



di Riccardo Gennaro, Silvio Pappadà* - Antonio Caruso** - Gianluca Massaccesi***

Simulazioni numeriche di un componente aeronautico complesso

È stato simulato il ciclo di Resin Transfer Molding (RTM) per la produzione di una rib aeronautica mediante il software RTM-Worx. Le simulazioni numeriche hanno consentito l'ottimizzazione del processo, validato mediante indagine non distruttiva ultrasonora e caratterizzazione meccanica eseguite sul pezzo finito.

L'impiego della tecnologia RTM è in forte crescita e rappresenta una delle più promettenti tecnologie nei settori automotive e aeronautico, grazie alla possibilità di produrre strutture in composito ad elevate prestazioni e dalla forma complessa.

Tuttavia la tecnologia dell'RTM richiede la definizione di numerosi aspetti del processo, tra cui la produzione della preforma e il posizionamento di inlet ed outlet. La definizione di parametri e condizioni, che caratterizzano i diversi step del processo, non è intuitiva e può richiedere numerosi esperimenti, con conseguente significativo dispendio economico. A tale scopo, recentemente, sono stati sviluppati software di analisi agli elementi che simulano il riempimento dello stampo in condizioni differenti. I costi relativamente contenuti per attrezzature e stampi, i bassi tempi di ciclo e l'elevata flessibilità di progettazione fanno dell'RTM una tecnologia versatile ed efficiente, adatta a bassi e medi volumi di produzione di compositi ad elevate prestazioni [1-4]. Nella definizione delle condizioni di processo della tecnologia RTM un ruolo chiave è svolto dal posizionamento sullo stampo degli inlet e degli outlet. Tale scelta influenza



Fig.1: Preforma secca e rib aeronautica realizzate dal CETMA

il processo di impregnazione della preforma e, quindi, il contenuto di vuoti, determinando la qualità e le proprietà del pezzo finito. A tal proposito in letteratura sono riportate numerose metodologie sviluppate per individuare l'ottimale configurazione di inlet/outlet. Tali metodologie assumono un'importanza rilevante se si considera che la scelta della configurazione di inlet ed outlet oltre ad influenzare il processo di impregnazione risulta avere un impatto significativo sull'efficienza del processo e sui costi di produzione [5-9].

In questo lavoro, è stato sviluppato uno studio sull'ottimizzazione della strategia di inlet/outlet impiegata per la produzione mediante RTM di una rib aeronautica

in carbonio/resina epossidica. Il processo di riempimento dello stampo è stato simulato al fine di individuare la configurazione di inlet/outlet che garantisce il completo riempimento dello stampo da parte della resina nel minor tempo possibile. Il processo definito a seguito delle simulazioni numeriche è stato validato mediante controllo non distruttivo ad ultrasuoni, eseguito sul pezzo finito, e caratterizzazione meccanica a flessione e trazione eseguita su campioni estratti dalla rib.

MATERIALI E METODI

La preforma impiegata per la produzione della rib è stata realizzata mediante la formatura, in apposito stampo, di un

RTM

tessuto bilanciato in carbonio caricato al 5% in peso con binder epossidico (G0926 fornito da Hexcel). Il tessuto di rinforzo presenta una grammatura di 370g/cm², una frazione in volume di fibra pari al 57% e uno spessore nominale pari a 0.38 mm. L'impregnazione della preforma è stata eseguita mediante iniezione con Hypajet MK III della resina epossidica RTM6 (fornita da Hexcel), un sistema epossidico monocomponente con temperature di esercizio comprese tra -60°C e 180°C. La resina riscaldata alla temperatura di 90°C è stata iniettata in corrispondenza di una pressione di 5 bar nello stampo riscaldato alla temperatura di 130°C. Il tempo di riempimento è stato valutato attraverso il monitoraggio del flusso di resina dagli outlet, collegati mediante tubo trasparente all'impianto di vuoto. A seguito dell'iniezione il pezzo è stato curato alla temperatura di 160°C per 75 minuti.

Completato il ciclo di cura isoterma la rib è stata rimossa dallo stampo e post-curata a 180°C per 2 ore. La figura 1 riporta la foto della preforma secca e del pezzo finito.

SIMULAZIONI NUMERICHE

Il processo RTM è stato simulato mediante il software RTM-Worx, un codice agli elementi finiti che risolve le equazioni che governano il flusso di resina attraverso un mezzo poroso.

Il processo di impregnazione della preforma è stato simulato secondo tre differenti configurazioni di inlet-outlet con l'obiettivo di minimizzare il tempo di riempimento dello stampo ed ottimizzare il processo di impregnazione del rinforzo. In figura 2 sono schematizzate le tre configurazioni analizzate nelle simulazioni numeriche.

