



Virtual allowables for accelerated insertion of composites



Philippe Hebert, Product Manager, e-Xstream engineering



Introduction

Continuous fiber reinforced polymers offer a unique combination of mechanical properties and density, allowing substantial weight saving in structural applications compared to metal based solutions. However compared to metals, composites also offer a much increased complexity and significantly higher characterization cost - which hinder their adoption.

At the first step of the building block approach, a composite material must be characterized through numerous laminate tests, covering several coupon types (unnotched tension/compression, open-hole tension/compression...), several layups

and several conditions. Due to the inherent variability of composite mechanical behavior, each test configuration must be repeated many times in order to obtain proper statistical evaluations of the laminate strength, the composite allowables.

This process is heavily time and money consuming. For this reason, e-Xstream engineering has decided to develop Digimat-VA, a numerical solution to complement and help with composite allowables generation. Thanks to advanced multiscale models involving progressive failure and non-linear finite element analysis, it can efficiently simulate coupon testing with high accuracy.

As an example of application, let's consider the AS4/8552 carbon epoxy UD tape, for which mean strength and B-basis will be predicted for six configurations: unnotched and open-hole tension across three different layups.

Application

The general workflow for virtual allowables generation is the following. A multiscale material model for the composite ply must be created based on

experimental lamina data. Then variability of each micro-level parameter of the material model has to be identified. Once the material model including variability is ready, then finite element analysis of the coupons must be generated and run. Each of these steps are described below.

Material model identification

Based on the ply nominal or mean properties, the nominal material model is calibrated. The ply properties of AS4/8552 used

Property	Unit	Value	Fiber VF
E1t	MPa	1.28E+05	0.5956
F1t	MPa	1.99E+03	0.5956
E2t	MPa	9.24E+03	0.6148
F2t	MPa	6.39E+01	0.5872
nu12t		0.302	0.5956
F1c	MPa	1.39E+03	0.6176
E2c	MPa	9.86E+03	0.5992
F2c	MPa	2.68E+02	0.6148
G12	MPa	4.83E+03	0.5885
F12-5%	MPa	9.16E+01	0.5885
F12-0.2% offset	MPa	5.52E+01	0.5885
Matrix E	MPa	4.67E+03	
Matrix nu12		0.35	

Tab. 1 - Material properties used for the AS4/8552
Proprietà materiali usate per AS4/8552

denaro e molto tempo. Per questo motivo e-Xstream engineering ha deciso di sviluppare Digimat-VA, una soluzione numerica che completa e agevola la produzione dei modelli compositi. Grazie a modelli multiscala avanzati che includono il cedimento progressivo e l'analisi non-lineare degli elementi finiti, è possibile simulare efficacemente e accuratamente il test del provino.

Un esempio di applicazione è il tape UD carbonio-epossidica AS4/8552, per il quale è possibile prevedere resistenza media e B-basis per sei configurazioni: due tipi di test (unnotched and open-hole tension) per tre differenti layups.

Applicazione

La procedura per la produzione dei modelli virtuali è la seguente:

Modellazione virtuale per velocizzare l'utilizzo dei compositi

Philippe Hebert, Product Manager, e-Xstream engineering

Introduzione

I polimeri rinforzati a fibra continua offrono una combinazione unica di proprietà meccaniche e densità, permettendo di ottenere una riduzione sostanziale di peso nell'ambito delle applicazioni strutturali rispetto a quelle basate sull'utilizzo del metallo. Tuttavia, rispetto ai metalli, i compositi implicano anche una complessità superiore e costi di caratterizzazione maggiori, ostacolando l'utilizzo del materiale stesso.

Nella prima fase dell'intero programma di caratterizzazione del

materiale (Building Block approach) vanno eseguiti numerosi test sul laminato, in differenti condizioni operative e su diverse tipologie di provini (unnotched tension/compression, open-hole tension/compression) e vari layup. A causa della variabilità intrinseca della risposta meccanica del composito, ogni configurazione del test deve essere ripetuta molte volte al fine di ottenere le valutazioni statistiche adeguate della resistenza del laminato, gli ammissibili del composito.

Questo processo richiede molto

in the current application are detailed in Tab. 1.

