

# Study, analysis and testing of the phenomenon of electromagnetic induction of CFRP



B. Palmieri

\*Barbara Palmieri, Pierluigi Cirillo, Antonio Caraviello - Sòphia High Tech e UNINA - Francesco Galise - Centro Ricerche FIAT e UNINA

## AIM

Inside a national research project, the Sophia High Tech has been commissioned by the Centro Ricerche Fiat (CRF) to perform consulting activities aimed at research and optimization of process parameters for the production of joints in composite materials by electromagnetic induction. These activities are part of the research field on the induction bonding namely the bonding made using electromagnetic induction that eng. Francesco Galise CRF has long carried on for use, hopefully wider, which can have the composite materials in the automotive sector. In detail, the purpose of this work has been to search, analyze and optimize the process variables and their influence in the case of realization of joints in thermoplastic composite material through the use of software tools.

In order to achieve these results were carried out numerical simulations and a campaign of

experimental tests selected by performing a correlation numeric experimental.

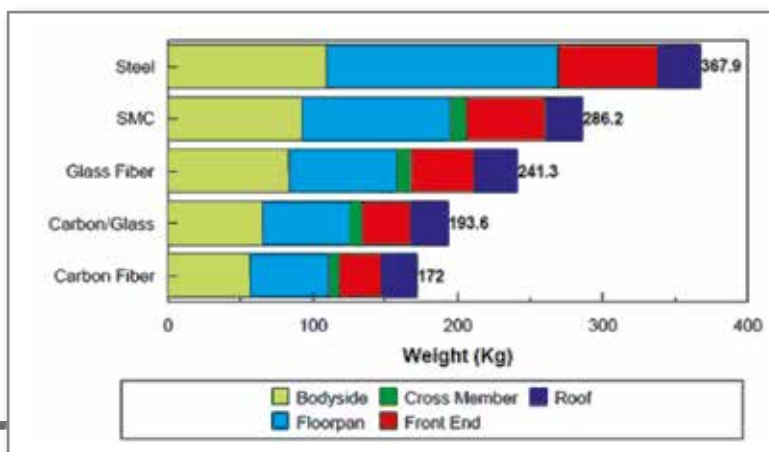
## INTRODUCTION

The transport sector is responsible for almost a third of global energy demand and is the main source of pollutants and greenhouse gas emissions in urban areas, which paves the

way for opportunities to save energy and clean technology.

The quickest way to improve operational efficiency is the use of structural materials and semi-structural lightweight materials including advanced metals (high-strength steel, aluminum) and materials with a polymer matrix reinforced with fibers of carbon and glass (Fig. 1).

Fig. 1  
Comparison between steel and composite materials for different parts of cars  
*Confronto tra acciaio e materiali compositi per le diverse parti di automobili*



## Studio, analisi e testing del fenomeno di induzione elettromagnetica su CFRP

\*Barbara Palmieri, Pierluigi Cirillo, Antonio Caraviello - Sòphia High Tech e UNINA - Francesco Galise - Centro Ricerche FIAT e UNINA

## FINALITÀ

Nell'ambito di un progetto di ricerca nazionale la società Sòphia High Tech è stata incaricata dal Centro Ricerche Fiat (CRF) di svolgere attività di consulenza finalizzata allo studio e all'ottimizzazione dei parametri di processo per la realizzazione di giunzioni in materiale composito tramite induzione elettromagnetica. Tali attività si inquadrano nel filone di ricerca sull'induction bonding ovvero sull'incollaggio effettuato tramite l'utilizzo di induzione elettromagnetica che l'ing. Francesco Galise del CRF sta conducendo da tempo finalizzata all'utilizzo, si spera sempre più ampio, che possono avere i materiali compositi nel settore automotive. Nel dettaglio lo scopo della consulenza è stato ricercare, analizzare ed ottimizzare le variabili di processo e la loro

influenza nel caso di realizzazione di giunti in materiale composito termoplastico attraverso l'utilizzo di strumenti software.

Al fine di ottenere tali risultati sono state svolte simulazioni numeriche e una campagna di prove sperimentali selezionate effettuando una correlazione numerico sperimentale.