Per tutte è stata utilizzata la medesima mesh del modello, costituita da 79848

nodi e 94580 triangoli. In generale, per simulare il processo RTM è necessaria la conoscenza delle permeabilità in piano, k_1 e k_2 , e della permeabilità trasversale, k_3 . Tuttavia, la permeabilità trasversale è stata trascurata considerando che la rib è caratterizzata da uno spessore costante ridotto (≈ 3 mm) [10]. Di conseguenza sono state considerate solo le permeabilità in piano. Inoltre, considerato che la preforma è costituita da una sequenza di impilamento degli strati di rinforzo bilanciata è stato posto $k_1=k_2$. La permeabilità in piano del rinforzo è stata misurata mediante numerosi esperimenti di infusione, durante i quali è stato monitorato l'avanzamento del fronte di resina nel rinforzo. A partire da questo, attraverso la legge di Darcy [11], è stato possibile determinare un valore medio di permeabilità in piano pari a $1.68E-11$ m².

Le simulazioni numeriche sono state

Idea Freddo

IL FREDDO NELLE TUE MANI



**INTERVENTO TECNICO ENTRO 24 ORE INCLUSO
NELLA RATA DI NOLEGGIO**

**PER TUTTI I MATERIALI CHE NECESSITANO DI
STOCCAGGIO IN TEMPERATURA CONTROLLATA**

- Disponibilità delle celle frigo in 4 gg dalla richiesta
- Parco macchine e container continuamente rinnovato

Tutte le temperature tra -40°C e +40°C
Capacità disponibili: 6 mc - 27 mc - 33 mc - 68 mc



IMPIANTO ILLUMINAZIONE
MICRO-SWITCH



IMPIANTO ALLARME
FUORI TEMPERATURA
UMIDITA' RELATIVA



APERTURA FACILITATA
MANIGLIONE ESTERNO



PULSANTE ANTIPANICO
DALL'INTERNO



RAMPA ACCESSO
FACILITATA



ANELLI DI
RIZZAGGIO

noleggio, assistenza e vendita

www.ideafreddo.it

infoline: 0586.20111

CELLE A TEMPERATURA CONTROLLATA



Via dell'ecologia 21/23/25
loc. Valinbuio 57125 Livorno
Tel +39 0586 20111 Fax +39 0586 201130
www.sogeseitalia.it info@sogeseitalia.it

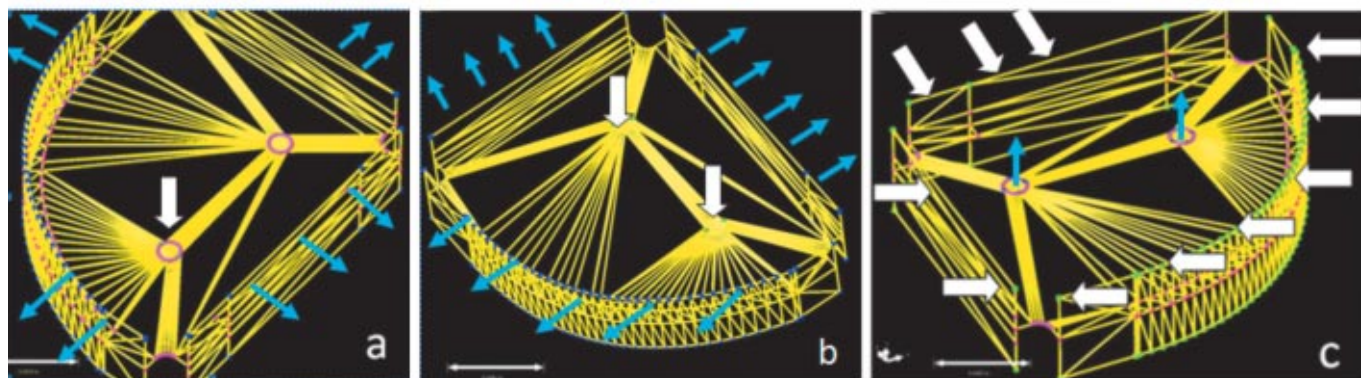


Fig.2: Rappresentazione schematica delle tre configurazioni di inlet-outlet analizzate nelle simulazioni numeriche; le frecce bianche indicano gli ingressi della resina mentre le blu le uscite

