

# MODELLAZIONE DI MATERIALI COMPOSITI PER APPLICAZIONI INDUSTRIALI

**Claudio Bruzzo**

*Direttore tecnico, MSC Software*

*Coautori: Jan Seyfarth, Roger Assaker,  
e-Xstream Engineering,  
a MSC Software Company*

**Una nuova frontiera della simulazione numerica è la previsione della resistenza a fatica, per arrivare alla predizione del ciclo di vita di componenti in plastica.**

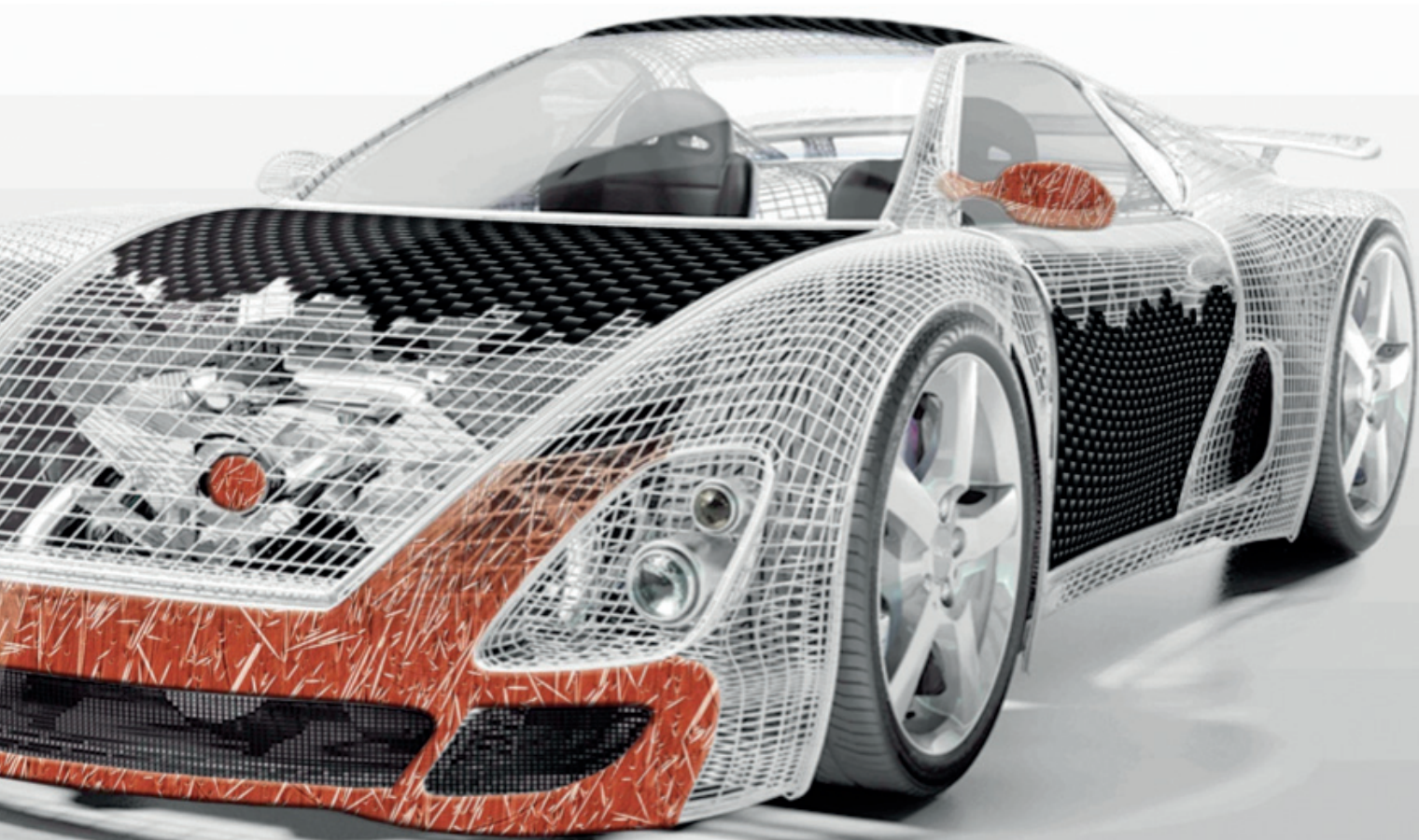
## INTRODUZIONE

L'utilizzo di materiali compositi nella progettazione moderna sta attraversando una fase di complessità crescente: ad esempio, i materiali creati appositamente per determinati progetti devono rispondere a determinati obiettivi di performance. Soprattutto nei casi di costruzioni leggere, i materiali compositi in plastica sono sempre più presenti in aree di applicazione per le quali in passato venivano utilizzati esclusivamente materiali metallici. Questi materiali sono sempre più usati nel settore automobilistico, con diverse modalità di configurazione delle fibre, mentre nei settori aerospaziale e navale e in quello delle energie rinnovabili sono più comunemente utilizzate le fibre continue. In questo caso, i materiali differiscono nella tipologia di rinforzo, poiché vengono utilizzate su diversi strati sia fibre in vetro che fibre in carbonio. Anche se le industrie e i materiali sopra citati appaiono estremamente diversi tra di loro, vi è una questione ingegneristica comune: come è possibile rappresentare correttamente il comportamento dei materiali com-