## INTRODUZIONE

Il settore dei trasporti è responsabile di quasi un terzo della domanda globale di energia ed è la principale fonte di emissioni inquinanti e di gas serra nelle aree urbane, cosa che apre la strada per le opportunità di risparmio energetico e le tecnologie pulite. Il modo più rapido per migliorare l'efficienza operativa è l'uso di materiali strutturali e semi-strutturali leggeri compresi i metalli avanzati

(acciaio ad alta resistenza, alluminio) e materiali a matrice polimerica rinforzati con fibre di vetro e di carbonio (Fig. 1).

Il numero di applicazioni che prevedono l'utilizzo di compositi a matrice termoplastica è aumentato notevolmente nel settore automotive.

Di conseguenza anche le tecniche di assemblaggio, alternative alle classiche giunzioni meccaniche, risultano oltremodo interessanti per tali tipi di materiali.

Le tecniche di giunzione continua, quali saldatura ed incollaggio sono da preferirsi a quelle discontinue, ovvero meccaniche. Infatti un laminato in composito è costituito esso stesso dall'incollaggio di più lamine l'una sull'altra, e l'utilizzo di giunti meccanici nella realizzazione di strutture in materiale composito comporta diversi problemi quali

The number of applications that require the use of thermoplastic matrix composites has increased considerably in the automotive sector.

Consequently also the assembling techniques, alternatives to the classic mechanical joints, are extremely interesting for those types of materials. The continuous joining techniques, such as welding and bonding are preferred over discontinuous joining techniques, or mechanical. In fact, a composite laminate is formed by joining itself more laminae on each other, and the use of mechanical joints in the realization of composite structures involves several problems such as stress concentrations and possible delamination.

Despite of the previously reported, the bonding is to be considered the best joining technique for connecting the structural composites.

The main advantage of adhesively bonded joints is that these, with respect to the mechanical joints, allow to realize more extended structures, especially thanks to a more uniform load distribution.

In such joints, in fact, the load is transmitted gradually by an adherend to another through the adhesive layer present in the area of overlap, which means that the adhesive acts as a kind of mediator in the transmission of the load.

*concentrazioni di sforzo e possibili delaminazioni. Alla luce di quanto riportato precedentemente, l'incollaggio è da considerarsi la tecnica di giunzione migliore per il collegamento strutturale dei compositi.*

*Il vantaggio principale dei giunti adesivamente incollati è che questi, rispetto alle giunzioni meccaniche, consentono di realizzare strutture più estese, soprattutto grazie ad una più uniforme distribuzione del carico.*

*In tali giunti, infatti, il carico viene trasmesso gradualmente da un aderendo ad un altro attraverso lo strato adesivo presente nella zona di sovrapposizione (overlap region), il che vuol dire che l'adesivo si comporta come una sorta di mediatore nella trasmissione del carico.*

### INDUCTION BONDING

*L'induction bonding sfrutta il riscaldamento ad induzione per eseguire l'incollaggio e l'attivazione degli adesivi.*

*L'induzione elettromagnetica è quel fenomeno*

### INDUCTION BONDING

The induction bonding uses induction heating to perform the bonding and activation of the adhesive.

The electromagnetic induction is that physical phenomenon for which a magnetic field able to induce the ends of a conductor a potential difference, and then, if the circuit is closed, an electric current.

It's possible to exploit this phenomenon by the heating of ferromagnetic materials or electrically conductive; In fact, by applying an AC voltage to a coil, it generates an alternating current.

Such alternating current generates an electromagnetic field variable in time, characterized by the same frequency of the input current to the coil. Placing a material, or ferromagnetic or electrically conductive, close to the coil and hence its alternating magnetic field, eddy currents are induced on the surface of the same material; in order to ensure that passage of current it must be created within the material a closed electrical circuit. In the case of composite materials CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) the closed-loop circuit is generated by the presence of fillers based on carbon or cross ply carbon always arranged in the material,

*fisico per il quale un campo magnetico riesce ad indurre ai capi di un conduttore una differenza di potenziale e quindi, se il circuito è chiuso, una corrente elettrica.*

*È possibile sfruttare tale fenomeno per il riscaldamento di materiali ferromagnetici o elettricamente conduttivi; infatti applicando una tensione alternata ad una bobina (coil), si genera una corrente alternata.*

*Tale corrente alternata genera un campo elettromagnetico variabile nel tempo (alternating magnetic field), caratterizzato dalla stessa frequenza della corrente in ingresso alla bobina. Ponendo un materiale, o ferromagnetico o elettricamente conduttivo, in prossimità della bobina e quindi del suo campo magnetico alternato, si inducono delle correnti parassite (eddy currents) sulla superficie dello stesso; al fine di garantire*

and which act as susceptors. The eddy currents encountering the resistance of the material convert the electrical energy in heating energy (Joule effect).