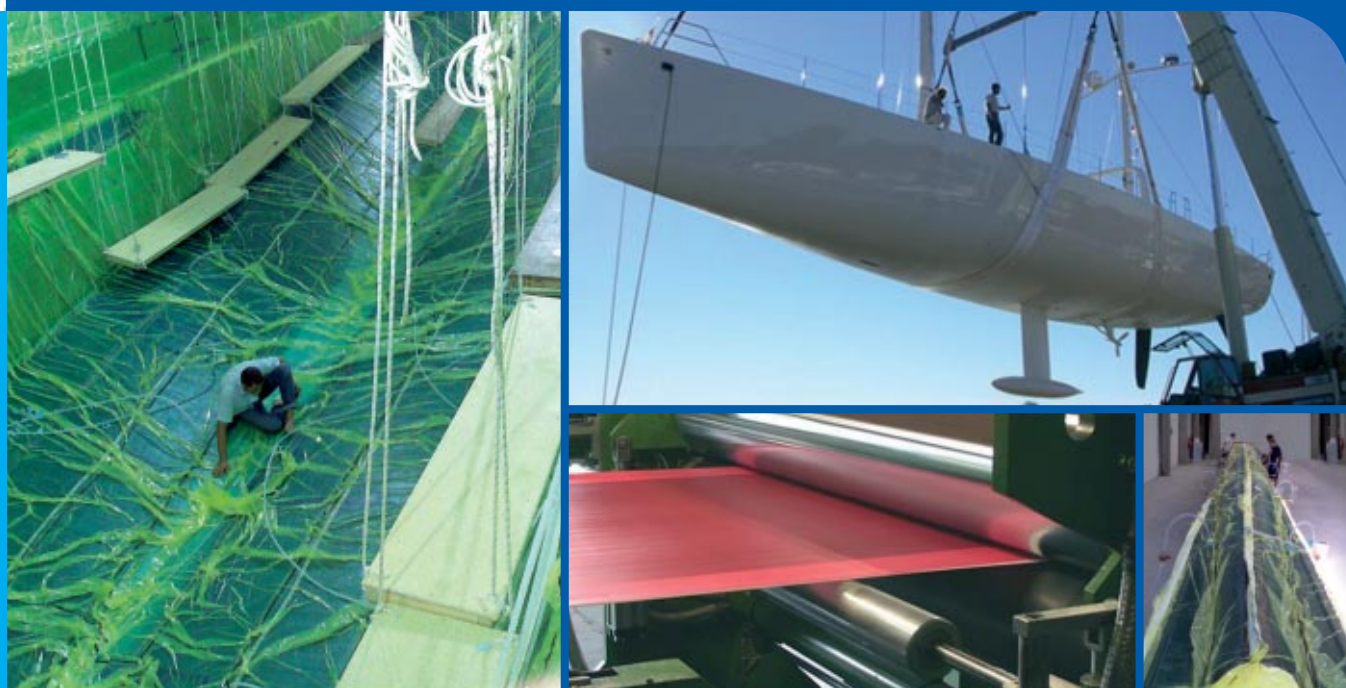
condotte applicando un valore di pressione costante (1-2-5-8-12 bar) per ognuna delle configurazioni esplorate, illustrate in figura 2. La figura 3 riporta il tempo di riempimento, valutato nelle simulazioni numeriche per le tre configurazioni, al variare della pressione di inie-

zione. Come atteso, per ciascuna configurazione analizzata, il tempo di riempimento si riduce al crescere della pressione di iniezione e del numero di inlet. L'incremento del numero di inlet da uno (configurazione a, figura 2) a due (configura-

zione b, figura 2) comporta una riduzione del tempo di riempimento del 28.6% in corrispondenza di una pressione di iniezione pari a 5 bar. Invece, il cambiamento della strategia di iniezione dalla configurazione b alla configurazione c comporta una riduzione del tempo di

ELANTAS Italia

Epoxy resins and structural adhesives for composite materials



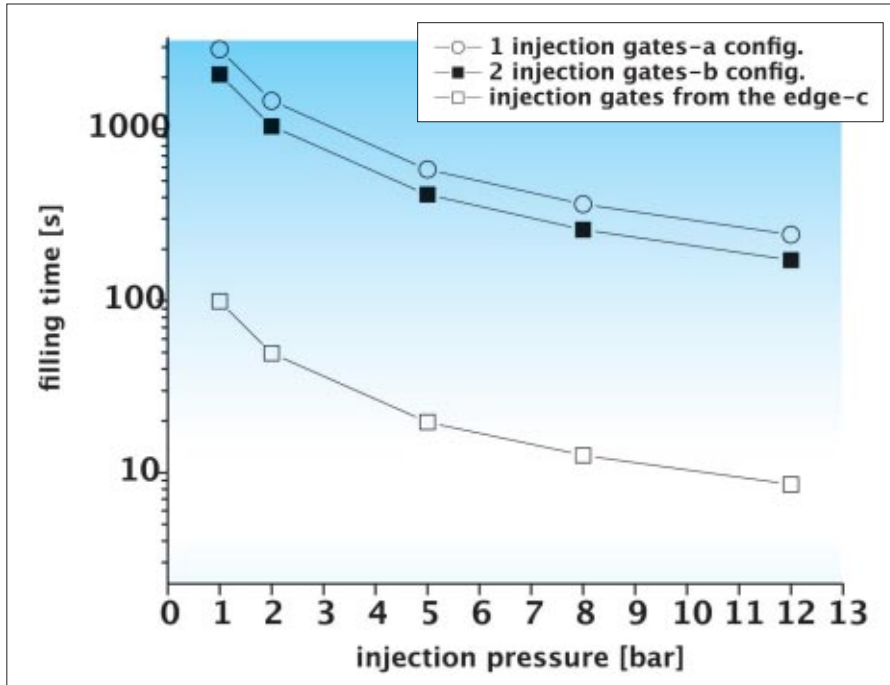


Fig.3: Tempo di riempimento al variare della pressione di iniezione per le tre configurazioni di inlet-outlet analizzate nelle simulazioni numeriche eseguite con RTM-Worx

injection pressure [bar]	a configuration filling time [s]	b configuration filling time [s]	c configuration filling time [s]
1	2920	2080	99.3
2	1460	1040	49.6
5	583	416	19.7
8	365	260	12.6
12	243	173	8.54

