

Prof. Michele Buonsanti
Prof. Giuseppe Megali

Controllo dell'integrità strutturale in materiali compositi ad uso aeronautico

Le tecniche di controllo e valutazione del tipo non distruttivo (NDT&E - *Non Destructive Testing and Evaluation*) rivestono un ruolo sempre più importante nell'ispezione dei materiali compositi, soprattutto per la loro caratteristica di riuscire a fornire risultati in tempi rapidi e offrendo soluzioni a basso costo. In questo contributo si illustrano delle applicazioni di metodologie NDT&E per l'analisi di materiali compositi in CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*), materiali ampiamente in uso in una ampia varietà di applicazioni aeronautiche.

“Spesso nuovi materiali stanno in attesa per volere dell’artista”

(Lucius Annaeus Seneca 4-65 a.c.)

INTRODUZIONE

L’apprezzata lettura di due lavori del Cap. Allegrucci [1, 3], parimenti al contributo del Magg. De Paolis [2], ha fortemente stimolato gli scriventi ad offrire un contributo di ricerca tipicamente accademico, ma suffragato da sperimentazione su uno specifico ambito, a nostro avviso, molto utile all’accredimento di quel background che ogni pilota e/o tecnico manutentore porta come suo indispensabile bagaglio di conoscenza. In particolare, volando uno degli autori in qualità di PIC da oltre 30 anni su velivoli leggeri, è risultato possibile riscontrare come l’evoluzione dei materiali e delle tecnologie abbia inciso fortemente sia sugli aspetti aerodinamici sia su quelli della manutenzione. Negli anni ‘70-’80 la struttura resistente era fortemente tradizionale, con elementi reticolari spaziali in lega metallica e rivestimento in materiali similari, quindi velivoli il cui peso proprio risultava molto consistente. Nel tempo le strutture portanti hanno mantenuto la loro essenza costruttiva ma molti degli elementi secondari del velivolo hanno iniziato ad essere sostituiti da materiali compositi il cui pregio, in termini di leggerezza, incide fortemente sulla prestazione di velivoli, spes-



STRUCTURAL INTEGRITY CONTROL IN COMPOSITE MATERIALS FOR AERONAUTICS APPLICATIONS

INTRODUCTION

The appreciated reading of two works of Capt. Allegrucci [1, 3], also the contribution of Maj. De Paolis [2], has greatly stimulated the writers to make a research contribution typically academic, but supported by experiments on a specific field, in our opinion, very useful to enhancing of that background that each pilot and/or maintenance technician takes as its essential store of knowledge.

In particular, Flying one of the authors as a P.C., for over 30 years of light aircraft, it was noted as the evolution of materials and technologies have a strong impact on both the aerodynamic and on those aspects of maintenance. In the ‘70s-’80s the traditional structure was highly resistant, with reticular spatial elements in metal alloy and coating in similar materials, then airplanes where weight was very consistent.

Over time, the structures have retained their constructive essence but many of the secondary elements of the aircraft began to be replaced by composite materials whose value, in terms of lightness, greatly affects the performance of aircraft, often with only a sufficient driving force to

so dotati solo di una spinta propulsiva sufficiente alle normali operazioni tipiche dell’aviazione generale. Se il vantaggio aerodinamico è immediatamente intuibile e riscontrabile, anche gli aspetti manutentivi ne ricavano positività, attesa la diminuzione di alcune problematiche tipiche delle strutture metalliche (es. corrosione).

La progettazione aeronautica si è fortemente, e giustamente, impossessata dell’uso dei materiali compositi arrivando, all’inizio del terzo millennio, a realizzare velivoli, in particolare per l’A.G., totalmente in materiale composito. Ai vantaggi di un a/m il cui peso a vuoto risulta relativamente basso, oltre a garantire adeguata resistenza strutturale, si contrappone l’esigenza di un controllo di una integrità strutturale basata su procedure metodologiche le cui risultanze sono, necessariamente, affidabili.