One of the main advantages using such technique of heating lies in the fact that it is a mechanism of heating without contact between the heat source and the material being processed, in fact it is the same material to be heated which serves as a heat source, and consequently, it is a highly efficient process.

Moreover, the induction heating allows a local heating which the speed is extremely high due to the high power density, which offers the possibility to reach very high temperatures, even using an apparatus extremely compact and easily automated.

In the induction bonding of composite materials with thermoplastic matrix, a fundamental role is played by the process parameters, such as frequency, power of the generator, the distance between the inductor and the laminate and coil geometry.

As a result of these evaluations it was decided to

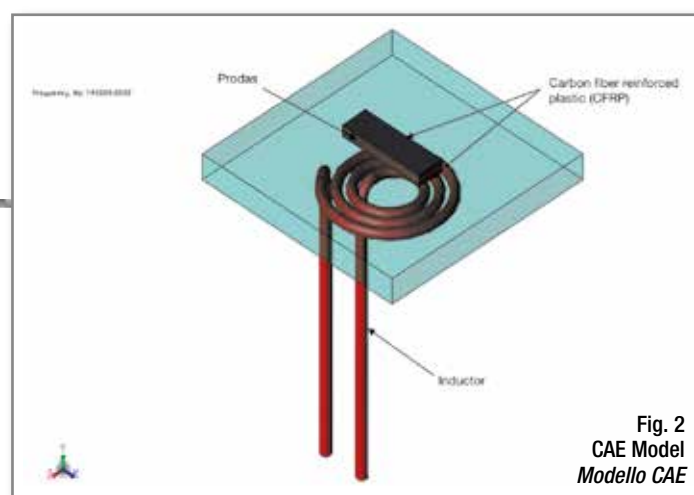


Fig. 2  
CAE Model  
Modello CAE

*tale passaggio di corrente è necessario che si crei all'interno del materiale un circuito elettrico chiuso. Nel caso dei materiali compositi CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) il circuito ad anello chiuso è generato dalla presenza dei filler a base di carbonio o cross ply sempre in carbonio disposti nel materiale, e che fungono da suscettatori. Le correnti parassite incontrando la resistenza del materiale trasformano l'energia sotto forma di calore (effetto Joule).*

*Uno dei vantaggi principali nell'utilizzo di tale tecnica di riscaldamento risiede nel fatto che è un meccanismo di riscaldamento senza contatto*

continue, in this work, with a preliminary CAE simulation (Fig. 2) of the process of induction heating of the specimens to be joined, so as to be able to acquire the right parameter of bonding, which will then be verified by subsequent testing phase. The simulation phase allows to reduce the number of tests to perform, with a saving in terms of costs of material, and the knowledge of the temperature distribution inside the joint, which would be possible in the experimental stage only by means of mechanical characterization tests made later. In a first phase of this work we have been carried out a research bibliography, by means of field studies, in order to choose the range of thermodynamic parameters that provide adequate quality of the joint:

- Temperature range;
- Value of the voltage;
- Time intervals.

Following this stage it has created a CAE model, useful to predict the interaction between the process parameters.

The computation tasks relate to process simulations where it's possible to define and optimize the parameters that lead to the realization of a very good coupling. The model simulates a process of joining two-dimensional electromagnetic (heat transfer and electromagnetism) merging in real phenomenon.

Such elements are necessary to simulate the conditions for the adhesion at the interface of two composite laminates. The physical phenomenon was then studied in two analysis: Joule loss

analysis, and temperature analysis to study the generation of heat that is produced inside of the specimens (Fig. 3); this heat generation is based on the results of magnetic.