Tab.1: Tempo di riempimento simulato al variare della pressione di iniezione per ciascuna delle configurazioni di inlet-outlet analizzata nelle simulazioni numeriche

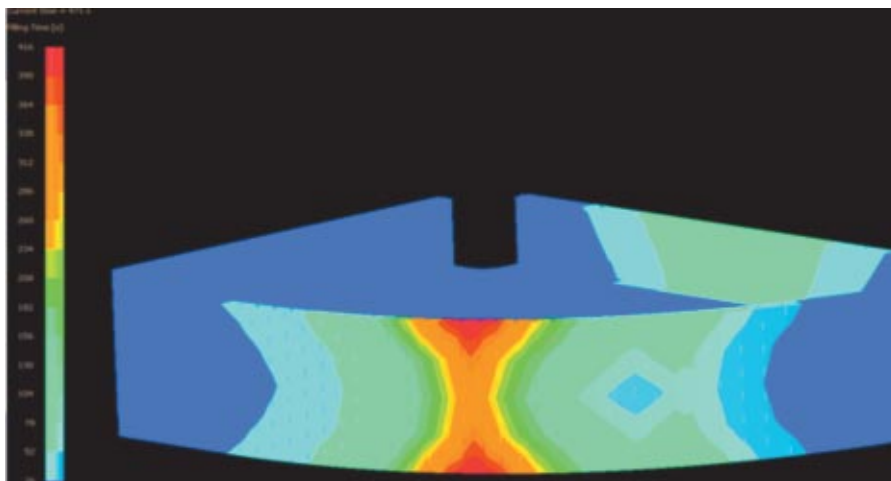


Fig.4: Tempo di riempimento dello stampo simulato per la configurazione di inlet-outlet b; il colore rosso indica tempi di riempimento maggiori

riempimento pari al 95.3%, in corrispondenza di una pressione di iniezione di 5 bar. Tale significativa riduzione si registra sebbene le due configurazioni siano caratterizzate dallo stesso numero complessivo di porte tra ingressi e uscite. La tabella 1 riporta il valore del tempo di riempimento al variare della pressione di iniezione per le tre configurazioni analizzate nelle simulazioni numeriche.

PRODUZIONE DELLA RIB

Come accennato la strategia di iniezione influenza significativamente il costo della tecnologia RTM. In questo caso specifico, l'aumento del numero di inlet, piuttosto che di outlet, comporta un significativo aumento del costo del processo. Infatti, per poter iniettare la resina alla pressione di 5 bar e alla temperatura di 90°C mantenendo lo stampo a 130°C, sono necessari inserti metallici particolari e tubi che colleghino il condotto principale di iniezione della macchina ai vari ingressi predisposti. Tali necessari accorgimenti comportano un notevole aumento di costo e di tempo per la messa a punto, con conseguente ulteriore aumento dei costi della tecnologia. Viceversa, l'aumento del numero di outlet influenza in maniera poco significativa il costo della tecnologia, considerato che in tal caso si possono utilizzare tubi in plastica di tipo comune e inserti meno costosi. Alla luce di queste considerazioni la configurazione c è stata accantonata, mentre la configurazione b è stata selezionata per il processo RTM di produzione della rib, considerato, tra l'altro, che quest'ultima è caratterizzata da una significativa riduzione dei tempi di riempimento rispetto alla configurazione a.

La figura 4 riporta il plot del tempo di riempimento simulato nel caso della configurazione di inlet-outlet b.

Il valore del tempo di riempimento stimato dalle simulazioni numeriche (416s) è in linea con il tempo di riempimento sperimentale (360s), valutato durante un processo di iniezione eseguito a 5 bar secondo quanto indicato dalla configurazione b.

VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEL PROCESSO

Sono state eseguite la caratterizzazione meccanica e l'indagine non distruttiva

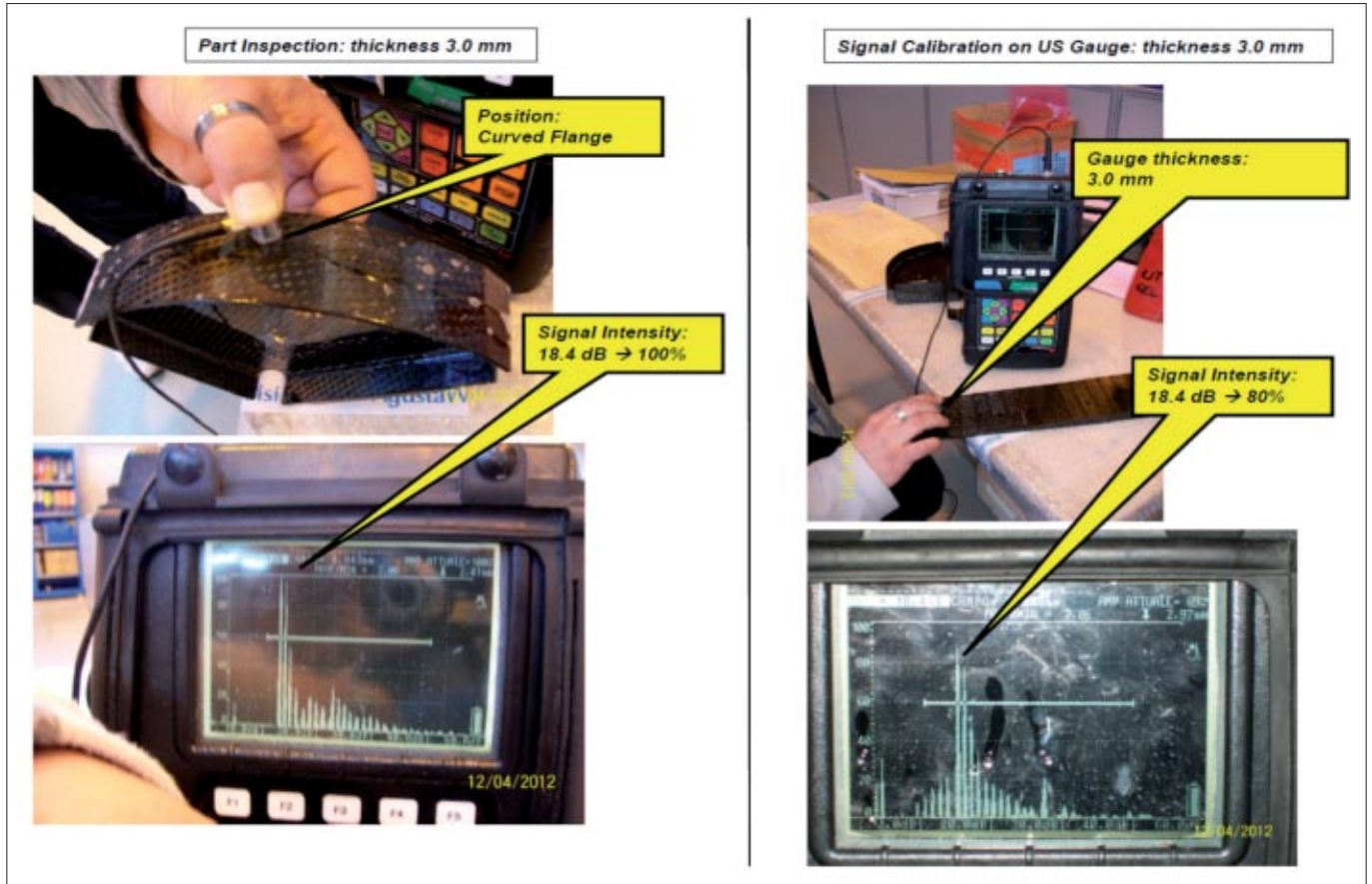


Fig.5: Confronto tra i valori di intensità del segnale ultrasonoro misurati sul campione di riferimento e sulla flangia curva della rib

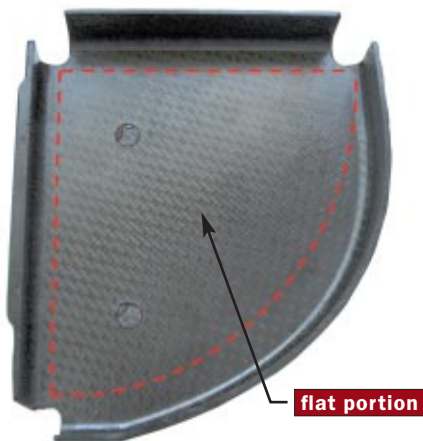


Fig.6: Porzione piana della rib da cui sono stati estratti i provini per la caratterizzazione meccanica

ad ultrasuoni allo scopo di valutare la presenza di eventuali zone del pezzo con impregnazione non ottimale del rinforzo. In particolare, l'indagine ultrasonora è stata eseguita in trasmissione e ha riguardato la completa scansione eseguita "punto-punto" dell'intera rib. Attraverso la misura della velocità delle onde ultrasonore effettuata su un pezzo campione di riferimento (G0926/RTM6) è stata ottenuta una curva di calibrazione. I valori dell'intensità del segnale ultrasonoro misurati sul campione di riferimento e sulla rib (flangia curva) sono riportati in figura 5.

Il segnale ultrasonoro rilevato sulla porzione di rib risulta avere un'intensità superiore a quello misurato sul campione di riferimento. L'interessante risultato dell'indagine non distruttiva, ottenuto in tutte le altre parti componenti la rib, ha evidenziato un'ottimale impregnazione del rinforzo in carbonio durante il processo RTM sviluppato. Per ottenere un'ulteriore validazione della qualità del composito, ottenuto per RTM, è stata eseguita la caratterizzazione quasi-statica della rib. In particolare, sono state valutate le proprietà a trazione, a compressione e a taglio (in accor-

	tensile warp ASTM D3039		compression warp ASTM D 3410		I.L.S.S warp ASTM D 2344	
	datasheet	exp.	datasheet	exp.	datasheet	exp.
strength [MPa]	860	849±37	700	643±24	67	65±2
modulus [GPa]	63	70±3	60	60±5	-	-

Tab.2: Confronto tra i risultati ottenuti dalla caratterizzazione meccanica e i dati riportati nella scheda tecnica del materiale

