



# Numerical methodologies to predict aerospace composite behavior during the autoclave cycle

S. Catalini, D. Malacaria – Dema Spa  
In collaboration with MSC Software and University of Naples.

In aerospace, the qualification process for the manufacturing of composite part is a time and cost consuming activity.

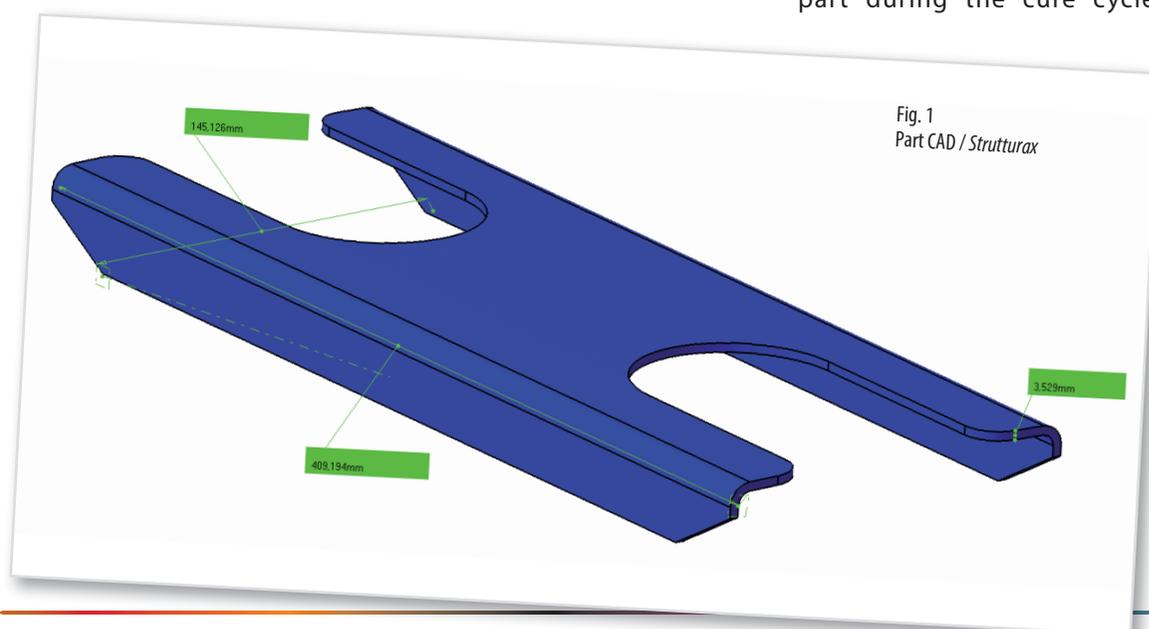
Quality procedure establishes the qualification requirements and test procedures to qualify the manufacture of composite parts following several steps. Part Tool Thermal Profile (PTTP) Activity is one of these steps in which using a tool trial out and performing the desired thermal profile in autoclave, the quality operator identifies the leading and lagging thermocouples (TC) and he determinates the final position of the TC that will thermally monitor the entire cure cycles.

Results from TC will guaranty

that thermal profile in autoclave is in accordance with the

requirements. DEMA engineering team has developed a numerical

procedure to simulate by MSC Marc / Mentat the thermo-structural behavior of the part during the cure cycle



## Metodologie numeriche per predire il comportamento delle strutture aeronautiche in composito durante il processo in autoclave

S. Catalini, D. Malacaria – Dema Spa  
In collaborazione con MSC Software e Università di Napoli.

Nel settore aeronautico, la qualifica del processo di manufacturing di parti in composito è un'attività dispendiosa. Le procedure di qualità stabiliscono i requisiti di qualifica e la procedura per ottenere tale qualifica attraverso la realizzazione di diverse fasi di lavoro.

L'attività di Part Tool Thermal Profile (PTTP) è una di queste attività nella quale l'operatore della qualità, attraverso una serie di test in autoclave, decide quali sono le uniche due termocoppie

(TC) che dovranno essere utilizzate durante il processo di manifattura per monitorare il processo.

I dati estratti da tali TC saranno utilizzati per garantire che durante il processo di cura non ci siano state deviazioni rispetto al profilo termico richiesto.

Gli ingegneri del team di Strutturax e Tecnologie di DEMA hanno sviluppato, attraverso l'uso di MSC Marc / Mentat che implementa il modello di cura di Schott, una procedura numerica

capace di simulare il comportamento termo-meccanico della parte in autoclave. Nelle simulazioni effettuate è necessario tener conto dell'attrezzo di cura per controllare il ritiro volumetrico della parte.

