

di Marta Palenzona, Proplast

Bottle Opener I vantaggi dello stampaggio ibrido

Leggerezza, prestazioni e volumi compatibili con la mass production sono i vantaggi dei laminati compositi termoplastici. Ecco come progettarli, processarli e simularne caratteristiche e prestazioni

Nelle applicazioni di metal replacement i laminati compositi a matrice termoplastica (organo sheet o foglie organiche) si rivelano una soluzione vincente non solo per l'ottimo rapporto tra peso e prestazioni, ma soprattutto per un'elevata efficienza nel processo di produzione del manufatto che non può dirsi propria dei fibrorinforzati a matrice termoindurente. Gli organo-sheet, infatti, possono essere trasformati in prodotto finito tramite lo stampaggio ibrido (hybrid molding), una tecnologia che richiede costi aggiuntivi di investimento contenuti – implementando la tradizionale pressa a iniezione con un forno per il riscaldamento a infrarossi e un robot

– e che permette di beneficiare di processi assodati. I vantaggi che ne derivano sono numerosi: tempi di ciclo ridotti a fronte di volumi di produzione simili a quelli ottenibili attraverso lo stampaggio a iniezione di polimeri termoplastici tradizionali, capacità di realizzare parti che non necessitano di post lavorazioni di finitura estetica e possibilità di saturare le attrezzature, non essendo esse intrinsecamente legate ai compositi. Un ulteriore valore aggiunto della tecnologia è la possibilità di ingegnerizzare il manufatto, sovrastampando “features” di rinforzo,

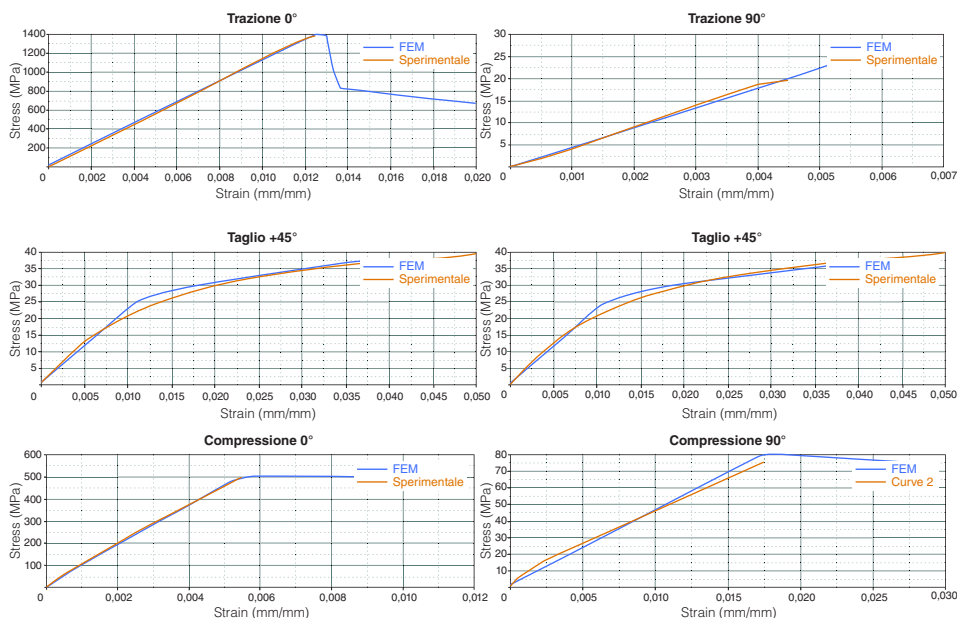
1 Confronto tra le matematiche del Bottle Opener Ibrido (a sinistra, fronte e retro) e del Bottle Opener Full Plastic (a destra, fronte e retro)