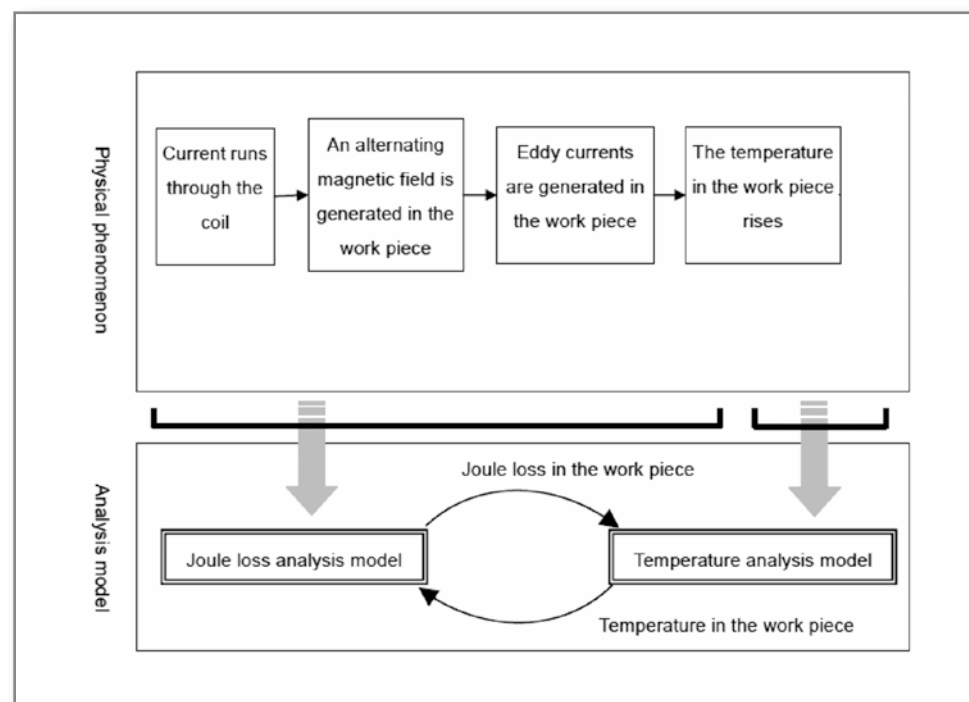


Fig. 3 - Relation between physical phenomenon and analysis model  
Relazione tra fenomeno fisico e modello di analisi

tra la fonte di calore ed il materiale in lavorazione, difatti è lo stesso materiale da riscaldare che funge da fonte di calore, e di conseguenza è un processo altamente efficiente.

Inoltre il riscaldamento per induzione permette un riscaldamento locale la cui velocità è estremamente elevata a causa dell'alta densità di potenza, che offre la possibilità di raggiungere temperature molto alte, anche utilizzando un'attrezzatura estremamente compatta e facilmente automatizzabile.

Nell'incollaggio mediante induzione elettromagnetica di materiali compositi, a matrice termoplastica, un ruolo fondamentale è svolto dai parametri di processo, quali frequenza, potenza del generatore, distanza tra l'avvolgimento induttore ed il laminato e geometria della bobina.

A seguito di tali valutazioni si è deciso di proseguire, in tale lavoro, con una preliminare simulazione CAE (Fig. 2) del processo di riscaldamento per induzione dei provini da giuntare, in modo da riuscire ad acquisire la giusta sensibilità dei

parametri di incollaggio, che saranno poi verificati dalla successiva fase di sperimentazione.

La fase di simulazione permette di ridurre il numero di prove da eseguire, con un risparmio in termini di costi di materiale, e la conoscenza della distribuzione di temperatura all'interno del giunto, cosa che sarebbe possibile in fase sperimentale solo mediante prove di caratterizzazione meccanica effettuate successivamente. In una prima fase del lavoro svolto è stata effettuata una ricerca bibliografia, mediante studi di settore, al fine di scegliere il range di parametri termodinamici che garantiscono un'adeguata qualità della giunzione:

- Campo di temperature;
- Valore della Tensione;
- Intervalli temporali.

In seguito a tale fase è stato creato un modello CAE, utile a predire l'interazione fra i parametri di processo.

Le attività di calcolo vertono su simulazioni di processo in cui si definiscono e ottimizzano i

parametri che conducono alla realizzazione di un ottimo giunto. Il modello simula un processo di giunzione elettromagnetica bidimensionale (trasferimento di calore ed elettromagnetismo) che concorrono nel fenomeno reale.

Tali elementi risultano necessari per simulare le condizioni necessarie per l'adesione all'interfaccia di due laminati compositi. Il fenomeno fisico è stato quindi studiato in due analisi: un'analisi delle perdite per effetto joule, e un'analisi termica per studiare la generazione di calore che si produce all'interno dei provini (Fig. 3); tale generazione di calore si basa sui risultati dell'analisi magnetica. Il passo successivo alla simulazione numerica effettuata è stato quello di eseguire una campagna di prove sperimentali, al fine di effettuare la correlazione numerica e verificare la qualità dell'incollaggio effettuato.