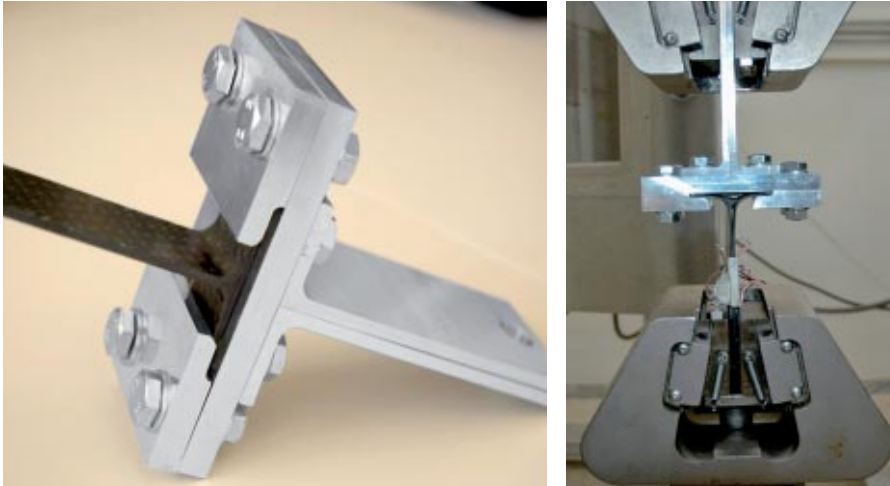


Fig. 7: Schema dell'apparato sperimentale utilizzato per le prove di pull-out su campioni con sezione trasversale a forma di T estratti dalla rib

do con le norme ASTM [12,13,14]) su campioni estratti dalla parte piana della rib, come riportato in figura 6.

I risultati della caratterizzazione meccanica eseguita sono comparati alle proprietà riportate nella scheda tecnica del materiale (tabella 2).

I risultati ottenuti dalla caratterizzazione meccanica sono in perfetto accordo con i dati riportati nella scheda tecnica del materiale e indicano l'elevata qualità del composito ottenuto nella porzione piana della rib aeronautica. Allo scopo di valutare la qualità del composito nella zona della rib maggiormente distante dagli inlet (dove si potrebbe ipotizzare un contenuto di vuoti maggiore) sono state eseguite delle prove di pull-out su provini estratti da tale zona con sezione a forma di T. L'apparato sperimentale utilizzato per tali prove è riportato in figura 7.

La figura 8 riporta il carico in funzione dello spostamento misurato nelle prove di pull-out sui provini a forma di T estratti dalla rib.

I valori di carico massimo ottenuti nelle prove di pull-out sono in buon accordo con i dati ottenuti in simulazioni numeriche relative alla stessa geometria a T.

CONCLUSIONI

In questo studio è stata sviluppata una strategia di iniezione per la produzione mediante la tecnologia RTM di una rib aeronautica. Il software RTM-Worx è stato utilizzato con successo nell'individuazione della strategia di iniezione e del posi-

zionamento di inlet ed outlet, in modo da garantire, al tempo stesso, il minimo tempo di riempimento dello stampo e l'ottimale impregnazione della preforma. I valori dei tempi di riempimento simulati sono in linea con i tempi di riempimento sperimentali, rilevati durante la fase di produzione della rib aeronautica. I risultati della caratterizzazione meccanica eseguita indicano eccellenti proprietà meccaniche della rib aeronautica prodotta per RTM, validando la strategia individuata, mediante analisi numerica, e adottata in fase di produzione. ■

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento a Paolo Zanzola di Hexcel, per la collaborazione nella fornitura del materiale utilizzato.

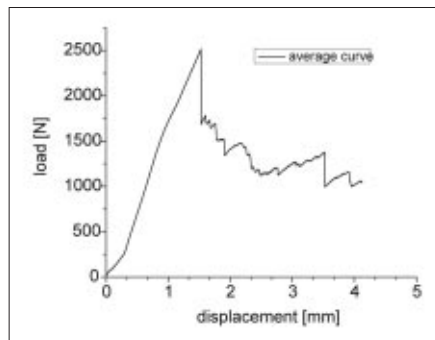


Fig. 8: Carico in funzione dello spostamento misurato in prove di pull-out su provini con sezione trasversale a forma di T, estratti dalla rib finita