positi all'interno di simulazioni al computer? I compositi sono caratterizzati da proprietà dei materiali altamente complesse, che dipendono dal processo di condizionamento che si verifica durante la fase di preparazione dei prodotti definitivi. Solitamente, le proprietà dei componenti risultanti devono essere verificate in una vasta gamma di applicazioni: soltanto per rappresentare le prestazioni di base di un componente in plastica è necessario essere in grado di descrivere correttamente la rigidità e il cedimento del materiale composito. Per effettuare simulazioni più avanzate sarà invece necessario descrivere comportamenti del materiale più complessi, come ad esempio la velocità di deformazione relativa a eventi di impatto o la temperatura del materiale per quanto riguarda la simulazione di scorrimenti viscosi. Un nuovo argomento di simulazione che viene sempre più richiesto è la previsione della resistenza a fatica per arrivare alla predizione del ciclo di vita di componenti in plastica.

Dalle situazioni descritte emerge una forte necessità di comprendere a fondo il compor-





Copyright e-Xstream engineering. Tutti i diritti riservati (per gentile concessione)

tamento dei materiali compositi; considerato che tale comportamento è fortemente influenzato dalla microstruttura del materiale, molto difficile da monitorare attraverso i più classici approcci sperimentali, si rende necessaria in tali casi l'esecuzione di simulazioni multi-scala. Per essere in grado di progettare in modo efficiente componenti in composito, il modello di materiale multi-scala utilizzato deve descrivere nel modo più corretto possibile la performance fisica finale dello stesso in base alla microstruttura del materiale; allo stesso momento, per essere utilizzabile in un contesto industriale, questa strategia deve essere impostata in maniera efficiente dal punto di vista dei tempi e dei costi.