Le prove sperimentali sono state effettuate secondo norma ASTM D2344 (Interlaminar Shear Strength ILSS) (Fig. 4) ed è stato effettuato un confronto con la ASTM D5868 (Lap Shear

The next step to the numerical simulation carried out was to run a campaign of experimental tests, in order to make the numerical correlation and verify the quality of the bonding performed.

The tests were performed according to ASTM D2344 (Interlaminar Shear Strength ILSS) (Figure 4) ed è stato effettuato un confronto con la ASTM D5868 (Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic Bonding) and it was compared with ASTM D5868 (Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic Bonding) to assess the quality of bonding.

The tests have been articulated in a Design Of Experiment (DOE) at three levels with three interaction factors, related to the value of voltage, temperature and time; besides each coupling it has been performed a number of times at least equal to 5 in order to estimate the variability in testing, using the standard deviation value.

The choice of three levels of temperature flows from the softening temperature of the adhesive thermoplastic used: the PRODAS of Beardow Adams. The PRODAS is a special adhesive containing thermoplastic polymers, adhesive resins, waxes and antioxidants, and its use is indicated for assemblies which require an excellent cohesive strength. The recommended application temperature of PRODAS falls within

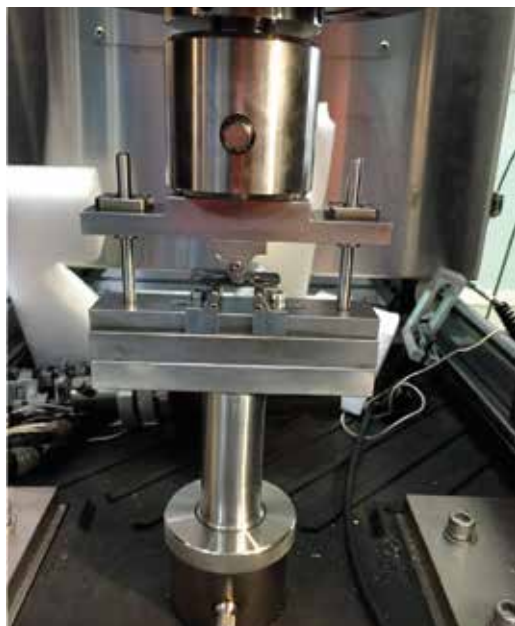


Fig. 4  
Test  
according to  
ASTM D2344  
*Prova  
secondo  
norma  
ASTM D2344*

*Adhesion for Fiber Reinforced Plastic Bonding) per valutare la bontà della normativa impostata.*

*Le prove sono state articolate in un Design Of Experiment (DOE) a tre livelli con tre fattori di interazione, relativi al valore di voltaggio, temperatura e tempo; inoltre ogni giunto è stato eseguito un numero di volte almeno pari a 5 al fine di stimare la variabilità di testing, mediante il valore di deviazione standard.*

*La scelta dei tre livelli di temperatura scaturisce dalla temperatura di ram-mollimento dell'adesivo termoplastico utilizzato: il PRODAS della Beardow Adams.*

*Il PRODAS è un particolare adesivo contenente polimeri termoplastici, resine adesive, cere ed antiossidanti e il suo utilizzo è indicato per gli assemblaggi dove sia richiesta una eccellente forza coesiva.*

*La temperatura di applicazione consigliata del PRODAS rientra in un range di temperatura che varia tra 175° e i 195°C. I livelli del tempo*

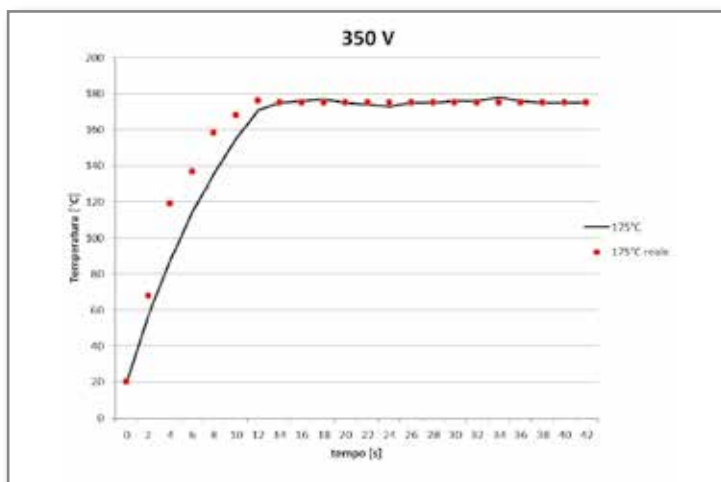


Fig. 5 - Temperature profile to 175°C to 350 V  
*Profilo di temperatura per 175°C a 350 V*