I risultati ottenuti sono perfettamente in accordo con i dati sperimentali delle termocoppie e con gli NDI effettuati dopo il processo di cura e quindi il modello numerico può ritenersi validato per la valutazione del ritiro volumetrico e degli stress/strain

residui, per l'ottimizzazione del processo in autoclave (temperatura, pressione e tempo) e per la definizione del PTTP.

Le attività sono state condotte in collaborazione con MSC Software e la Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione.

### Introduzione

L'obiettivo dello studio affrontato da DEMA è quello di avvalersi di un codice FEM, nello specifico MSC Marc/Mentat, al fine di velocizzare

using Schott's curing model. In the simulation the cure tool need to be take into account to control the shrinkage of the part. Results are in accordance with TC experimental data and with NDI tests validating the model to be used for cure shrinkage and residual stress/strain evaluation, autoclave cycle (temperature, time and pressure) optimization and PTPP assessment. The activities was developed in collaboration with MSC Software and Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione.

#### Introduction

The goal of the study performed by DEMA is to use MSC MARC/MENTAT to optimize some steps for the qualification of the entire manufacturing process:

Part Tool Thermal Profile (PTTP) Activity is one of these steps in which using a tool trial out and performing the desired thermal profile in autoclave, the quality operator identifies the leading and lagging thermocouples (TC) and he determinates the final position of the TC that will thermally monitor the entire cure cycles. Another step is to calibrate the cure parameters of the autoclave such as temperature, pressure and time, which should respect the requirements of the client.

#### Thermo-Structural Analysis

The chosen part is a symmetric and balanced laminate, of 18 plies of carbon fiber reinforced epoxy matrix. (Fig. 1) The simulation has been performed using the Scott cure kinetic model based on the

ed ottimizzare la certifica dell'intero processo produttivo intervenendo in alcune delle sue fasi: una di queste è la fase di calibratura dell'autoclave rispetto ai parametri di tempo, pressione e temperatura, richiesti dai requisiti di processo del cliente per la quale sono necessari vari test in autoclave; un'altra fase è l'analisi delle termocoppie PTPP (Part Tool Thermal Profile) attraverso la quale si stabilisce il numero minimo e la posizione ottimale delle termocoppie stesse, scegliendo la termocoppia più veloce (leading) e la termocoppia più lenta (lagging) per monitorare l'intero processo in autoclave.

#### Analisi Termo-Meccanica

La struttura scelta per il settaggio della metodologia numerica è un laminato simmetrico bilanciato di 18 plies di fibra di carbonio a

matrice epossidica. (Fig. 1) La simulazione è stata effettuata scegliendo il modello cinetico di cura di Scott che si basa sulla teoria della lastra piana e calcola il grado di cura in funzione del calore scambiato secondo questa legge:

$$\alpha = \frac{H(t)}{H_r} = \frac{\int_0^t \frac{1}{\rho} \left( \frac{dq}{dt} \right) dt}{H_r}$$

In (Fig. 1a) è indicata la scheda di Marc che implementa i coefficienti per il calcolo del grado di cura in funzione del modello di Scott. Da ciò si è sviluppata una procedura numerica capace di simulare il comportamento termo-meccanico del laminato composito in autoclave. Nelle simulazioni effettuate si è tenuto conto anche dell'interazione con l'attrezzo di cura, simulando quest'ultimo ed attivando la scheda dei contatti per controllare il

# Openair<sup>®</sup>

Atmospheric Plasma Technology

#### GREEN, FAST AND SECURE

- microfine cleaning
- simultaneous activation
- functional nano-coating

#### BENEFITS

- large format pretreatment
- stability improvement of CFRP components
- elimination of release agents
- reliable bonding of multilayer composites
- optimal paint adhesion and appearance
- energy efficient and cost saving

plate theory. For Scott's model the degree of cure is function of the heat:

$$\alpha = \frac{H(t)}{H_r} = \frac{\int_0^t \frac{1}{\rho} \left( \frac{dq}{dt} \right) dt}{H_r}$$

Fig.1a reports the MARC card where values and coefficients of the Scott's model have been implemented. It has been developed a numerical procedure that simulates structural/thermal behavior of the composite part during the curing process. For these simulations even the interaction between the part and the tool has been taken in account, using the contact status has been evaluated the heat transfer from the tool to the part and vice-versa so the cure shrinkage and the residual stress could be analyzed.