Principali caratteristiche dei due diversi apribottiglie

Bottle Opener Ibrido	
Volume laminato	8,18 cm ³
Volume iniettato	10,25 cm ³
Spessore laminato	1 mm
Spessore nervature	0,6-0,8 mm
Bottle Opener Full Plastic	
Volume iniettato	23,63 cm ³
Spessore medio	2 mm
Spessore nervature	0,8 mm

2 Card fitting del laminato Maezio. Corrispondenza tra le curve reali e FEM al termine dell'one element test



come nervature e longheroni, e componenti quali borchie e sistemi di fissaggio, che non possono – o non devono – essere realizzati in fibra continua, potenziando le già elevate prestazioni date dalla fibra stessa, che sia tessuta o unidirezionale. Altro aspetto da non trascurare è il ridotto impatto ambientale. Non solo i compositi termoplastici sono completamente recuperabili, ma il processo di riciclo è decisamente più eco-friendly rispetto a quello dei termoindurenti; inoltre il processo di trasformazione primario non richiede solventi, catalizzatori, acceleranti di reazione e altre sostanze potenzialmente dannose.

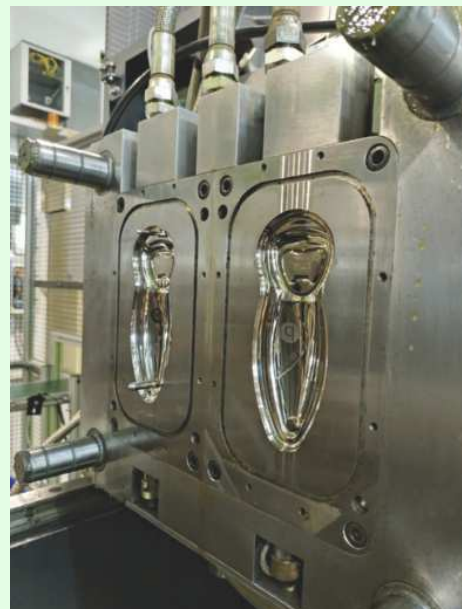
Per tutte queste ragioni, l'applicazione dei laminati compositi termoplastici è particolarmente interessante in molti comparti industriali, anche se al momento vengono utilizzati soprattutto dall'automotive e dall'aerospaziale. Le caratteristiche delle foglie organiche e dei loro processi di trasformazione sono ancora in fase di sviluppo, pertanto spesso vengono penalizzati rispetto ai compositi termoindurenti. Altro elemento a sfavore è che

le elevate prestazioni degli organo sheet non garantiscono la certezza di ottenere manufatti dalle performance eccellenti: in questa direzione gioca un ruolo chiave la fase progettuale, che richiede un know-how che spazia dalle conoscenze avanzate dei materiali, delle tecnologie di trasformazione e dei software di simulazione per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del prodotto finito.

Lo stampaggio ibrido

Lo stampaggio ibrido nasce dalla fusione di due tecnologie tradizionalmente impiegate per la trasformazione dei materiali plastici – termoformatura e stampaggio a iniezione – gestite in una singola isola di lavoro. Il processo parte dal riscaldamento dell'organo sheet, mediante irradiazione IR, fino al raggiungimento di una temperatura superiore di circa 20 °C rispetto a quella di fusione/rammollimento della matrice. Quindi, la foglia viene prelevata tramite mano robotica e trasferita dal forno allo stampo che, nella fase di chiusura, la deforma fino a conferire la geometria definitiva nel momento di

Stampo famiglia progettato e realizzato da Proplast per la produzione di un apribottiglie in laminato composito a matrice termoplastica e polimero retroiniettato e del suo omologo interamente in materiale plastico



L'isola di lavoro

L'unità di produzione delle due versioni del Bottle Opener – in laminato composito termoplastico sovrastampato e in policarbonato stampato a iniezione – è stata progettata e realizzata dal Consorzio Proplast curando ogni minimo dettaglio, dallo stampo alle diverse tecnologie di stampaggio impiegate, alle attrezzature correlate fino all'automazione.