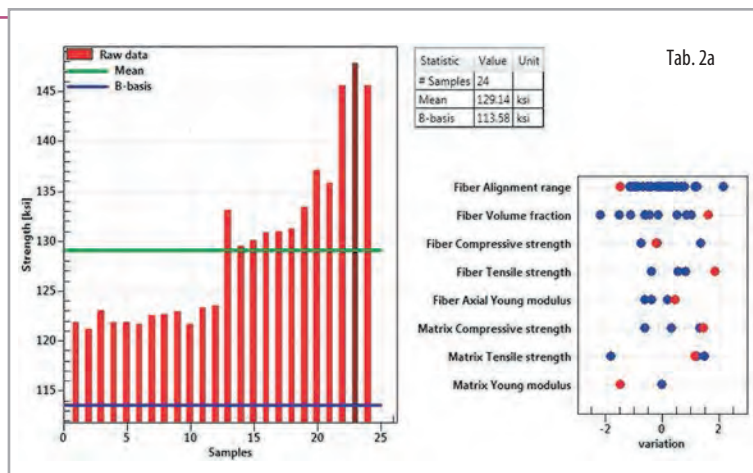
Once nominal material model is available, the next step consists in identifying the constituent, process and testing variability. This information can be available to engineers based on their in-house knowledge of material and process. In case the information is not available, variability can be reverse engineered based on a few assumptions. In the current exercise, it is assumed that all variable parameters can be modeled as a normal random variable. It is also assumed that variability of 90° ply strength is arising from matrix stiffness and strength, while 0° ply strength variability is explained by fiber related parameters such as stiffness, strength and volume fraction (Tab. 2).

30 iterations of lamina test simulations were conducted for both 0° and 90° stackings to predict B-basis values. Values of coefficients of variation for all microlevel parameters were iterated until lamina B-basis or CV could be reproduced.

The identified coefficients of variation and standard deviations are detailed in Tab. 2.

Parameter	Value
Matrix Young (CV)	10%
Matrix Strength (CV)	10%
Fiber Axial Young (CV)	5%
Fiber Strength (CV)	5%
Fiber Volume Fraction (CV)	5%
Fiber Alignment (Std dev)	1°

Tab. 2 - Variability values
Valori delle variabili



un modello multiscala per la ply in composito deve essere creato in base ai dati sperimentali della lamina, quindi deve essere individuata la variabilità di ogni parametro micromeccanico del modello. Una volta pronto il modello, compresa la variabilità, viene condotta l'analisi agli elementi finiti dei provini. Tutti questi passaggi sono descritti di seguito.

Identificazione del materiale modello

In base alle caratteristiche nominali della ply o alle sue proprietà medie, viene calibrato il modello di materiale nominale. Le proprietà

Test	Experimental Mean Strength (MPa)	Exp B-basis	Digmat Mean Strength (MPa)	Error	Digmat B-basis (MPa)	Error
Lamina - 0	1923.6	1723.7	1939.8	0.84%	1774.6	2.95%
Lamina - 90	63.9	51.8	65.1	1.80%	55.5	7.22

Tab. 3 - Lamina B-basis computation
Calcolo B-basis della lamina

FEA model

Six different tests are considered: unnotched tension and open-hole tension, for quasi-isotropic layup definition [45/-45/0/90]2s (layup 1), soft definition [45/-45/0/45/-45/90/45/-45/45/-45]s (layup 2) and hard definition [0/45/0/90/0/-45/0/45/0/-45]s (layup 3).

The layup sequence is represented via a discrete layer modeling approach, using solid reduced integration elements and one element in the ply thickness. Since the layup is symmetric, only half of the coupon is modeled explicitly thanks a symmetry boundary condition at mid-thickness.

Thirty iterations of each coupon test were decided.

In total, 180 simulated were thus prepared, each of them using a different series of constituent properties, fiber volume fraction and fiber alignment,

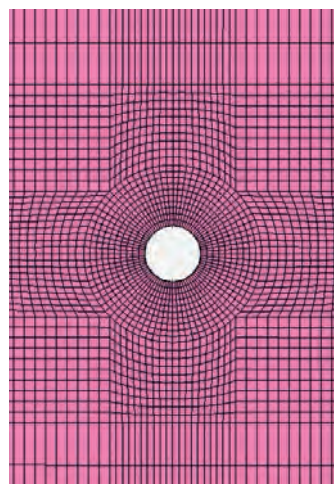


Fig. 1 - Mesh used for the notched coupons
Mesh usata per i provini forati

defined as the draw of the corresponding normal variable, identified in the Digimat model section.