The first structural/thermal analyses has been performed using a 3D FE model with hexa8 elements, simulating the thermal cycle of the air flow inside the autoclave like a thermal load of forced convection (face film) applied on the top surface of the part.

Laminate mechanical properties have been implemented, in particular the thermal expansion coefficients useful for the evaluation of the thermal strain. The Bogetti-Gillespie model has been used for the evaluation of the cure shrinkage, that is the strain due to the thermoset matrix polymerization. (Fig. 2) Thereafter have been set up the boundary conditions: the autoclave operative pressure modeled like a "face load" and applied to the top surface of the

Fig. 1 a  
Scott's model in MSC Marc / Modello di Scott nell'MSC Marc

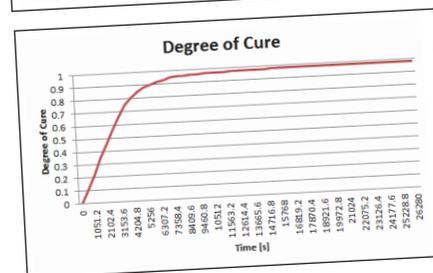
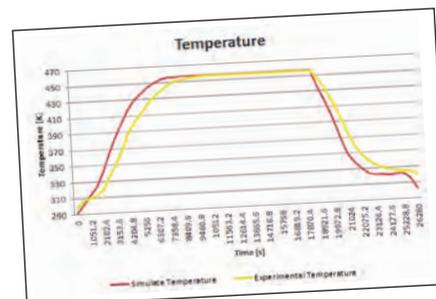
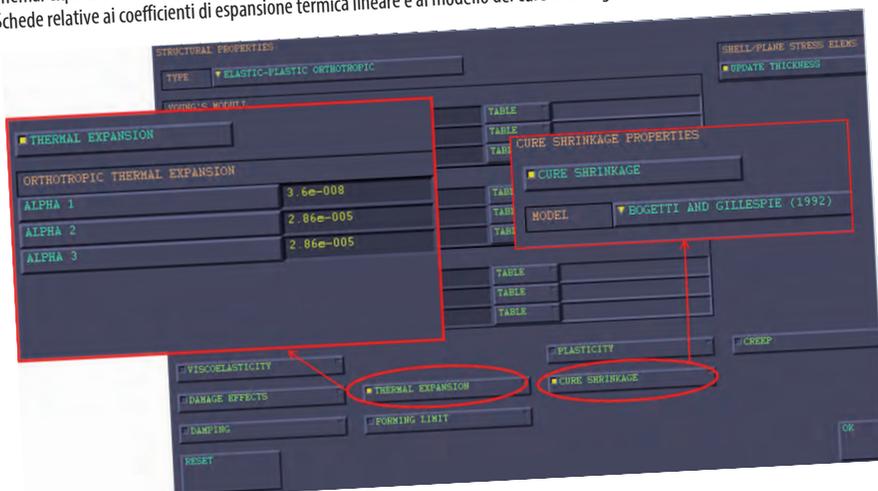


the trend of the temperature in autoclave at except of an advance in the heating phase and during the cooling phase due to the fact that the vacuum bag has not been simulated, in this first phase, and this has therefore produced a lower thermal inertia. The result obtained in terms of performance

of the degree of care indicates that the laminate has cured completely, having reached the horizontal asymptote already in mid-process. With this data it's possible to think of an optimization process in terms of time and consequently costs, avoiding to use the autoclave

laminare; the constraints that simulate the tool applied to the bottom surface. A first analysis of the results obtained through the nonlinear solver implicitly focused on thermal curves and the degree of cure of the laminate (Fig. 3): it's fast to see how the temperature obtained from the simulation respects

Fig. 2  
Thermal expansion coefficients and model of cure shrinkage  
Schede relative ai coefficienti di espansione termica lineare e al modello del cure shrinkage



trasferimento di calore tra le parti: ciò ha consentito di valutare il ritiro volumetrico e gli stress residui nel laminato. Le prime analisi termo-meccaniche sono state condotte su un modello 3D, elementi hexa8, simulando il