Le tecnologie di stampaggio

Il processo messo a punto prevede lo stampaggio simultaneo delle due versioni dell'apribottiglie attraverso uno stampo a due impronte. La gestione dello stampaggio di due oggetti caratterizzati da volumi così differenti (si veda la tabella nella pagina accanto) è possibile grazie al sistema di iniezione a canale caldo servo-controllato (FlexFlow di HRS) installato su uno stampo famiglia che, tramite parzializzazione dell'apertura degli otturatori, permette di controllare il flusso di polimero nelle due figure in maniera completamente svincolata. La perfetta calibrazione di posizione, velocità e tempi di apertura/chiusura degli otturatori è garantita da sensori per il controllo della pressione della cavità dello stampo (Kistler), che consentono di operare a "zero difetti". Dal momento che uno degli obiettivi del progetto è ottenere manufatti esteticamente pregevoli, lo stampo è dotato di un sistema

Particolare dell'isola di stampaggio del Bottle Opener. A destra il forno per il riscaldamento dei laminati, a sinistra il robot antropomorfo per la manipolazione dei laminati e dei pezzi finiti



di condizionamento dinamico Heat&Cool (attrezzatura HB-Therm) in grado di portare, in tempi rapidissimi, la temperatura dello stampo durante la fase di iniezione a valori molto elevati (superiori alla temperatura di transizione vetrosa del materiale), per poi abbassarla altrettanto velocemente. La tecnica, ideale per la produzione di pezzi dalle pareti molto sottili e con una finitura estetica high gloss impeccabile, offre vantaggi significativi in abbinamento all'espansione microcellulare MuCell (Trexel) nei casi di weight saving.

Il processo MuCell prevede l'iniezione di una miscela di polimero e gas inerte direttamente nel cilindro durante la fase di plastificazione, per ottenere nella successiva fase di iniezione un riempimento facilitato e un'espansione fisica della resina in cavità a bassa pressione. L'espansione determina una riduzione della densità (o alleggerimento) dei pezzi, riducendone al contempo le deformazioni grazie a ritiri più uniformi e controllati. Il limite della tecnologia, tuttavia, è proprio la formazione delle microcelle che si generano indiscriminatamente in tutto lo spessore, comprese le pelli esterne, conferendo un caratteristico aspetto striato al manufatto finale. L'Heat&Cool, così come la tecnica della contropressione in cavità (centralina Bauer), supportano lo stampaggio microcellulare per confinare la formazione delle microcelle nel cuore

del manufatto, ottenendo così una finitura superficiale ottimale.

Riscaldamento e lavorazione degli organo sheet

Per il riscaldamento degli organo sheet, Proplast ha progettato e realizzato un forno con lampade a infrarossi (Hereaus) e il relativo controllo di temperatura e potenza erogata (Gefran).

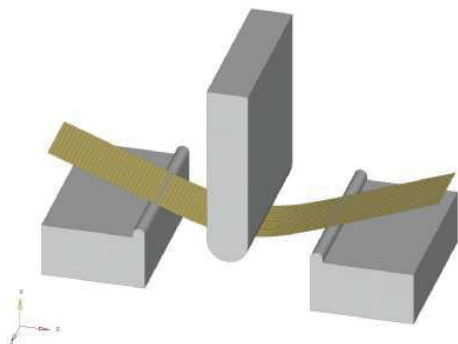
La movimentazione delle foglie organiche è affidata a un robot a sei assi (KR Argilus di Kuka), che per mezzo di ventose le preleva, le posiziona sul vassoio che si sposta all'interno del forno a IR, le ritira dal vassoio alla fine del riscaldamento e quindi le inserisce nello stampo. Per il sovrastampaggio. A processo ultimato, la mano di presa recupera i manufatti finiti per sistemarli sul nastro trasportatore e si predispone per il prelievo di un nuovo laminato. Lo stampaggio ibrido è realizzato su una pressa a iniezione (Engel Victory 120 ECOdrive) con gruppo di chiusura privo di colonne. L'assenza delle colonne assicura la massima libertà nell'area dello stampo e facilita l'accesso e il movimento dell'automazione antropomorfa.

