi di rigidità del composito in varie direzioni in relazione all'orientamento delle fibre per rappresentare l'anisotropia del composito. A livello della lamina, Digimat usa il criterio di Hashin per calcolare il danno nella matrice e nelle fibre. Diverse combinazioni di sforzi e resistenza del composito vengono valutate per determinare il cedimento a trazione o compressione, longitudinalmente o trasversalmente alla fibra, una volta raggiunto il valore critico. Inoltre, Digimat permette una degradazione della rigidità secondo il modello di Matzenmiller-Lubliner-Taylor. Una volta che una combinazione di sollecitazioni e di resistenza hanno raggiunto un valore critico, la rigidità nella direzione corrispondente viene ridotta in

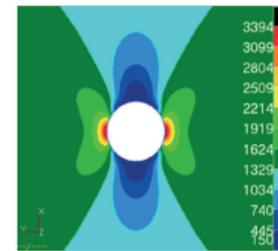
Simulated stress-strain curve for a quasi-isotropic open hole tensile test. Progressive failure enables the stress-strain curve to effectively reach a strength comparable to the experimental one as it accounts for the failure sequence. This sequence first involves damage initiation in 90° plies at around 0.4% strain, when the maximum principal stresses in these plies cause the failure criterion to reach a critical value on the edges of the hole. It ends with ultimate failure after damage initiation in the 0° plies at around 0.8% strain, when the maximum principal stresses in this second family of plies trigger the failure indicator near the hole

Curva sforzo-deformazione simulata per un test di trazione open-hole quasi-isotropo. Il cedimento progressivo permette alla curva sforzo-deformazione di raggiungere effettivamente una resistenza comparabile a quella sperimentale visto che prende in conto la sequenza di cedimento. Questa sequenza, in primo luogo prevede l'inizio del processo di danneggiamento nelle lamine a 90° per una deformazione di circa 0,4%, quando gli sforzi principali massimi della lamina fanno sì che si raggiunga un valore critico ai margini del foro.

La conclusione è il deterioramento finale a seguito dell'insorgere del fenomeno di danneggiamento nelle lamine a 0° e a circa lo 0,8% di deformazione, quando gli sforzi principali massimi del secondo gruppo di lamine attivano l'indicatore in prossimità del foro



Maximum principal stress in 90° plies



Maximum principal stress in 0° plies

composites among which a Cytec material made of 57% of carbon and epoxy. Hence we routinely collect experimental measurements on this material for the purpose of defining allowables not to be exceeded in structural simulations. Such allowables involve various structural characteristics and loadings, such as open-hole tension (according to the ASTM standard D5766), as well as layups, such as [45/0/-45/90]2s called quasi-isotropic. To assess the possible

replacement of the corresponding measured allowables by simulated ones, we performed finite element analyses with MSC Nastran SOL400, using shell coupon models typically counting 3500 elements and 16 layers. Prior to using Digimat, we were inferring coupon failure from failure indicators. Our modeling approaches were not involving any material degradation and we were interpreting coupon failure from the monitoring of failure indicators in a predefined

proportion of elements around the hole. Even if such simulation reveals pragmatic, it becomes less and less realistic when the load increases as some parts of the coupon are not sustaining load anymore in reality while others are actually submitted to larger stresses.

Digmat's progressive failure enabled Alenia to account for the ply failure sequence. This sequence involves first damage initiation in 90° plies, then in 0° plies. It yields a stress-strain

response whose maximum reaches the experimental tensile strength. The pattern of maximum principal stresses is different between transverse and longitudinal oriented plies. Damage evolves following the increase of the load and material stiffness is reduced accordingly from one time step to the other.

Outlook

The use of progressive failure modeling has proven to be very effective in capturing the actual

base alla legge di danneggiamento prescelta. Questa legge può rappresentare un tipo di cedimento da fragilità (cedimento istantaneo) oppure un'evoluzione della sollecitazione non lineare come quella osservata nei test di taglio.

Il software opera partendo da input appropriati ricavati all'interno di modelli materiali, in base a un flusso di lavoro ben prestabilito. Un primo modello materiale rappresenta il comportamento nominale del materiale: include proprietà nominali dei costituenti ottenute da datasheets forniti dal produttore. Poiché un dato batch di materiale composito non dà una risposta nominale, viene creato un secondo modello materiale partendo dalla calibrazione delle proprietà dei costituenti sulla base delle misurazioni del laminato,

generalmente ottenute da test di trazione/compressione a 0°/90°. Questa calibrazione può anche dare accesso a dati del materiale non disponibili attraverso datasheets o misurazioni. Un ultimo modello materiale completa l'input per il cedimento progressivo: si seleziona una legge di danneggiamento adeguata in base all'applicazione di interesse.