Run time of an unnotched tensile test typically took 90 seconds, while an open-hole case, requiring higher mesh refinement, took in average 1500 seconds on 1 single CPU.

Virtual allowables

Following the run of the 180 simulations, the new software automatically extracted the stress-strain curves from the simulation results. Maximum stress

for each curve was identified as the coupon strength. From all strength values collected for a given coupon test, statistics could then be applied by the software to evaluate mean strength and B-basis.

As an example, raw stress-strain curves generated for open-hole quasi-isotropic configuration are shown in fig. 2.

After computation of the thirty repetitions for each configuration, mean strength and B-basis values were computed using the methodology defined in MIL-HD-BK. Values are reported in Table 4.

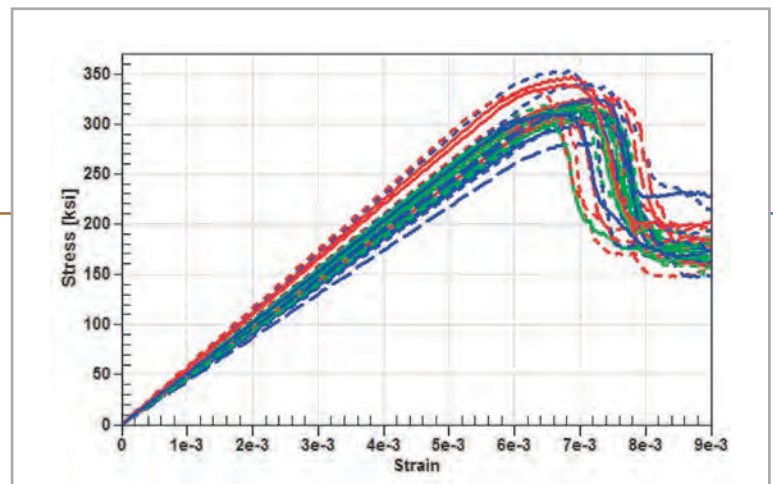


Fig. 2 - Stress-strain curve predictions of thirty quasi-isotropic open-hole tensile tests
Calcolo della curva sforzo-deformazione dei 30 test della tensione open-hole per layup quasi isotropo

della ply di AS4/8552 utilizzate in questa applicazione sono descritte dettagliatamente in Tab. 1.

Quando il modello nominale del materiale è disponibile, il passo successivo consiste nell'individuare gli elementi costitutivi, la variabilità del processo e del test. Questa informazione può essere disponibile agli ingegneri in base ai dati in loro possesso del materiale e del processo. Se l'informazione non è disponibile, la variabilità può essere ottenuta tramite reverse engineering basandosi su alcune ipotesi. In tale caso, si assume che tutti i parametri di variabilità siano modellati come variabili random normali. Si assume inoltre che la variabilità della resistenza della ply a 90° derivi dalla rigidità e resistenza della matrice, mentre la

variabilità della ply a 0°, si spiega con parametri correlati alla fibra, come la rigidità, la resistenza e la frazione di volume. (Tab. 2).

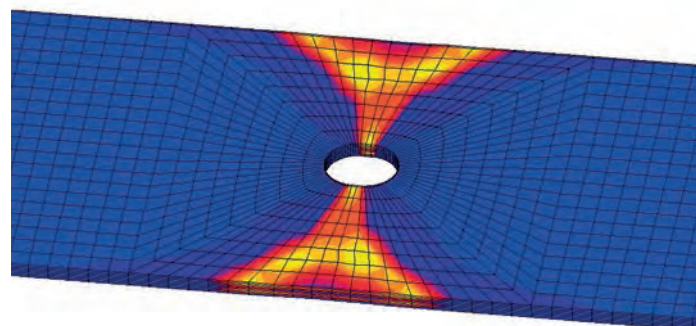
Sono state eseguite 30 simulazioni sul laminato (stratificato a 0° e 90°) per calcolare i valori dell'ammissibile B-basis. I valori dei coefficienti di variazione assegnati sui parametri micromeccanici sono stati reiterati mentre la variabilità della ply a 0°, si spiega

con parametri correlati alla fibra, fino a riprodurre la lamina B-basis o CV. I coefficienti individuati

delle variazioni e delle deviazioni standard sono riportati in dettaglio in Tab. 2a, mentre il B-basis corrispondente in Tab. 3.