L'impostazione cronometrica del ciclo del robot e dei parametri di processo permette di evitare la formazione di colli di bottiglia e ridurre al minimo i costi di produzione, sfruttando appieno il time saving offerto dai laminati compositi a matrice termoplastica.

applicazione della forza di chiusura della pressa. Segue l'iniezione del polimero di sovrastampaggio per realizzare dettagli strutturali e finiture estetiche.

Si tratta di un processo completamente automatizzato, ripetibile e robusto, con la flessibilità geometrica tipica dello stampaggio a iniezione, intesa sia come il rispetto delle tolleranze sia come la possibilità di ottenere forme complesse.

Se da un lato l'affidabilità di tecnologie note favorisce il processo di trasformazione dei laminati compositi a matrice termoplastica, dall'altro la loro complessità strutturale, legata alla presenza di due o più fasi costituenti, che si riflette nelle due principali caratteristiche meccaniche – eterogeneità e anisotropia –, impone al progettista di affrontare problematiche nuove e spesso inattese. Nasce dunque l'esigenza di eseguire una valutazione delle caratteristiche meccaniche a più livelli: da un'analisi micro-meccanica si ricavano gli stati di tensione e deformazione dei singoli costituenti fino a descrivere a livello macroscopico il laminato, considerandolo come un materiale quasi-omogeneo, dove gli stati di stress e deformazione media sono definiti grazie a teorie di omogeneizzazione. I modelli di omogeneizzazione e i modelli matematici, fondamentali degli strumenti computazionali di modellazione predittiva, sono essenziali per analizzare e definire le prestazioni di questa classe di materiali. Tuttavia, trattandosi di una rappresentazione di leggi fisiche, vengono introdotti inevitabilmente approssimazioni ed errori; si rende quindi necessaria la validazione dei parametri intrinseci del materiale attraverso tecniche di correlazione Test-FEM, note come card fitting. L'analista FEM deve operare un confronto qualitativo e quantitativo tra i dati di laboratorio e i risultati ottenuti dalla caratterizzazione virtuale, per poi validare definitivamente i parametri inseriti tramite lo studio