L’introduzione delle carbon-resine, all’inizio degli anni ‘80, ha segnato l’inizio di una nuova era tecnologica nel già innovativo sviluppo dei materiali compositi. Caratterizzati dall’unione sinergica di due o più componenti, uno più rigido quale il rinforzo (carbonio, vetro, kevlar), ed uno più tenace, quale la matrice in resina termoindurente (epossidica, fenolica, poliammidica), questi materiali compositi accen-

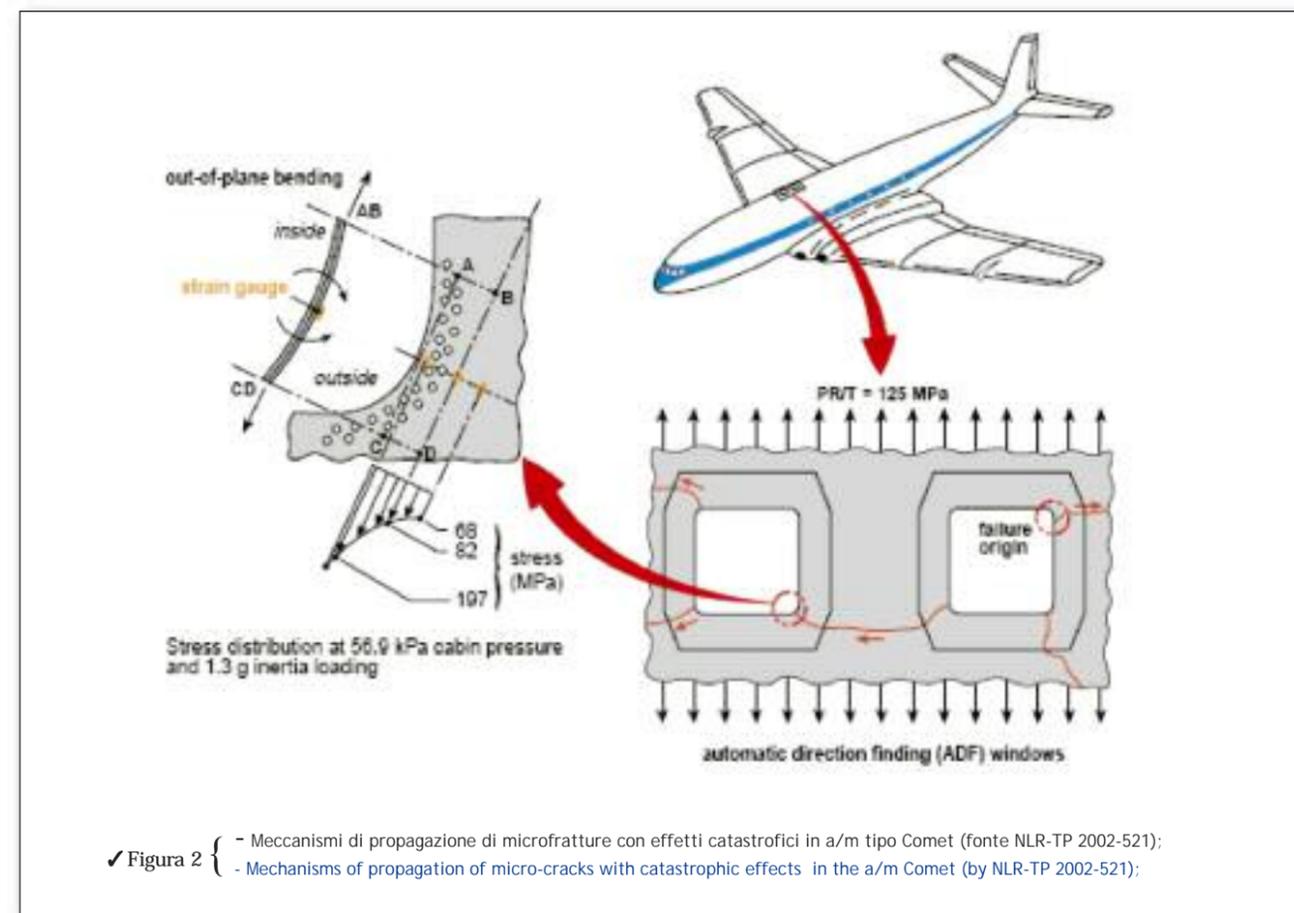
normal operations typical of general aviation. If the aerodynamic advantage is easy to understand and be seen, even the positive aspects of maintenance deducted from them, given the decline of some typical problems of metal structures (e.g. corrosion).

The aircraft design is strongly, and rightly, seized the use of composite materials arriving at the beginning of the third millennium, to build aircraft, in particular for the A.G. totally made of composite material. The advantages of an a/m which the empty weight is relatively low, in addition to ensuring adequate structural strength, contrasts with the need for a control of the structural integrity based on the results of which are methodological procedures, necessarily, reliable. The introduction of carbon-resins, in the early ‘80s, marked the beginning of a new technological era in the already innovative development of composite materials.