RIFERIMENTI REFERENCES

- [1] Potter KD. The early history of the resin transfer molding process for aerospace applications. *Compos Part A* 1999;30:619-21.
- [2] Benjamin B. Composite baseball bats with striking features. *Reinforced Plastics* 2002;46(6):52-5.
- [3] Kim PJ, Lee DG. Surface quality and shrinkage of the composite bus housing panel manufactured by RTM. *Compos Struct* 2002;57:211-20.
- [4] Hinrichsen J, Bautista C. The challenge of reducing both air-frame weight and manufacturing cost. *Air Space Europe* 2001;3(3-4):119-21.
- [5] Mathur R, Fink BK, Advani SG. Use of genetic algorithm to optimize gate and vent locations for resin transfer molding process. *Polym Compos* 1999;20(2).
- [6] Young WB. Gate location optimization in liquid composite molding using genetic algorithms. *J Compos Mater* 1994;28(12).
- [7] Liu B, Bickerton S, Advani SG. Modeling and simulation of resin transfer molding (RTM)-gate control, venting and dry spot prediction. *Compos:Part A* 1996;267A(2).
- [8] Phelan Jr FR. Simulation of the injection process in resin transfer molding. *Polym Compos* 1997;18(4).
- [9] Jiang S, Zhang C, Wang B. Optimum arrangement of gate and vent locations for RTM process design using a mesh distance-based approach. *Compos :Part A* 2002;33:471-481.
- [10] Chae HS, Song YS, Ryoun Youn JR. Transverse permeability measurement of a circular braided preform in liquid composite molding. *Korea-Australia Rheology Journal*: 2007;19(1):17-25.
- [11] H.Darcy. *Les fontaines publiques de ville de Dijon*. Dalmont, Paris, 1857.
- [12] ASTM D 2344/D 2344M ¹ Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.
- [13] D 3410/D 3410M - 95 Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.
- [14] ASTM D3039 / D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

by Riccardo Gennaro, Silvio Pappadà* - Antonio Caruso** - Gianluca Massaccesi***

Numerical simulation of a complex aircraft component

In this work RTM Worx software was used to define the RTM process for an aeronautic rib, thus allowing a significant process optimization, as testified by the results of the experimental characterization and non destructive inspection (NDI) using ultrasonic testing.

Resin transfer molding process (RTM) is rapidly gaining acceptance as one of the most promising manufacturing routes for composite structures in sectors such as the aerospace and automotive industries, for its possibility to manufacture high performance composite components with complex shape. Anyway in RTM process different aspects have to be properly defined, such as preform shaping and the placement of gates and vents. The definition of the different stages of the process is non intuitive and may require expensive repetitive experimentation. For this purpose different FE softwares and approaches were developed to simulate the mould filling in different conditions. Resin transfer molding (RTM) is a versatile and efficient fabrication method for low to medium volume, high-performance polymer composite structures because of its relatively low equipment and tooling costs, short cycle times and improved design flexibility [1-4]. In the RTM process, the gate and vent locations play a crucial role, since they influence the preform impregnation and the related void content, that dictate the quality and the properties of the final product. For this purpose different optimization methods were developed to find the gate and vent locations, in order to promote a favorable flow and prevent dry spots and voids. In addition the arrangement of injection gates and vents of the mold has a significant impact on process efficiency and produc-

tion costs [5-9]. In this paper, a study for optimum design of RTM tooling to manufacture an aerospace carbon-epoxy composite rib was developed. Numerical simulation of the mold filling process during resin transfer molding were carried out to find the optimal positioning of the injection gates and of the air vents, in order to achieve the complete filling of the mold in the shortest time. Finally the defined process was experimentally validated by means of Non Destructive Inspection (NDI), flexural and tensile tests on specimens obtained by the flat portion of the rib manufactured with the defined process.

MATERIALS AND METHODS

La preforma impiegata per la produzione della rib è stata realizzata mediante la formatura in apposito stampo di un tessuto bilanciato in carbonio (G0926 fornito da Hexcel) sul quale è presente un binder epossidico. Il tessuto di rinforzo presenta una grammatura di 370 g/m², una frazione di fibra pari al 57% e uno spessore nominale pari a 0.38 mm. L'impregnazione della preforma è stata effettuata mediante l'impiego di resina epossidica RTM6, fornita da Hexcel. The dry preform used for the rib manufacturing was obtained shaping a balanced epoxy-powered carbon fabric into a dedicated tool, the Injectex G0926 supplied by Hexcel. This fabric has a nominal surface weight of 370g/m² and allow a fiber volume fraction of 57% and a nominal thickness of 0.38 mm with

RTM process. The preform was impregnated with RTM 6 (supplied by Hexcel), a premixed epoxy system for service temperatures from -60°C up to 180°C using the Hypajet MK III injection machine. The heated resin (resin temperature 90°C) was injected into the mould (heated up to 130°C) with a constant pressure of 5 bar. The filling time was evaluated by recording resin coming out of the vent ports (linked with the vacuum source through transparent tubes). Cure was performed isothermally increasing the mould temperature up to 160°C and holding for 75 minutes. After completion of the first cure cycle, the rib was cooled to room temperature and removed from the mould, then post-cured in an oven at 180°C for 2 h. The pictures of the dry preform and of the final rib are reported in figure 1.

NUMERICAL SIMULATIONS

Numerical simulations of RTM process were carried out using RTM-Worx, a simulation code that uses the Finite Element and Control Volume methods to solve the physical equations that govern flow of a resin through a porous medium.

In order to minimize the mould fill time and to avoid dry spot the optimization of inlet and vent location was studied by simulating the mould filling through three different configurations as reported in figure 2, where the different positioning of the injection and vent ports is schematized.

A proper mesh, including a number 79848 nodes and 94580 triangles, was kept constant for each configurations.