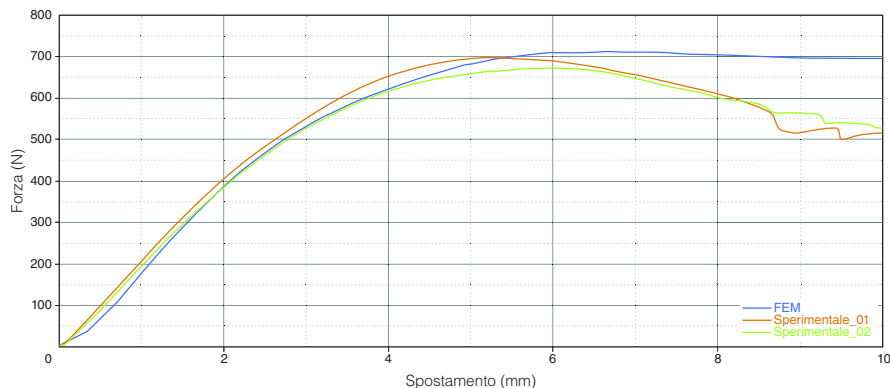
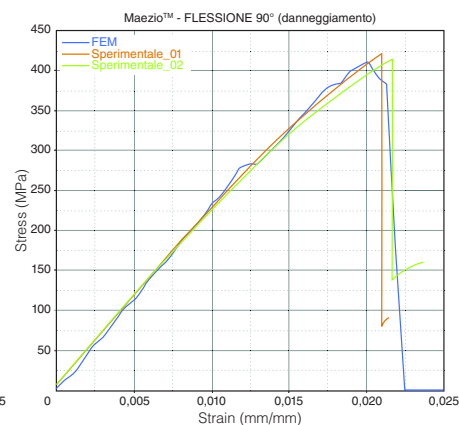
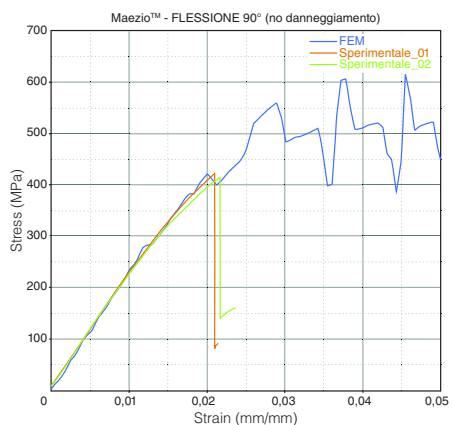
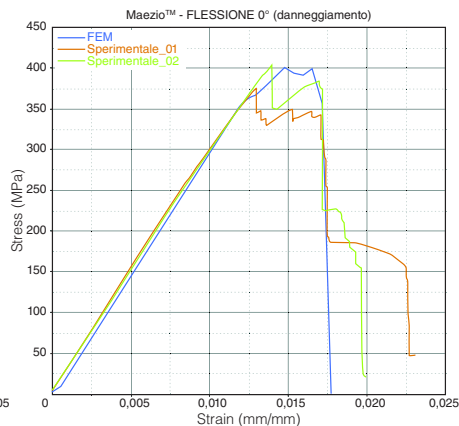
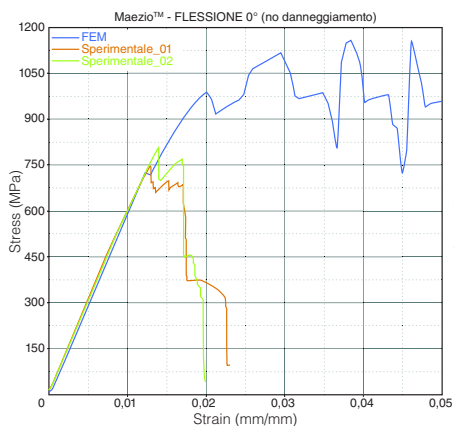


3 Durante la fase di post-processo dello specimen test (a sinistra) vengono analizzati i risultati al fine di valutare l'influenza dei parametri di danneggiamento del laminato. La completezza della card del materiale è direttamente proporzionale al livello di curve fitting (in basso)

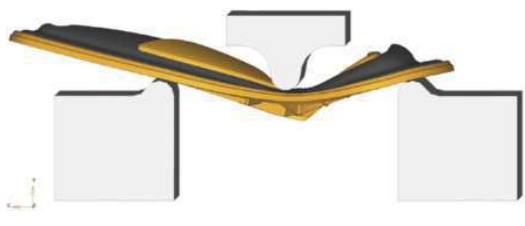
di un componente reale. Il raggiungimento di una buona corrispondenza tra le curve dei test reali e quelle FEM è una procedura lunga e laboriosa, ma è un passaggio imprescindibile affinché la predittività del comportamento in opera di un manufatto reale sia più affidabile. La conoscenza approfondita delle proprietà del materiale, delle caratterizzazioni sperimentali e delle leggi alla base delle card del materiale utilizzate dal software di simulazione, unite alla gestione di un processo che racchiude in sé variabili derivanti da un insieme di tecnologie, rende l'utilizzo dei laminati compositi a matrice termoplastica tutt'altro che banale.