Characterized by the union of two or more synergistic components, a more rigid which the reinforcement (carbon, glass, kevlar), and a more tenacious, which the matrix of thermosetting resin (epoxy, phenolic, polyimide), these composite materials accentuate some fundamental structural



✓ Figura 1 { - Perdita dell’integrità strutturale con mantenimento dell’equilibrio aerodinamico. (B52H 61023 10.01.1964) fonte USAF;
- Loss of structural integrity maintaining aerodynamical equilibrium. (B52H 61023 10.01.1964) source USAF;



✓ Figura 2 { - Meccanismi di propagazione di microfratture con effetti catastrofici in a/m tipo Comet (fonte NLR-TP 2002-521);
- Mechanisms of propagation of micro-cracks with catastrophic effects in the a/m Comet (by NLR-TP 2002-521);

tuano alcune fondamentali proprietà strutturali:

1. La resistenza e rigidità delle strutture sono ottimizzabili attraverso un'opportuna orientazione delle fibre degli strati successivi del laminato;
2. La tenacità del materiale può essere opportunamente migliorata con la più adatta scelta della composizione della matrice.

Usati per applicazioni aeronautiche di criticità crescente, hanno visto gradualmente il diffondersi nelle realizzazioni di vari componenti quali: flap, slat, spoilers, alettoni, rudder, elevatori, sino alla struttura alare ed in ultimo alla fusoliera, specie quest'ultima nella nuova generazione di velivoli leggeri per l'aviazione generale.

Dal punto di vista del comportamento meccanico i materiali compositi a matrice polimerica comportano una forte integrabilità delle strutture con sostanziale riduzione del numero delle parti componenti, inoltre manifestano:

- eccellente comportamento a fatica;
- sostanziale miglioramento della tolleranza al danno;
- controllo dell'infiammabilità, dell'emissione di fumi e della tossicità;
- stabilità e durabilità ambientale;
- ridotti costi di manutenzione/ridotti costi del ciclo di vita;
- ridotti consumi di carburante derivanti dalle possibili riduzioni di peso rispetto alle strutture convenzionali.

Le tecniche di controllo e valutazione del tipo non distruttivo (NDT&E) rivestono un ruolo sempre più importante nell'ispezione dei materiali compositi, soprattutto per la loro caratteristica di riuscire a fornire risultati in tempi rapidi e offrendo soluzioni a basso costo. Al fine di migliorare qualità di produzione e garantire la sicurezza di un sistema, i dispositivi, i componenti e le strutture che lo compongono, sono ispezionati per rilevare la presenza di difettosità (sia essa di produzione che in fase di esercizio) che possa pregiudicarne la loro integrità e conseguentemente la loro utilità futura.

In questo contributo si illustrano delle applicazioni di metodologie NDT&E (*Non Destructive Testing and Evaluation*) per l'analisi di materiali compositi in CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*), materiali ampiamente in uso in una ampia varietà di applicazioni aeronautiche.

properties, including:

1. The strength and stiffness of the structures can be optimized through proper orientation of the fibers of successive layers of the laminate;
2. The toughness of the material can be suitably improved by the most suitable choice of composition of the matrix.

Used for critical aerospace applications increasingly are seen gradually spread in the achievements of various components such as flaps, slats, spoilers,

ailerons, rudder, elevators, until the wing structure and ultimately to the fuselage, especially in this new generation of light aircraft for general aviation.