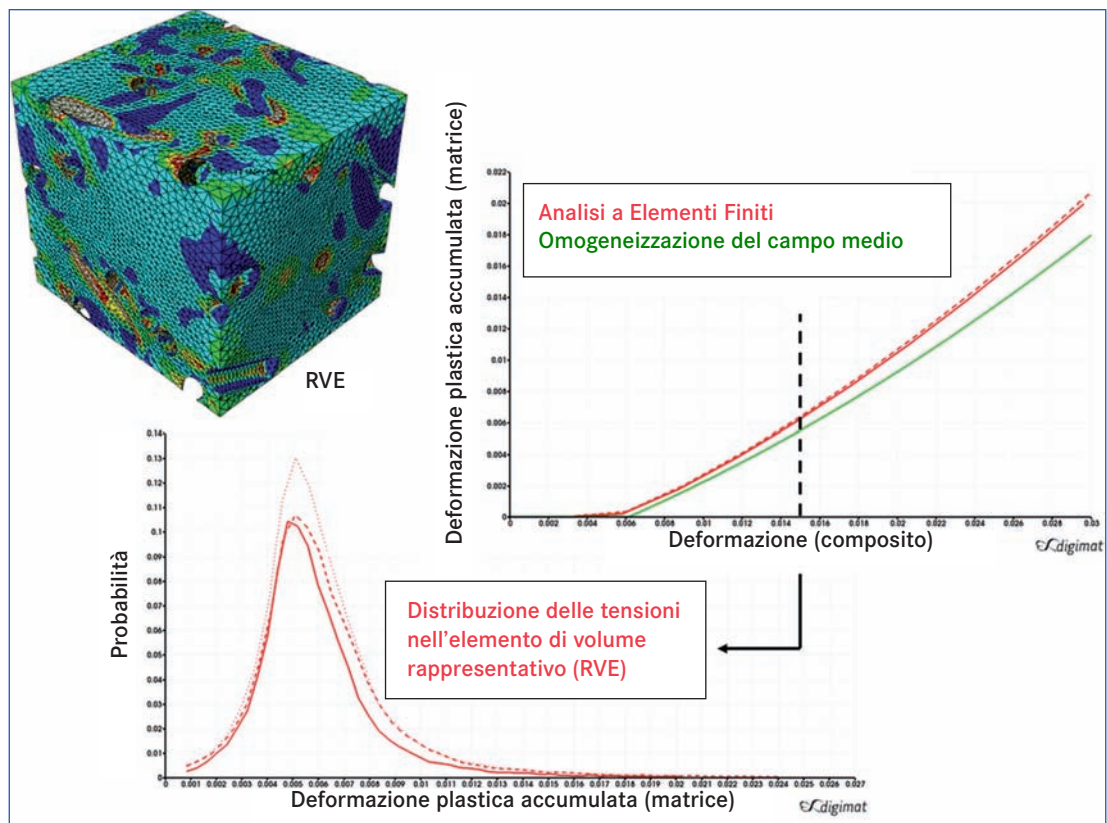
#### L'APPROCCIO ALLA SIMULAZIONE MULTI-SCALA

Le più moderne tecnologie di simulazione, come la piattaforma di modellazione dei materiali DIGIMAT, forniscono alle industrie un approccio generico alla modellazione di materiali

multi-scala. I compositi possono essere studiati in modo efficiente sia a livello microscopico sia macroscopico, utilizzando metodologie incorporate in una strategia globale tramite le quali la micromeccanica consente di soddisfare le esigenze industriali.

Iniziando dalle indagini a livello microscopico, è possibile identificare i principali parametri che influenzano le proprietà dei materiali compositi. Tipicamente, la procedura di simulazione si basa sull'impostazione di un modello del materiale tramite il cosiddetto RVE, l'elemento rappresentativo di volume (figura 1). L'elevata accuratezza delle informazioni calcolate conduce ad una precisa comprensione del comportamento del materiale e degli effetti derivanti dalla sua microstruttura e consente di studiare diverse proprietà del materiale, che vanno dalle semplici prestazioni meccaniche alla risposta termomeccanica fino alla conducibilità termica ed elettrica. Tali informazioni consentono inoltre di studiare in maniera sistematica una serie di situazioni complesse, come ad esempio il raggruppamento delle par-

Fig. 1 - A livello microscopico, l'obiettivo della simulazione è il materiale: ad esempio, la deformazione plastica accumulata nella matrice del composito può essere calcolata per un elemento di volume rappresentativo (RVE) di materiale composito rinforzato in plastica a fibre corte.



ticelle e l'influenza sulle proprietà dei materiali.