Modello FEA

Sono considerati sei test differenti: unnotched tension and open-hole tension per la definizione di layup quasi-isotropo [45/-45/0/90]2s (layup 1), soft [45/-45/0/45/-45/90/45/-45/45/-45]s e hard [0/45/0/90/0/-45/0/45/0/-45]s (layup 3).



Test	Mean Strength (MPa)			B-basis (MPa)		
	Simulation	Experiment	Error	Simulation	Experiment	Error
UNT1	665.26	610.88	8.9%	570.86	534.07	6.9%
UNT2	421.09	438.64	-4.0%	377.56	395.07	-4.4%
UNT3	1120.9	1050.07	6.7%	1007.2	949.27	6.1%
OHT1	317.14	328.19	-3.4%	290.52	293.44	-1.0%
OHT2	227.91	270.07	-15.6%	207.39	243.11	-14.7%
OHT3	493.15	472.64	4.3%	444.87	420.72	5.7%

Tab. 4 - Virtual allowables validation for AS4/8552 UD tape at RTD
Validazione degli ammissibili del nastro AS4/8552 UD RTD

The comparison with experiment reveals that both mean and B-basis values are generally predicted within 10 % of error compared to experimental response. One configuration is systematically under predicted by 15% with simulation: open-hole tension for soft layup. Moreover for each configuration,

the error on prediction is consistent between mean strength and B-basis, indicating that identified coefficients of variation of micro-level parameters are valid. Virtual allowable approach also allows to remove the barriers of experimental testing. It is for instance very simple to run hundreds of simulations

La sequenza del layup è rappresentata con la tecnica della modellazione discreta dello strato, utilizzando elementi solidi ad integrazione ridotta e un elemento nello spessore della ply. Dal momento che il layup è simmetrico, viene caratterizzato esplicitamente soltanto metà provino grazie alla condizione al contorno di simmetria a metà spessore. Sono state eseguite trenta iterazioni per ogni provino. In tutto

sono state predisposte 180 simulazioni, utilizzando per ciascuna una serie differente di proprietà costitutive, frazione di volume e allineamento della fibra, definite in maniera random rispetto alla normale delle variabili, individuati nella sezione del modello Digimat. La durata del test di trazione su provino unnotched è pari a 90 secondi, mentre nel caso del test sugli open-hole, in cui è richiesta una maggiore definizione della

of a configuration, in order to obtain laminates' true strength distribution. Let's consider the unnotched tension quasi-isotropic configuration. After running 300 simulations with variability, the following results are obtained. From raw stress-strain results, a cumulative probability function is built (Fig. 3). The function tends to the actual true distribution of the unnotched tension quasi-isotropic strength, thereby improving the understanding of the composite material behavior.

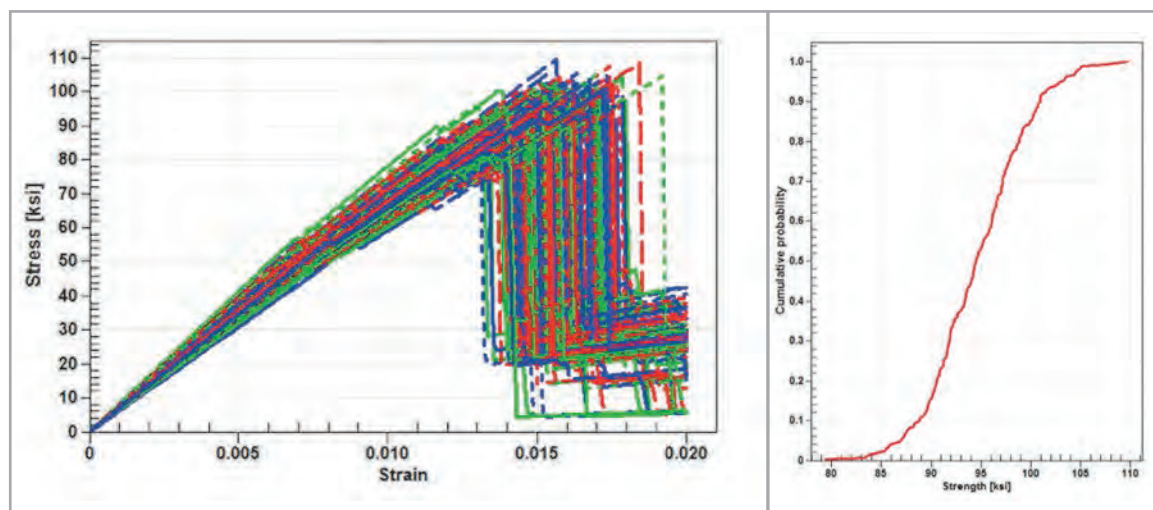


Fig. 3

Conclusions

To speed-up the integration of new composite materials, a solution based on simulation is proposed in order to generate virtually the data required by designers. The process is based on advanced modeling of composites behavior that describes realistically the progressive