Il progetto Bottle Opener

Negli ultimi anni il Consorzio Proplast (Rivalta Scrivia, Alessandria), attivo promotore delle innovazioni tecnologiche connesse al merca-



4 Bending test del Bottle Opener Ibrido (a sinistra). Il corretto completamento della card del materiale consente di ottenere risultati congruenti e affidabili a livello sia di curve fitting (in alto) sia di deformate (in alto a sinistra)



to delle materie plastiche, ha impegnato le proprie risorse per accrescere le competenze in materia di compositi a matrice termoplastica. Molti sono i casi di studio sviluppati e realizzati con successo, l'ultimo – Bottle Opener – è finalizzato a consolidare le procedure collaterali alla tecnologia di stampaggio ibrido, a partire dalla progettazione di componenti dal design funzionale, verificandone virtualmente le prestazioni strutturali mediante software di simulazione, per arrivare agli stampi adeguati alla loro produzione fino alla realizzazione vera e propria di componenti ibridi, evidenziando al contempo i vantaggi rispetto a un manufatto "gemello" interamente in materiale plastico.

Il dimostratore pensato per concretizzare l'obiettivo è l'apribottiglie Bottle Opener Ibrido (dimensioni 151,5 x 60,5 x 14 millimetri) dal nucleo in laminato a matrice policarbonato e fibre di carbonio unidirezionale (Maezio® di Covestro), rifinito mediante elementi estetici e strutturali, dall'aspetto accattivante proprio grazie al laminato a vista. L'omologo Full Plastic, in policarbonato stampato a iniezione, si presenta con spessori di parete molto più elevati rispetto a quello in composito e un maggior numero di nervature sia per garantirne la resistenza meccanica, sia per esigenze legate al processo di stampaggio (figura 1).

I pezzi sono prodotti in un'isola di lavoro progettata e realizzata da Proplast, che include diverse tecnologie: stampaggio ibrido, controllo variotermico della temperatura dello stampo ed espansione microcellulare (per il dettaglio si veda il riquadro L'isola di lavoro).

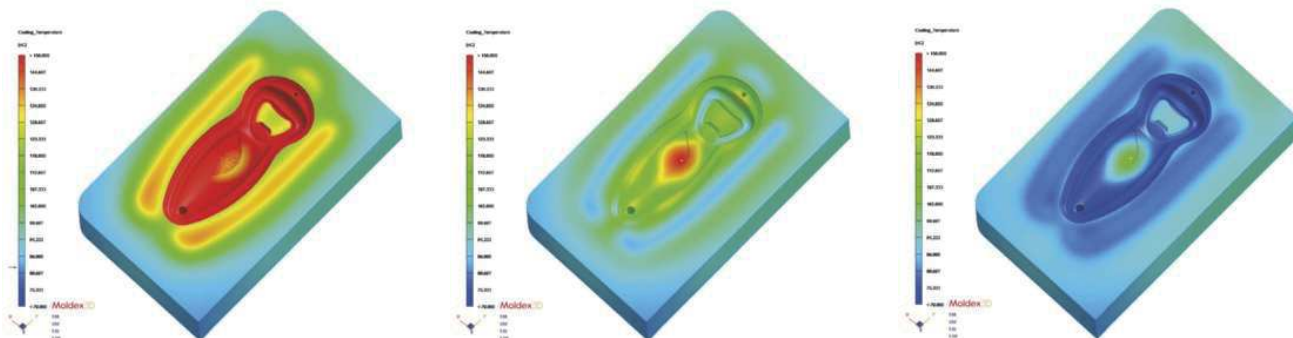
Le simulazioni FEM

Parallelamente alla progettazione dell'isola di produzione, il Laboratorio di Progettazione Avanzata di Proplast si è occupato degli aspetti legati alla simulazione a elementi finiti (FEM). Per lo studio e la previsione del comportamento del manufatto ibrido in laminato termoplastico e polimero retroiniettato è stato utilizzato il software commerciale Hyperworks by Altair® Engineering, solutore Radioss.