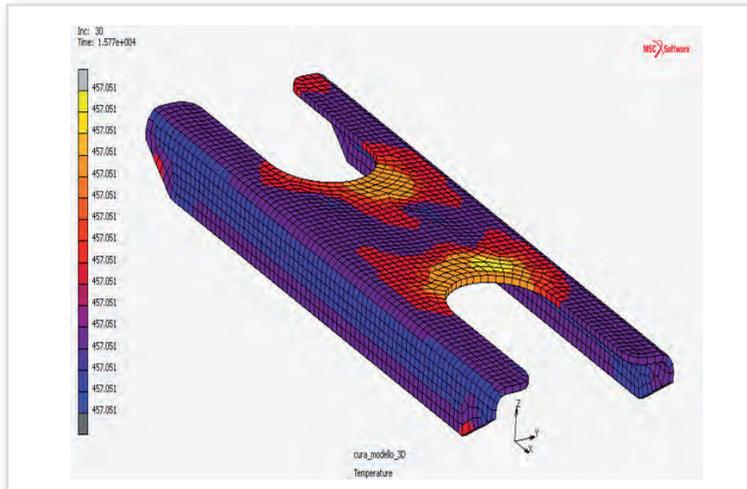
ciclo termico di cura relativamente al flusso di aria calda all'interno dell'autoclave come un carico termico di convezione forzata (face film) applicato sulla superficie superiore della parte. Nel modello sono state inserite

le proprietà meccaniche del laminato, attivando in particolare la scheda relativa ai coefficienti di espansione termica lineare, necessari per valutare i thermal strain, e quella relativa al modello di Bogetti-Gillespie, necessario per valutare gli shrinkage strain,

ovvero le deformazioni legate al fenomeno del "cure shrinkage", ossia il ritiro volumetrico che interessa la matrice termoindurente per effetto della reazione di polimerizzazione. (Fig. 2). Si introducono infine le boundary conditions: la curva relativa alla pressione di esercizio dell'autoclave, inserita come un

more than time strictly required. About the residual strain, the result that gives more influence is the Normal Total Strain curve, that highlights the main mechanisms of strain, and consequently of residual stresses, and appear to be the phenomena of cure shrinkage and thermal deformations. (Fig. 4)

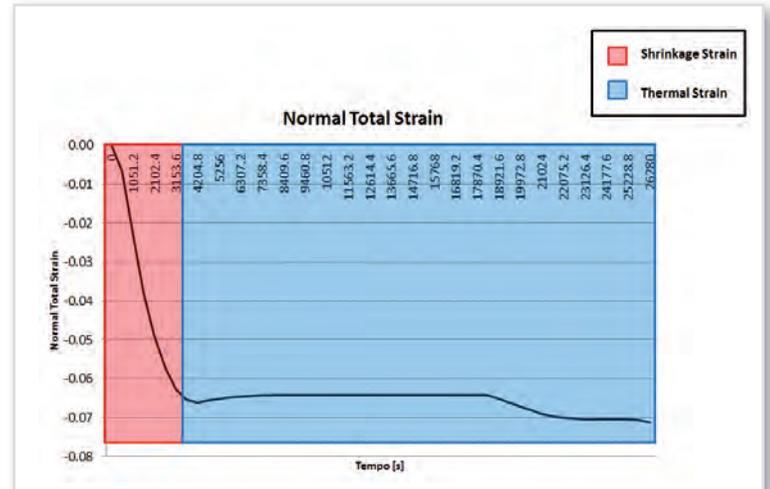
Fig. 3  
Thermal curves and degree of cure / Temperatura e Grado di cura



“face load” ed applicata sulla superficie superiore del laminato; i vincoli che simulano l'attrezzo di cura, applicati ai nodi della porzione inferiore del modello.

Una prima analisi dei risultati ottenuti attraverso il solutore non lineare implicito si è concentrata sulle curve termiche e sul grado di cura del laminato (Fig. 3): si può

Fig.4  
Normal Total Strain / Curva dei Normal Total Strain



### Thermo-Structural Analysis using Contact

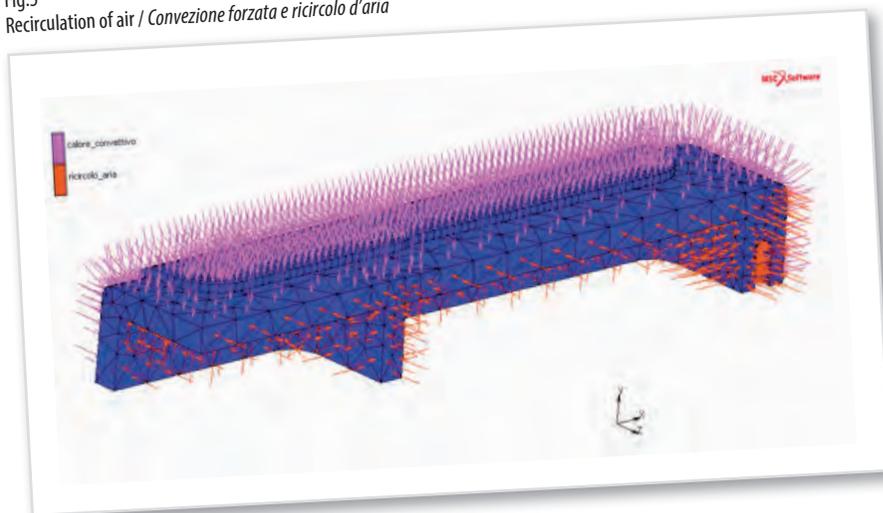
The goal of the Thermo – mechanical analysis, activating the contact between the parts, is to evaluate the effects of the curing tool on the composite laminate during the entire curing process; it's possible this through the introduction in the FEM of the thermal contact, in other words the exchange of heat due to a conductive mechanism that is established between the curing tool and the laminate.