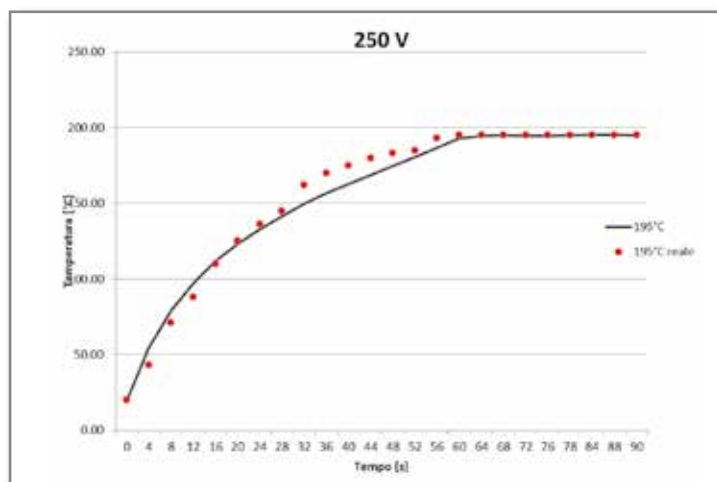


Fig. 6 - Temperature profile to 195°C to 250 V  
*Profilo di temperatura per 195°C a 250 V*

a temperature range that varies between 175° and 195°C.

The levels of the residence time and the voltage applied across the inductor have been established as a function of the optimization of the industrial process.

**CONCLUSIONS**

This work has treated the study of bonding technology of thermoplastic matrix composites, through the use of electromagnetic induction. With the CAE simulation of the process of induction heating of specimens CFRP, bonded by

means of thermoplastic adhesive, we have tried to acquire the right sensitivity of the process parameters.

With the testing phase has been validated the entire work conducted with the simulation. It's carried out, in fact, a comparison between

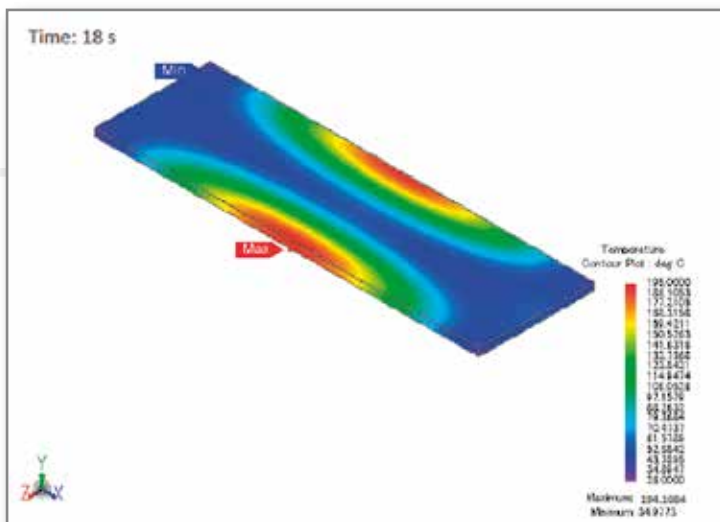


Fig. 7 - Temperature distribution inside of the adhesive before the control of temperatures  
*Distribuzione della temperatura all'interno dell'adesivo prima del controllo di temperature*