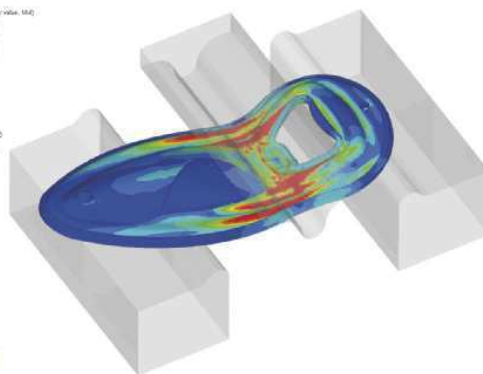
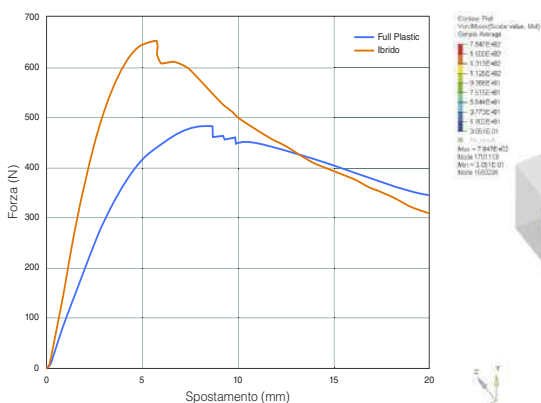
Tra gli input, necessari al setup di una simulazione FEM, gioca un ruolo fondamentale la definizione della card del materiale. Per quanto concerne i compositi, trattandosi di materiali con proprietà dipendenti dalla direzione di prova, la compilazione della card del materiale risulta molto più articolata rispetto ai materiali tradizionali, ed è determinante fornire un più elevato numero di parametri, provenienti da test di trazione e di compressione nelle tre direzioni: 0°, 90° e 45°. Il mero inserimento delle informazioni richieste, però, non è sufficiente: infatti, per descrivere al meglio il comportamento di questa classe di materiali, occorre confrontare qualitativamente e quantitativamente i risultati prodotti dal calcolo a elementi finiti con le misure sperimentali.

I diversi casi di studio elaborati negli ultimi anni hanno permesso a Proplast di acquisire competenze per quanto riguarda sia lo svolgimento

5 Simulazione del processo di stampaggio ibrido e valutazione del condizionamento dinamico con tecnologia Heat&Cool dal riscaldamento al raffreddamento delle matrici dello stampo



6 Confronto dei risultati ottenuti dai test di flessione condotto sul Bottle Opener Ibrido e Full Plastic. Dalle curve emerge la maggiore efficienza dei laminati compositi a matrice termoplastica



7 Il bending test evidenzia la distribuzione delle tensioni con presenza di ampie zone a deformazione plastica, caratteristica dei materiali a rottura duttile

delle prove di caratterizzazione eseguite dal Laboratorio Analisi, sia l'interpretazione dei dati da esse derivanti. Tali dati sono necessari per tarare i modelli FEM e identificare il set di parametri che consenta la più prossima corrispondenza tra le curve reali e virtuali, procedendo con un approccio a blocchi.

Definizione e stima dei parametri

L'analisi FEM comincia dall'one element test, che studia il comportamento nel piano del singolo elemento. Il test viene eseguito per effettuare una prima stima dei parametri generali di elasticità e di plasticità del materiale, analizzando simultaneamente il comportamento a trazione, a taglio e a compressione, con ridotti

tempi di calcolo. Il test può ritenersi concluso con successo nel momento in cui si ottiene una buona corrispondenza tra le curve sperimentali e FEM. Durante la sperimentazione, è stata effettuata la caratterizzazione del Mazingo, un laminato con un rinforzo costituito da sei lamine unidirezionali di fibra di carbonio (non-crimp), disposte secondo la configurazione $[0/90/0]_6$, immerse in una matrice di policarbonato. L'errore tra le curve reali e la simulazione FEM è inferiore al 5% (figura 2), pertanto è possibile affermare che i parametri inseriti all'interno della card del materiale descrivono adeguatamente il comportamento del laminato.