Therefore the model is similar to the one previously described, with, in addition, the simulation of the curing tool, for which are introduced the material properties (Aluminum alloy 7075), and considering now a laminate with a simpler geometry, of course with a new stacking sequence. Furthermore, the boundary

conditions have a second mechanism of convection due to the recirculation of air under the tool and this has been simulated such as a natural convection. (Fig. 5)

To take into account the thermal contact it has been used the "contact bodies" table; MSC MARC handles this contact with a 2x2 matrix (only two parts are concerned), and it's activation establishes the mutual contact, in particular the heat exchange, between the laminate and curing tool and vice versa. Elaborating the results, it is interesting to focus the attention on the first one that is the contact status that is the demonstration

Fig.5  
Recirculation of air / Convezione forzata e ricircolo d'aria



of a correct simulation of the thermal contact between the tool and the laminate (Fig. 6); secondly it has been verified the temperature results, comparing the simulated curve of the tool, in green, with those concerning the laminate, the simulated and the experimental curve respectively in red and in blue (Fig. 7);

the fact that comes out is the curve related to the curing tool that is lagging behind those of the laminate, because of the greater thermal inertia that has the tool, being more massive of the laminate; this is a confirmation of the ability of the software MSC MARC to correctly assess the thermal inertia as a function also of the

notare subito come l'andamento della temperatura ricavata su un nodo del modello rispetti l'andamento della temperatura letta dalla termocoppia a meno di un anticipo nella fase di riscaldamento e nella fase di raffreddamento dovuto al fatto che non è stato simulato, in questa prima fase, il sacco a vuoto e ciò ha quindi prodotto un'inerzia termica minore. I risultati ottenuti in termini di andamento del grado di cura indicano che il laminato ha curato completamente, avendo raggiunto l'asintoto orizzontale già a metà processo.

Con questo dato si può pensare ad una eventuale ottimizzazione del processo in termini di tempi e di conseguenza di costi, evitando di tenere l'autoclave accesa più del necessario.

In merito agli strain residui, il risultato su cui porre maggiormente l'attenzione è relativo alla curva

dei Normal Total Strain, che mettono in evidenza come i principali meccanismi di determinazione di strain, e conseguentemente di stress residui, risultano essere il fenomeno del cure shrinkage e delle deformazioni termiche. (Fig. 4)

### Analisi termo-meccanica con contatto

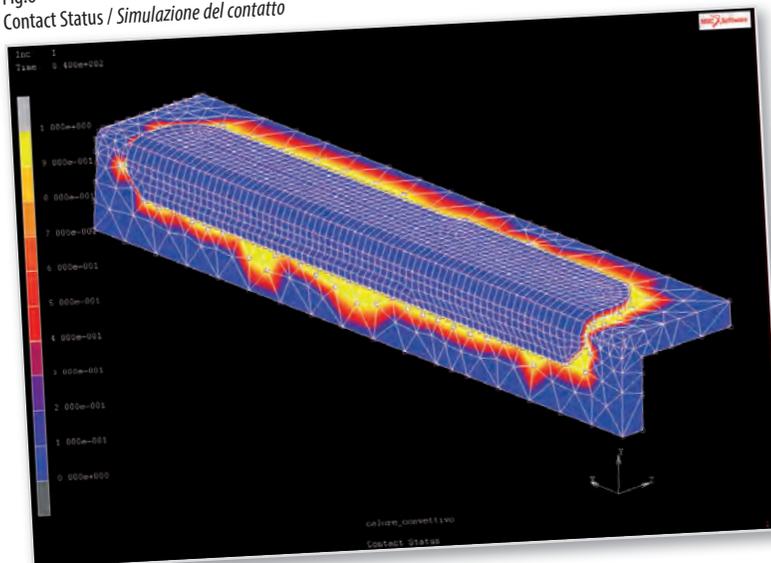
Obiettivo dell'analisi termo-meccanica con contatto invece, è quello di valutare gli effetti che l'attrezzo di cura ha sul laminato composito durante l'intero processo di cura, attraverso l'introduzione nel modello FEM del contatto termico, ovvero lo scambio di calore per meccanismo conduttivo che si instaura appunto tra l'attrezzo di cura ed il laminato.