Tuttavia, per descrivere le prestazioni di un componente in composito, questo livello di analisi è troppo dettagliato e necessita di tempi di simulazione troppo lunghi; l'elemento RVE, pertanto, non può essere utilizzato direttamente come modello di materiale per una simulazione efficiente del comportamento dei componenti; è necessario quindi un modello differente, capace di calcolare in maniera interattiva le proprietà del materiale basandosi su informazioni relative alla microstruttura locale acquisite in precedenza. L'obiettivo finale è quello di utilizzare l'output delle simulazioni dei processi di lavorazione in un'analisi accoppiata capace di descrivere il comportamento del componente in composito. Tali simulazioni coprono oggi un numero crescente di diverse tecnologie, come l'iniezione e lo stampaggio a compressione per compositi a fibre corte e lunghe oppure il metodo Mu-cell. L'elemento chiave per essere in grado di interfacciarsi con tali analisi è il modello di composito che descrive il comportamento del materiale.

La strategia di questo approccio è quella di attingere informazioni dalle simulazioni a livello microstrutturale, identificando i principali fattori di influenza sulle proprietà del materiale composito e usando questi dati per la costruzione di un modello alternativo di materiale micro-

meccanico. Una possibilità è quella di utilizzare l'algoritmo di omogeneizzazione di Mori-Tanaka (MT) che si basa sull'approccio di Eshelby (vedere la figura 1 per un confronto tra i risultati FEA e l'approccio MT).

Tale modello micromeccanico viene quindi parametrizzato seguendo una procedura di reverse engineering che consente di replicare correttamente il comportamento sperimentale del materiale reale. Il materiale virtuale risultante può essere accoppiato agli output delle simulazioni dei processi di lavorazione (vedere la figura 2 per una panoramica del flusso di lavoro, relativamente all'esempio di materiali rinforzati con fibre corte e nel caso di stampaggio ad iniezione come fase di lavorazione).

### APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Per quanto riguarda le applicazioni industriali, è importante essere in grado di descrivere il comportamento reale dei materiali plastici, che per natura è non lineare ed è dipendente dalla temperatura e dalla deformazione. L'algoritmo di omogeneizzazione MT può essere esteso in modo da rappresentare la risposta non lineare del materiale. L'effetto non lineare è ottenuto come risultante dalla matrice del materiale: le fibre sono descritte tramite modelli elastici li-