La seconda fase di analisi consiste nella verifi-

ca dei parametri definiti con l'one element test e, se necessario, permette un ulteriore affinamento degli stessi tramite la simulazione FEM dei test di caratterizzazione sperimentali.

Lo specimen test è la rigorosa riproduzione dei test di laboratorio: le condizioni di prova e le matematiche delle attrezzature devono essere definite sulla base dei dati reali. Altrettanto importante è la struttura del laminato: spessore, numero e disposizione dei ply devono essere appropriati. Oltre alle caratterizzazioni necessarie alla definizione della card del materiale, è prevista anche la simulazione della prova di flessione, sia come verifica dei parametri descrittivi sia per identificare i parametri di danneggiamento. La definizione di

questi parametri è un processo molto oneroso, in particolare nel caso di materiali così complessi, ma con un'importanza piuttosto rilevante. Dalla figura 3 emerge la perfetta corrispondenza tra le curve FEM e sperimentale, che si tratti di flessione sia a 0° sia a 90°, nel caso di inserimento dei parametri di danneggiamento. Dall'analisi delle curve risultanti dalla simulazione con card del materiale incompleta emerge invece che il fitting è valido solo per il tratto elastico delle curve. Il controllo finale dei parametri descrittivi del laminato Maezio e la convalida della card del materiale vengono effettuati tramite il bending test del Bottle Opener Ibrido, che consiste nella valutazione, tramite prova di flessione a tre punti, della risposta fornita dal manufatto composto sia dal laminato sia dal polimero retroiniettato, confrontando i risultati FEM con quelli reali. Oltre alla corrispondenza tra le curve è molto importante operare la comparazione tra le deformate; per il caso di studio, tutti i risultati FEM si dimostrano perfettamente congruenti con i valori reali (figura 4). Terminata l'analisi strutturale del Bottle Opener Ibrido, si procede con la simulazione del processo di retroiniezione e le simulazioni termiche delle matrici dello stampo per la valutazione del condizionamento dinamico con tecnologia Heat&Cool, eseguite con software Moldex3D, per un'analisi a 360 gradi della funzionalità e dell'aspetto estetico del manufatto (figura 5).

Prestazioni ed efficienza

Uno degli obiettivi del progetto Bottle Opener è evidenziare i vantaggi legati all'impiego dei laminati compositi a matrice termoplastica rispetto al tradizionale stampaggio a iniezione, valorizzando i concetti di weight saving e time saving.

Dal punto di vista delle prestazioni, la risposta dei due manufatti sottoposti a test di flessione a tre punti, eseguito dal Laboratorio Analisi, è peculiare: il Bottle Opener Ibrido presenta una resistenza a flessione oltre il 30% maggiore rispetto a quella del Bottle Opener Full Plastic (forza massima: 653 N per l'Ibrido e 484 N per il Full Plastic), nonostante volumi piuttosto differenti (figura 6). Inoltre, i due manufatti presentano un comportamento a rottura molto simile con una fase di danneggiamento duttile: il Bottle Opener Ibrido mostra ampie zone di deformazione plastica dovute al superamento del limite di snervamento (figura 7). I fibrorinforzati classici, invece, presentano un caratteristico comportamento fragile, in cui non si manifesta deformazione plastica prima di giungere a rottura.

I casi di studio affrontati negli anni da Proplast, e in particolare il progetto Bottle Opener, dimostrano come le eccellenti proprietà dei laminati compositi a matrice termoplastica, unite a un processo di trasformazione versatile e ad una gestione delle tecnologie CAE competente, possano favorirne la diffusione e l'impiego in ogni settore industriale. ■