Pertanto il modello è simile a quello precedentemente descritto, con in aggiunta la presenza dell'attrezzo di cura, per cui si introducono le proprietà del materiale che

lo costituisce (lega di alluminio 7075), e per il fatto di considerare ora un laminato di geometria relativamente più semplice, e quindi una nuova stacking sequence. Inoltre le condizioni al contorno

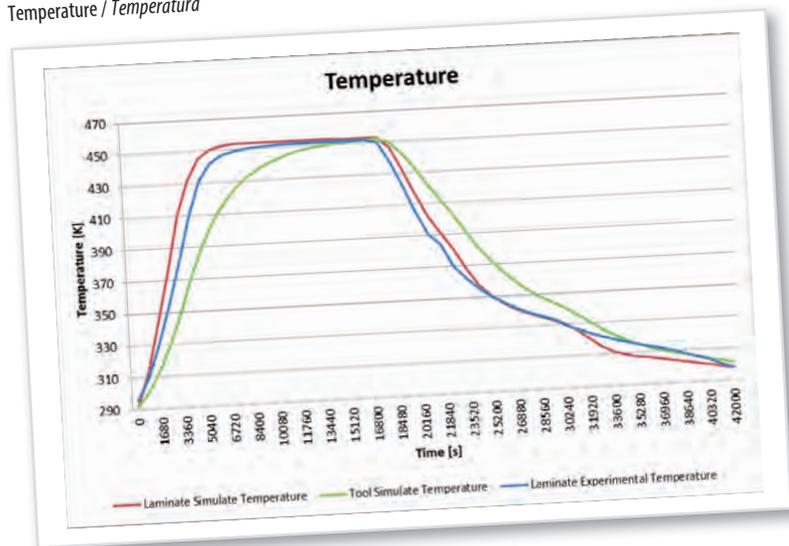
si arricchiscono di un secondo meccanismo di convezione, quello che tiene conto del ricircolo di aria che investe la parte inferiore dell'attrezzo di cura, presa in considerazione come una convezione

Fig.6  
Contact Status / Simulazione del contatto



geometry, and not only of the material of the parts analyzed. Regarding the temperature curves of the laminate, it's good to notice that the curve simulated, during the cooling phase, is behind the experimental curve; this is possible because of the

Fig. 7  
Temperature / Temperatura



naturale. (Fig. 5)

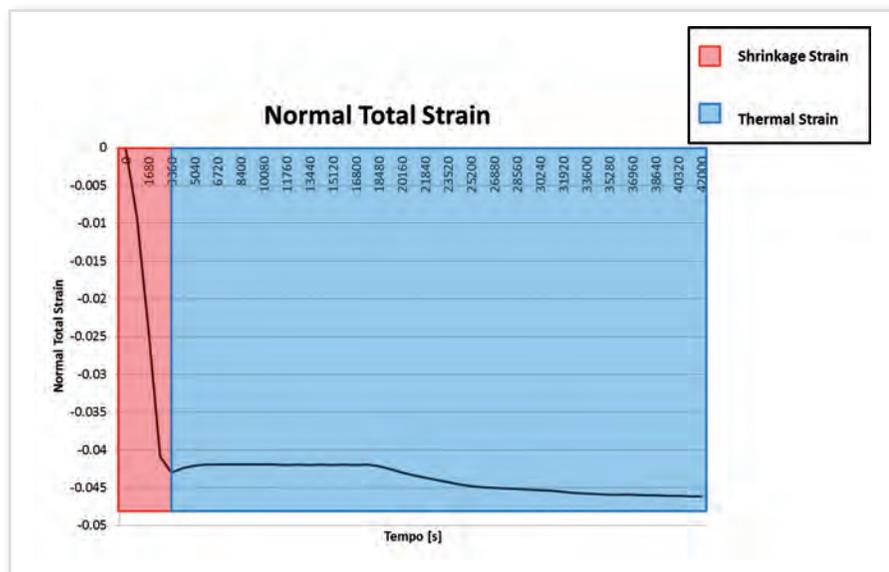
Per tenere conto dunque, del contatto termico, si attiva la scheda di "contact bodies"; a partire da queste, il software MSC MARC gestisce il contatto con una matrice 2x2 (perché soltanto due parti sono interessate), la cui attivazione stabilisce appunto il mutuo contatto, nello specifico lo scambio di calore, tra attrezzo di cura e laminato e viceversa.