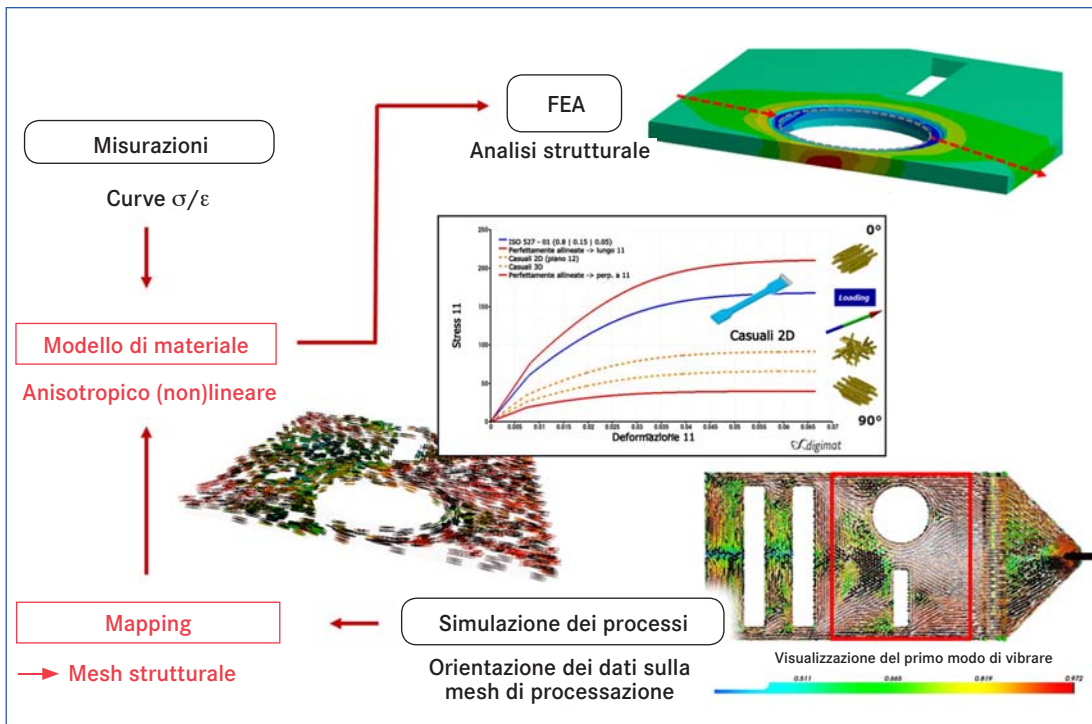


Fig. 2 - Nell'accoppiamento della simulazione dei processi di lavorazione con l'analisi agli elementi finiti, il modello micromeccanico del materiale svolge un ruolo centrale.

neari, isotropi per le fibre di vetro e trasversalmente isotropi per le fibre di carbonio. Il punto di forza di tale metodologia è che essa può essere utilizzata per diverse modalità di rinforzo tramite fibre.

Nell'ambito dell'approccio di omogeneizzazione, la microstruttura complessa che contraddistingue i materiali plastici rinforzati attraverso fibre corte viene presa in considerazione utilizzando una sequenza di simulazioni. Sulla base di un tensore degli orientamenti, che è di fatto l'output del software di simulazione del procedimento di iniezione a stampaggio, viene eseguita in primo luogo una decomposizione delle fibre orientate in modo casuale in una serie di cosiddetti "pseudo-grani", dove ogni pseudo-grano rappresenta una classe di fibre che condivide lo stesso orientamento nello spazio. Per ogni pseudo-grano viene effettuata una procedura di omogeneizzazione; infine, vengono derivate le proprietà macroscopiche dei compositi come valore medio di tutti i risultati relativi ai singoli pseudo-grani.

La procedura descritta consente di rappresentare una vasta gamma di prestazioni dei materiali. I modelli di materiale rilevanti per applicazioni industriali sono i seguenti:

- (Termo-)elasticità
- (Termo-)elastoplasticità
- (Termo-)viscoelasticità
- (Termo-)elasto-viscoplasticità

Tutti questi modelli di materiale sono completamente anisotropi e sensibili all'orientamento delle fibre definiti a livello microstrutturale. La dipendenza dalla temperatura significa che tutti i parametri del modello possono essere espressi in funzione della temperatura, tenendo anche conto del coefficiente di espansione termica. Il livello di pseudo-grani (PG) risulta essere particolarmente interessante per quanto riguarda la realizzazione di modelli avanzati, ad esempio per la descrizione del comportamento a rottura e per la configurazione dei modelli per test di fatica corrispondenti a curve anisotrope di Wöhler. Nel software DIGIMAT, la rottura a fatica di materiali plastici rinforzati con fibre corte è descritta tramite un criterio trasversalmente isotropo di tipo Tsai-Hill-3D a livello di pseudo-grani. Il modello a fatica è implementato in maniera simile sulla stessa scala, ma è sensibile a un numero di cicli critici per una data ampiezza di carico. Le curve S-N (o di Wöhler) possono essere previste per orientamenti sconosciuti, il che rende possibile la previsione di vita a fatica a cicli elevati. La figura 3 mostra alcuni esempi per un provino ricavato da una piastra stampata ad iniezione. Sia nel caso di rottura che nel caso di previsione della fatica del materiale, l'effetto di tipo "skin-core" della microstruttura stratificata sottostante diventa ben visibile nei risultati delle simulazioni accoppiate.