Il software viene quindi abbinato a un solutore a elementi finiti per fornire le proprietà del materiale. Questa analisi accoppiata può essere condotta per analisi implicite o esplicite, entrambe disponibili, ad esempio, in MSC Nastran. Con le informazioni fornite dal codice FE, per esempio gli incrementi di deformazione, il software calcola gli incrementi dello sforzo in base al modello materiale. Tenendo

conto dei requisiti specifici delle normative sui test e la raccolta sistemica dei dati sperimentali, Digimat consente un grado elevato di automazione per calcolare adeguatamente le proprietà del materiale.

Vantaggi: test virtuali sui campioni

Ad Alenia Aermacchi, il cedimento progressivo Digimat è stato applicato per la simulazione di un test di trazione open-hole quasi-isotropo. È in corso la produzione di componenti aerospaziali con vari compositi fra cui un materiale Cytec realizzato in resina epossidica con il 57% di fibra di carbonio. Da questa fase si è iniziato a raccogliere sistematicamente i dati di misura sperimentali su questo materiale al fine di definire i

valori soglia da non superare nelle simulazioni strutturali. Questi dati soglia coinvolgono varie caratteristiche strutturali e carichi, come il test di trazione open-hole (secondo la normativa ASTM D5766), e dei layup [45/0-45/90]2s quasi-isotropi. Per valutare la possibile sostituzione dei valori di soglia misurati con quelli simulati, sono state compiute analisi degli elementi finiti con MSC Nastran SOL400, utilizzando modelli a guscio che consistono di 3500 elementi e 16 strati. Prima di utilizzare questo software, si presupponeva il cedimento dei campioni dagli indicatori di cedimento. Le tecniche di modellazione non comprendevano nessuna degradazione del materiale e il cedimento del campione è stato interpretato monitorando gli indicatori di cedimento in una





end behavior of continuous fiber composite laminate failure. The use of multi-scale micromechanical material modeling has proven to enhance the predictions of the stiffness of composites and provides micro-per phase level material responses. Such responses are available for the definition of microscopic damage – degrading directly constituent properties instead of ply properties – currently under development.

Hence they pave the way for a reduction in experimental testing in favor of virtual testing. Such testing will involve other tests, such as open-hole compression, filled-hole tension, bearing or impact. It will account for the variability of material properties, related to the uncertainty on actual fiber orientation or volume fraction among others. It will represent delamination, an important failure mechanism for tests involving compression. It will foster the development of new materials as compounds of constituents of different composites identified as adequate for a given application thanks to virtual characterization.

quantità predefinita di elementi attorno al foro. Anche se questa simulazione è pragmatica, diventa sempre meno realistica quando il carico aumenta e certe parti del campione non sostengono più il carico, mentre altre sono soggette effettivamente a sollecitazioni superiori.

Il cedimento progressivo di Digimat ha permesso ad Alenia di spiegare la sequenza del cedimento delle lamine. Questa sequenza prevede una fase iniziale nelle lamine a 90° e poi in quelle a 0°. Essa fornisce una risposta sforzo-deformazione con un massimo comparabile alla resistenza a trazione sperimentale. La distribuzione degli sforzi massimi principali è diversa fra le lamine orientate in direzione trasversale e longitudinale. Il danneggiamento evolve in seguito all'aumento del carico e la rigidità del materiale si reduce in maniera congrua ad ogni intervallo di seguente.

Prospettive

L'utilizzo della modellizzazione del cedimento progressivo si è dimostrata molto efficace nel registrare la reale risposta finale del cedimento del laminato composito a fibra continua.

L'utilizzo della modellizzazione micromeccanica multiscala del materiale ha dimostrato di rafforzare le previsioni della rigidità dei compositi fornendo la risposta micro/per-fase del materiale.

Questi risultati permettono la definizione del danneggiamento microscopico, degradando direttamente le proprietà dei costituenti invece di quelle della lamina, attualmente in fase di sviluppo. Quanto fatto pone le basi per ridurre i test sperimentali a favore dei test virtuali.

Questi test coinvolgeranno altri test, quali la compressione open-hole, la trazione filled-hole, bearing o impatto, rappresentando la variabilità delle proprietà del material in relazione all'incertezza dell'effettivo orientamento della fibra o frazione di volume.

I test virtuali riprodurranno la delaminazione, un importante meccanismo di cedimento per i test che prevedono la compressione, ciò sarà di incentivo per lo sviluppo di nuovi materiali come composti di costituenti di compositi differenti selezionati per determinate applicazioni grazie alla caratterizzazione virtuale.