Nello studio dei risultati disponibili per tale analisi, si pone dapprima l'attenzione sul contact status che è dimostrazione della avvenuta e corretta simulazione del contatto termico tra attrezzo di cura e laminato (Fig. 6); in secondo luogo si verificano i risultati relativi

alla temperatura, mettendo a confronto la curva simulata relativa all'attrezzo di cura, in verde, con quelle relative al laminato, quella simulata in rosso e quella sperimentale in azzurro (Fig. 7); il dato che emerge è che la curva relativa all'attrezzo di cura è in ritardo rispetto a quelle del laminato, in ragione di una maggiore inerzia termica che gli compete, essendo più voluminoso del laminato; questa è una conferma della capacità del software MSC MARC di valutare correttamente l'inerzia termica in funzione anche della geometria, e non solo del materiale delle parti analizzate.

In merito alle curve di temperatura del laminato, si nota ora, come la curva simulata risulti, nella parte di raffreddamento, in ritardo rispetto a quella sperimentale;

Fig. 8  
Normal Total Strain / Strain totali



introduction of the thermal contact with the curing tool that is still hot and continues

to release heat to the laminate. Moreover, the results related to the residual strain confirm

the considerations made previously, and therefore the shrinkage phenomena and the thermal strain appear to be the main mechanisms of the strain and residual stress in the part. (Fig. 8)

About the residual stress, finally, it's important to emphasize that the curve shows how the stress have been almost completely relaxed at the end of the process. (Fig. 9)

Such investigations can control even the cure shrinkage in a very accurate manner, in fact plotting the

volumetric shrinkage trend. (Fig. 10)

It's important to focus the attention to how this trend is concordant with the curves obtained experimentally throughout the literature, so we have as output even the percentage of total volumetric cure shrinkage of the part.

### Conclusion

This preliminary study undertaken and described here, opens a new frontier in the cure process simulation field, intended in particular to optimize the qualification and certification of composite materials used in the aircraft manufacturing. The next step of the study provide the modeling of the entire tool by including all parties, in order to determinate the optimal location of the thermocouples,

questo in virtù della introduzione del contatto termico con l'attrezzo di cura che continua a rilasciare calore al laminato. Inoltre i risultati relativi agli strain residui confermano le considerazioni fatte precedentemente, e quindi il cure shrinkage ed il thermal strain risultano essere i principali meccanismi di determinazione di strain e stress residui. (Fig. 8)

Relativamente agli stress residui infine, da sottolineare come la curva mette in evidenza che questi vengono quasi completamente rilassati alla fine del processo. (Fig. 9)

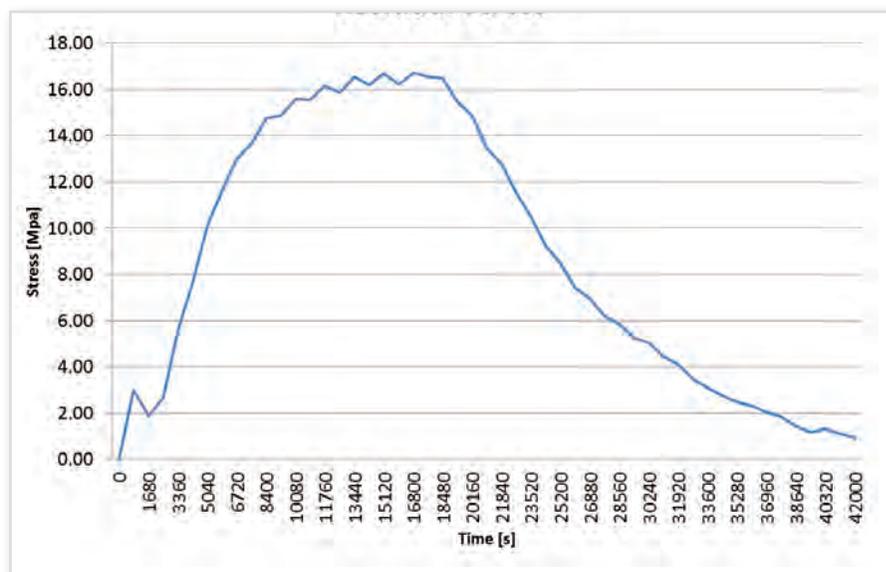
Con queste analisi si può tenere sotto controllo anche il cure shrinkage in maniera abbastanza precisa, infatti plottando l'andamento del volumetric cure shrinkage (Fig. 10) si può notare come questo sia concorde a curve presenti in letteratura ottenute sperimentalmente, quindi abbiamo come output anche la percentuale di ritiro volumetrico

globale della parte.