Nel caso in cui si ha a che fare con metodologie di rinforzo di tipo continuo, gli ap-



MSC Software fa parte delle "10 Original Software Companies". Impiega oltre 1.000 professionisti in 20 paesi. Nel 2012 MSC Software ha acquisito e-Xstream, società di software e di servizi per l'ingegneria completamente focalizzata sulla modellazione di materiali compositi e strutture. L'azienda aiuta i propri clienti, i fornitori di materiali e gli utenti in diverse industrie (automobilistica, aerospaziale) a ridurre i costi e i tempi necessari alla progettazione di materiali e prodotti innovativi utilizzando Digimat, una piattaforma di modellazione non-lineare per materiali e strutture. Per ulteriori informazioni sui software e servizi di MSC, visitate il sito: [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com)

Copyright e-Xstream engineering. Per gentile concessione.

procci sono molto simili a quelli sopra descritti. L'elaborazione della simulazione è in grado di fornire gli angoli di curvatura per compositi di tipo UD, mentre gli angoli di trama e ordito sono trasferiti per materiali compositi tessuti, e sulla base di ciò è possibile impostare simulazioni di tipo accoppiato. Tuttavia, la situazione è diversa dall'applicazione vista in precedenza e relativa al caso di fibre corte: in linea di massima, i principali codici ad elementi finiti offrono una serie di soluzioni per la modellazione dei materiali compositi UD nonché la possibilità di interfacciamento con algoritmi di simulazione dei processi manifatturieri. Tuttavia, l'approccio classico presenta alcune difficoltà nel contesto di un eventuale utilizzo industriale: le proprietà del materiale, infatti, costituiscono un input fondamentale per la simulazione ed è richiesto un grande investimento a livello sperimentale per effettuare tutte le misurazioni necessarie all'elaborazione di una scheda delle caratteristiche del materiale adatta allo scopo; in tal caso, non è insolito che siano necessari da 6 a 12 mesi per identificare le proprietà di un singolo materiale. Un lasso di tempo di questo genere rappresenta una grande limitazione per la simulazione al computer e quindi, soprattutto nella fase iniziale, è importante analizzare non solamente quanti più possibile tipi di design a livello CAD, ma è anche necessario tenere in considerazione una serie

di materiali diversi, in modo da identificare con una ragionevole certezza il migliore approccio progettuale da seguire.

La sperimentazione virtuale basata sull'approccio micromeccanico offre una soluzione per superare questo problema: i materiali, infatti, possono essere testati in varie condizioni di carico in una frazione di secondo e pertanto tali prove virtuali forniscono grandi potenzialità per sostituire i costosi esperimenti in laboratorio, consentendo di produrre un modello qualitativo di materiale nel lasso di tempo di poche ore anziché di diversi mesi. Tali modelli consentono inoltre di rappresentare il comportamento a rottura dei materiali compositi tramite un approccio generalizzato: invece di stabilire un indicatore di rottura per il composito finale, come viene solitamente fatto per i compositi di tipo UD, nel caso di modelli micromeccanici è possibile definire una serie di indicatori a livello della matrice e delle fibre. I confronti tra i risultati più recenti e i dati sperimentali indicano che il metodo descritto porta ad una buona previsione della rottura del materiale composito, sia in termini di resistenza che per quanto riguarda il meccanismo della rottura stessa.

## SOMMARIO

I modelli micromeccanici di materiale sono in grado di utilizzare come input le informazioni re-