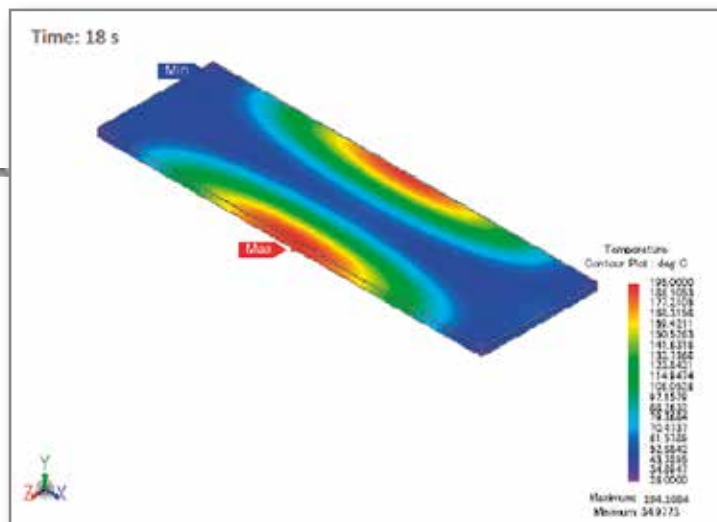


Fig. 8 - Temperature distribution inside of the adhesive after the control of temperatures  
*Distribuzione della temperatura all'interno dell'adesivo dopo il controllo di temperature*

di permanenza e del voltaggio applicati ai capi dell'induttore sono stati stabiliti in funzione dell'ottimizzazione del processo industriale.

**CONCLUSIONI**

Il presente lavoro si è occupato dello studio della tecnologia di incollaggio di compositi a matrice termoplastica, mediante l'utilizzo dell'induzione

elettromagnetica. Con la simulazione CAE del processo di riscaldamento per induzione di provini in CFRP, incollati mediante adesivo termoplastico, si è cercato di acquisire la giusta sensibilità dei parametri di processo.

Con la fase di sperimentazione è stato avvalorato l'intero lavoro condotto con la simulazione. Effettuato, infatti, un confronto fra le prove

simulate e quelle di sperimentazione realizzate con gli stessi parametri di processo, sia la simulazione che la sperimentazione hanno in particolare mostrato che:

Il tempo necessario per portare a temperatura l'adesivo che si ottiene dalla simulazione coincide con quello sperimentale (Figg. 5 e 6). Il punto a temperatura maggiore ricavato dalla

the simulated tests and those of experimentation made with the same parameters of the process.

Both the simulation and the experimentation have shown in particular that the time required to heat the adhesive coincides (Fig. 5 and Fig. 6).

The point at higher temperature obtained from the simulation coincides with that obtained from experimentation even if the heating obtained providing electric power without control of temperature is not uniform.

For a second round of simulations carried out providing electric power with temperature control it has a temperature distribution more uniform which leads to a better adhesion of the adhesive (Fig. 7 and Fig. 8).

*simulazione coincide con quello ricavato dalla sperimentazione anche se il riscaldamento tramite erogazione di potenza senza controllo di temperatura non è uniforme.*

*Ad un secondo round di simulazioni effettuate erogando potenza con controllo di temperatura si ha una distribuzione di temperatura più uniforme che porta ad una migliore adesione dell'adesivo (Figg. 7 e 8).*

about the author

#### **BARBARA PALMIERI**

Degree in Mechanical Engineering for the Design and Production at the University of Naples Federico II.

The thesis was carried out following training activities carried out at the laboratories of the Research Centre of Fiat Pomigliano, the objective of this work was to develop a computational model to simulate the welding process to electromagnetic induction of composite materials reinforced with carbon fibers for applications in the automotive sector. Since April 2015, R & D Manager at the company Sophia High Tech, consulting activity at Centro Ricerche Fiat Pomigliano (NA) on the study and optimization of process parameters for the production of bonded joints in composite materials, using electromagnetic induction, whose results are reported in the article that will be published.

#### **BARBARA PALMIERI**

*Laureata in Ingegneria Meccanica per la Progettazione e la Produzione presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, con tesi sperimentale. L'elaborato di tesi è stato realizzato in seguito ad attività di tirocinio svolto presso i laboratori del Centro Ricerche Fiat di Pomigliano; l'obiettivo di tale lavoro è stato mettere a punto un modello di calcolo per la simulazione del processo di saldatura a induzione elettromagnetica di materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio per applicazioni nel settore automotive. Dall'aprile del 2015, R&D Manager presso la società Sophia High Tech, svolgendo attività di consulenza presso il Centro Ricerche Fiat di Pomigliano (NA) sullo studio ed ottimizzazione dei parametri di processo per la realizzazione di giunzioni incollate in materiale composito, mediante induzione elettromagnetica, i cui risultati sono riportati nell'articolo che verrà pubblicato.*