### Conclusioni

Gli studi preliminari qui descritti aprono una nuova frontiera di analisi e simulazione dei processi in autoclave, volti in particolare ad ottimizzare le fasi di qualifica e certificazione dei manufatti aeronautici in materiale composito. I passi successivi dello studio prevedono la modellazione dell'intero attrezzo di cura includendo tutte le parti, al fine di poter stabilire la collocazione ottimale delle termocoppie, scegliendo la leading e la lagging che andranno a monitorare l'intero processo di cura. E' prevista inoltre l'introduzione

Fig. 9  
Residual Stress / Stress Residui



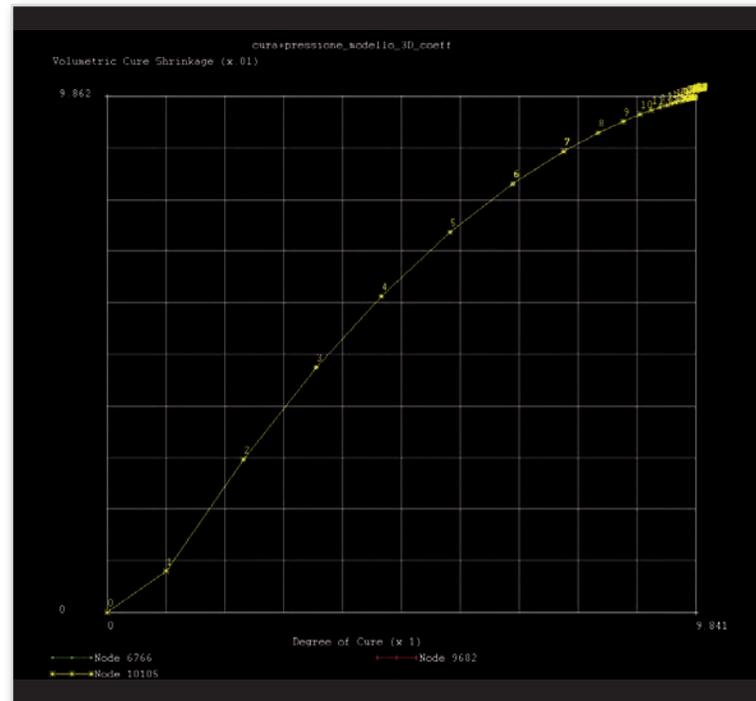
di un maggiore livello di dettaglio, rispetto al caso reale, nel modello FEM attraverso la simulazione degli strati polimerici che compongono il sacco a vuoto e

la reale distribuzione del flusso d'aria all'interno dell'autoclave, così da poter valutare il gradiente termico tra la zona porta ed il fondo.

choosing the leading and lagging that will monitor the whole curing process. It will be also provided the introduction in the FE model of a greater level of detail, thru, for example, the simulation of the polymer layers that form the vacuum bag and the real distribution of the air flow inside the autoclave, evaluating the thermal gradient between the door area and the back of the autoclave.

Finally, some material properties will be provided as cure degree dependent, such as the elastic modulus; in this way it can be taken in account the polymerization process that transforms the fluid resin in a solid component and can be obtained a more accurate stress and strain result.

Fig. 10  
Volumetric cure shrinkage / Ritiro volumetrico globale



*Infine si valuteranno alcune proprietà del materiale, per esempio il modulo elastico, variabili con il grado di cura; in questo modo è possibile valutare le variazioni fisiche e reologiche della parte che si hanno durante la polimerizzazione e quindi durante il passaggio da stato liquido a stato solido ottenendo così, dei risultati ancora più accurati in termini di stress e strain. Obiettivo finale del lavoro di ricerca è l'affinamento della previsione dei risultati, che si ottiene monitorando attentamente tutti i parametri del processo, con il successivo conseguimento di un modello di simulazione robusto capace di poter ridurre sostanzialmente i tempi di qualifica, di prevedere eventuali difetti di produzione e quindi l'integrità del prodotto.*