In order to simulate the RTM process, to the knowledge of the reinforcement in plane permeabilities K1 and K2 and of the transversal permeability K3 is generally necessary. However, since the aircraft rib is basically characterized by a constant and small thickness (average thickness = 3 mm) the transverse permeability was neglected [10], thus considering just in plane permeabilities in the simulations. Moreover K1 and K2 are equal since the a balanced stacking sequence was used for the component. In order to evaluate the in plane permeability liquid infusion experiments were performed, where the resin front position was monitored and a value of the permeability

equal to $1.68E-11 \text{ m}^2$ was obtained by means of Darcy law equation [11].

The numerical simulations were carried out applying a constant pressure and the injection pressure was used as independent variable. For each configuration, reported in figure 3, five values of injection pressure (1-2-5-8-12 bar) were explored. The filling times, evaluated using numerical simulations, as a function of injection pressure for the three different port designs previously described (figure 2) are reported in figure 3.

As expected, for each configuration the filling time decreases with increasing the injection gates and the number of gates. The increase of injection gates from one (a configuration, figure 2) to two (b configuration, figure 2) involves in a reduction of the filling time, equal to 28,6% in correspondence of a injection pressure equal to 5 bar.

Instead the change of the injection strategy according to the c configuration causes a significant reduction of the filling time up to 95.3% for a injection pressure of 5 bar in comparison with b configuration (in which there is the same total ports number).

The filling times as a function of injection pressure for each configuration simulated are reported in table 1.

RIB MANUFACTURING

As previously described, injection strategy strongly affects the cost of RTM process. In this case, increasing the number of injection ports significantly increase the costs, more than increasing the number of vent ports. In fact in order to inject the resin at 5 bar and 80°C into the mould at 130°C, special metallic inserts and tubes are required to link the machine injection tube to the different injection ports, which are expensive both in terms of time required for mould set-up and supplying costs. Instead for the vent ports normal plastic tubes can be used together with less expensive inserts. For this reason c configuration was rejected, and the configuration b, which ensures a short cycle times in comparison with a configuration, was chosen for the production of the rib. The numerical results for the simulated filling time for b configuration are reported in the contour plot of figure 4.

The estimated value of filling time (416 s) is in very good agreement with the experimental value (360s), evaluated for an injection process at 5 bar in correspondence of b configuration.

EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE PROCESS

Since the presence of dry spot governs the mechanical properties and dynamic response of composite the non destructive inspection (NDI) using ultrasonic testing was performed. A scan "type point-to-point" was performed in transmission on the rib. The construction of calibration curve for the given material (G0926/RTM6) was obtained by means of the measurement of ultrasonic wave velocities on the gauge. The values of the signal intensity measured on the gauge and on the rib (curved flange) were reported in figure 5.

The ultrasonic signal intensity detected on the final rib is higher than the signal on the gauge.

Thus the ultrasonic inspection ensures that the final rib is a dry spot-free composite.

In order to evaluate the quality of the developed RTM process set-up, a quasi-static mechanical characterization of aircraft rib was performed. At first basic mechanical properties, including tensile, shear, and compression properties, were evaluated according to ASTM standards [12,13,14] testing standard specimen obtained from the flat portion of the rib (figure 6).

The results of mechanical characterization were compared with the datasheet values as reported in table 2. The results of mechanical characterization are in very good agreement with the datasheet values, thus proving the good quality of the developed process in the flat portion of the rib. Then in order to validate the process in the regions more distant from the injection ports (where a higher void content is generally expected) pull-out test on T-shape samples cut from the rib were carried out according to the experimental set-up show in figure 7. The load as a function of displacement measured in pull-out test on T-shape samples is a reported in figure 8.

Also the maximum load values obtained with this test are in good agreement with

numerical data obtained from FE simulation on the same T geometry.

CONCLUSIONS

In this study an injection strategy to produce an complex aircraft rib using RTM process was developed. RTM-Worx has been successfully applied to determine the effective injection strategy including the position of injection gates and vents, and the most effective values of parameters for minimum mould filling time without formation of dry spot. The simulation results regarding the filling time are in very good agreement with experimental results.

The results of mechanical characterization shows excellent properties of aircraft rib manufactured indicating the effectiveness of strategy used in RTM process. ■

Acknowledgement

Special thanks should be given to Paolo Zanzola from Hexcel for its cooperation in material supplying.

All the mentioned figures refer to the italian version

Fig.1: Dry preform and of the final rib manufactured by CETMA

Fig.2: Schematic views of the three different gate configurations studied, where the white and blue arrows indicates the injection gates and the vent points respectively

Fig.3: Comparison of filling time vs pressure injection for the three different configurations

Tab. 1: Filling times as a function of injection gate designs and injection pressure

Fig.4: Simulated filling time for b configuration, red color indicates higher filling time

Fig.5: Comparison between the signal intensity measured on the gauge and on the curved flange of the rib

Fig.6: Flat portion of the rib used to obtain testing standard specimen

Tab. 2: comparison between results of mechanical characterization and datasheet values

Fig.7: Sketch of experimental setup used pull-out test on T-shape samples

Fig.8: Load as a function of displacement measured in pull-out test on T-shape samples