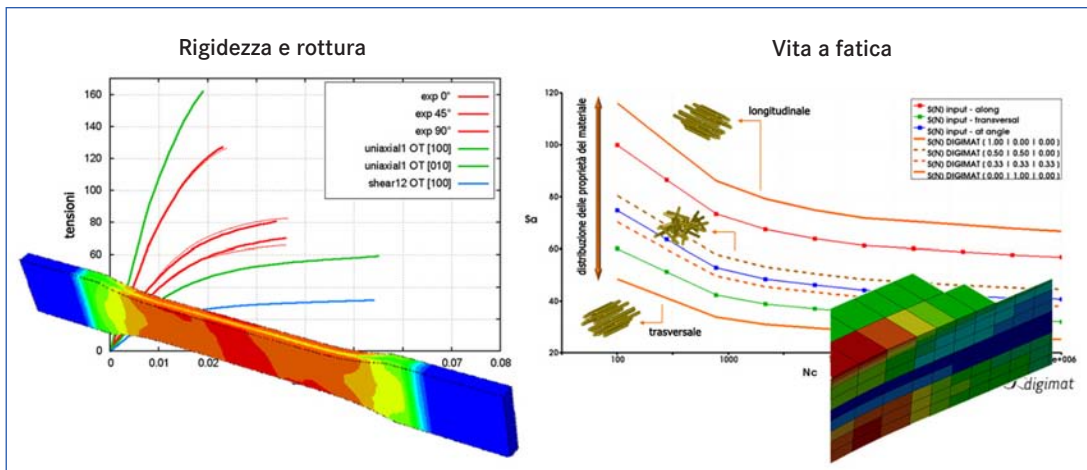


Fig. 3 - Nel software DIGMAT, la rottura di materiali plastici rinforzati con fibre corte è descritta tramite un criterio trasversalmente isotropo di tipo Tsai-Hill-3D applicato sul cosiddetto “livello di pseudo-grani” del materiale (contenente classi di fibre con lo stesso allineamento). Il modello fatica è implementato sulla stessa scala, ma è dipendente da un numero di cicli critici per una data ampiezza di carico. Le curve S-N (o di Wöhler) possono essere previste per orientamenti sconosciuti, il che rende possibile la previsione di vita a fatica a cicli elevati. Nell'esempio mostrato di un provino ricavato da una piastra stampata ad iniezione, l'effetto di tipo “skin-core” della microstruttura stratificata sottostante diventa ben visibile nei risultati delle simulazioni accoppiate.

lative alla microstruttura e di restituire come output la risposta del materiale macroscopico. Tali modelli consentono di colmare il divario tra la fase di lavorazione, che influenza le proprietà del materiale di compositi su scala locale, e le prestazioni del componente reale. Per soddisfare le particolari esigenze di diversi settori industriali (tra cui l'industria automobilistica, aerospaziale ed altre ancora) è importante estendere tale approccio in modo da consentire di rappresentare i comportamenti non lineari nonché le dipendenze dalla temperatura e dalla velocità di deformazione. Inoltre, è necessario fornire modelli realistici per quanto riguarda il comportamento a rottura e per l'analisi della vita a fatica. Tutto ciò è ad oggi disponibile tramite l'utilizzo di soluzioni software commerciali.

Per quanto concerne i materiali plastici rinforzati a fibre corte, le analisi capaci di accoppiare il procedimento di stampaggio ad iniezione con la risposta strutturale del componente in esame sono ad oggi diventate di utilizzo comune: in questo caso, la difficoltà è di essere in grado di descrivere comportamenti complessi (come ad esempio la rottura e/o i fenomeni di scorrimento viscoso) e di essere utilizzati in nuovi settori ingegneristici, come ad esempio la previsione della vita dei componenti. Per i compositi di tipo UD e di tipo tessuto, le limitazioni relative alle analisi iniziali di progettazione rappresenta-

no ancora oggi una notevole sfida progettuale, a causa del gran numero di esperimenti e del tempo necessario alla definizione di un modello di materiale idoneo in modo classico. In questo caso, la modellazione micromeccanica può aiutare a sostituire i test sperimentali con test virtuali. Questi modelli possono essere applicati nelle simulazioni completamente accoppiate, che comprendono l'analisi dei processi di draping.

### Claudio Bruzzo

Laureato in Ingegneria Meccanica all'Università di Genova nel 1989. Entra a far parte dello staff di ESPRI-MARC nel 1990, dove è responsabile per il supporto clienti dal 1994 al 1999.



Fa parte dello staff MSC.Software dal 1999, in seguito all'acquisizione di ESPRI-MARC da parte di MSC.Software. Dal 2004 è il responsabile tecnico del team italiano di MSC.Software. È coordinatore tecnico delle attività per l'industria manifatturiera a livello EMEA (Europa, Medio Oriente e Africa) dal 2006. Partecipa a diversi progetti internazionali.