failure of such materials. As the modeling is based on micro-mechanics, it is straightforward to introduce the variability in the lamina properties that can come from the constituents properties, manufacturing or testing. This process is embedded in a vertical environment

called Digimat-VA. The process has been successfully demonstrated on the generation of B-basis for the AS4/8552 carbon/epoxy UD tape system, for various types of coupons and layups configurations. It has been shown that starting from lamina level experimental data,

it is generally possible to predict laminate strength within 10% of error. Further developments include modeling of the interply damage mechanisms as well as other types of coupon testing, such as filled-hole tension/compression and bearing tests.

mesh, la durata è pari a una media di 1500 secondi su 1 singolo CPU.

Modellazione virtuale

Dopo aver eseguito le 180 simulazioni, il nuovo software elabora automaticamente le curve sforzo-deformazione partendo dai risultati della simulazione.

La sollecitazione massima per ogni curva è stata definita in termini di resistenza del provino. Partendo da tutti i valori di resistenza raccolti per ogni test del provino, il software calcola i valori statistici per poi stabilire la resistenza media e l'ammissibile B-basis.

A titolo di esempio, sono riportate qui di seguito le curve di sollecitazione-deformazione generate per la configurazione open-hole quasi isotropa.

Dopo aver eseguito i calcoli delle 30 iterazioni per ogni configurazione, sono stati calcolati la resistenza

media e i valori dei B-basis e riportati in Tab. 4.

Il confronto con i dati sperimentali rivela che la media e i valori B-basis è calcolabile con un margine di errore del 10% rispetto alla risposta sperimentale. Una configurazione rientra sistematicamente nella previsione per il 15% con la simulazione: l'open-hole testato a trazione per il layup soft.

Inoltre, per ogni configurazione, l'errore della previsione è coerente fra la resistenza media e B-basis, a indicare che i coefficienti individuati della variazione dei parametri di microlivello sono validi.

La tecnica della modellazione virtuale permette anche di rimuovere le barriere dei test sperimentali. Ad esempio è molto semplice eseguire centinaia di simulazioni di una configurazione, in modo da ottenere la distribuzione effettiva della resistenza dei laminati.

Prendiamo in considerazione la configurazione dell'unnotched tension quasi-isotropa. Dopo aver eseguito 300 simulazioni con variabilità, si ottengono i risultati seguenti. Dai primi risultati della trazione si costruisce una funzione di probabilità cumulativa (Fig. 3). La funzione tende all'effettiva distribuzione della resistenza nel caso dell'unnotched tension quasi isotropo, migliorando la comprensione del comportamento del materiale composito.

Conclusioni

Per accelerare l'integrazione di nuovi materiali compositi, si propone una soluzione basata sulla simulazione che dà luogo alla generazione dei dati virtuali richiesti dal progettista. Il processo si basa sulla modellazione avanzata della risposta dei compositi descrivendo realisticamente la degradazione

progressiva di questi materiali. Poiché la modellazione si basa sulla micromeccanica, si introduce ovviamente la variabilità delle proprietà del laminato che può derivare dalle proprietà costitutive, dal processo di produzione o dai test. Il processo è incorporato in un ambiente verticale denominato Digimat-VA. Il processo è stato dimostrato con successo nella generazione dell'ammissibile B-basis per il sistema tape UD carbonio/epossidico AS4/8552 e per varie tipologie di configurazioni di provini e di layup. Si è dimostrato che partendo dai dati sperimentali del laminato, è possibile in generale prevedere la tenacità del laminato con un margine di errore del 10%. Ulteriori sviluppi includono la modellazione dei meccanismi di danneggiamento interlaminari e altri test sui provini, come test sui filled-hole trazione/compressione e bearing.