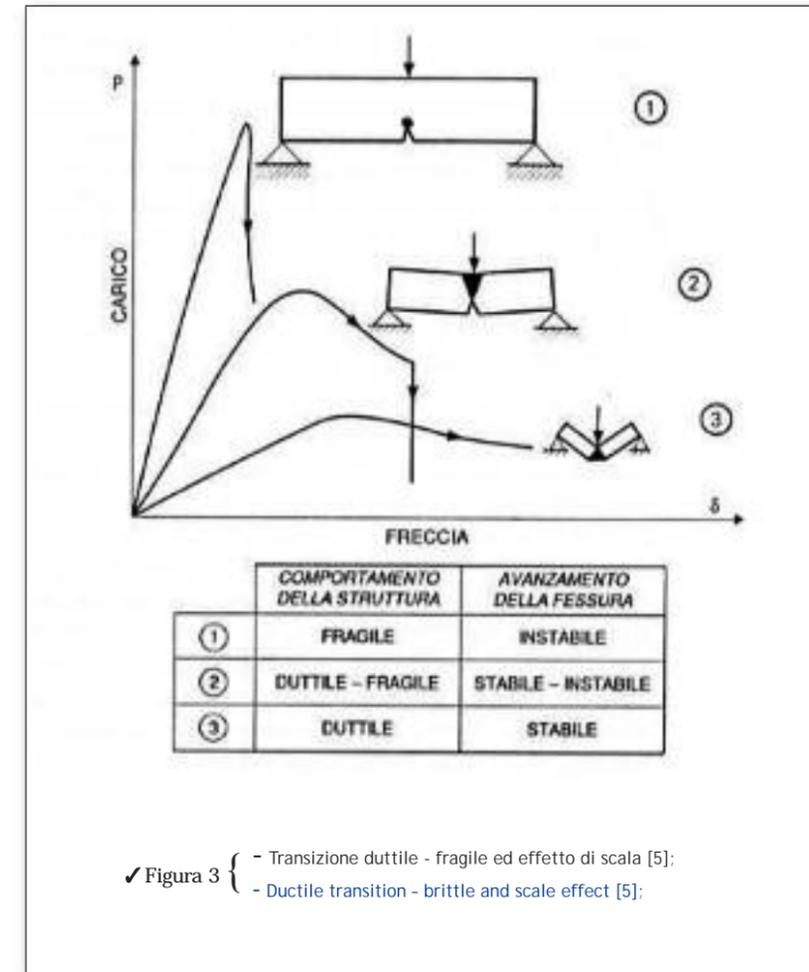
From the mechanical point of view the polymer matrix composite materials have a strong integration of the structures with substantial reduction in the number of component parts, also occur:

- excellent fatigue behavior;
- substantially improved damage tolerance;
- inflammability, smoke and toxicity control;
- environmental stability and durability;
- reduced maintenance costs/reduced life cycle costs;
- reduced fuel consumption resulting from possible reductions in weight compared to conventional structures.

Non Destructive Testing and Evaluation (NDT&E) play an increasingly important role in the inspection of composite materials, primarily for their characteristic of being able to deliver rapid results and offering low cost solutions.

In order to improve production quality and ensure the security of a system, devices, components and structures that comprise it, are inspected for the presence of defects (be it that in the production phase of operation) that may be adversely affected their integrity and thus their future usefulness.

In this paper we illustrate the application of NDT &E methods (*Non Destructive Testing and Evaluation*) for the analysis of composite CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*), materials widely used in a wide variety of aerospace applications.



✓ Figura 3 { - Transizione duttile - fragile ed effetto di scala [5];
- Ductile transition - brittle and scale effect [5];



MECCANICA DEI MATERIALI COMPOSITI - CFRP

Le fibre di carbonio abitualmente utilizzate si presentano in due tipiche offerte, ovvero fibre ad alta resistenza (o basso modulo elastico) 230 Gpa, e fibre a bassa resistenza (alto modulo elastico) 480-700 Gpa anche se il modulo elastico teorico di una fibra è di circa 1000 Gpa [4].

Il carbonio ha un difetto comune delle sostanze centrali della tavola periodica ovvero la fragilità. Sono sufficienti microscopici intagli o difetti molecolari per innescare rotture catastrofiche.

La formazione in fibre riduce questo aspetto ma la miscelazione con la matrice plastica comporta comunque trasmissione di sforzi e concentrazioni di tensioni. Il diagramma sforzo deformazione nella direzione delle fibre [5] è spiccatamente lineare non presentando vaste zone di snervamento, come è tipico dei materiali metallici.

Tutto ciò comporta che la rottura delle lamine avviene in modo fragile, quindi improvviso con avanzamento progressivo catastrofico, senza trascurare gli effetti di scala [6].

MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS - CFRP

The carbon fibers usually used are presented in two typical deals or high strength fibers (or low modulus of elasticity) 230 GPa, and fibers with low resistance (high elastic modulus) 480-700 GPa even if the elastic modulus of a theoretical fiber is of about 1000 GPa [4].

Carbon has a common defect of the central substance of the periodic table or fragility. Microscopic grooves are sufficient to trigger molecular defects or catastrophic failure.

The formation in fibers reduces this aspect but the mixing with the plastic matrix, however, involves transmission of effort and stress concentrations.

The diagram effort deformation in the direction of the fibers [5] is distinctly non-linear presenting large areas of yield strength, as is typical of metallic materials.

All this implies that the breaking of the plates is so fragile, so suddenly with catastrophic inching, without neglecting the effects of scale [6].

CARATTERIZZAZIONE DEI DIFETTI IN CFRP

Sulla base di quanto già precedentemente anticipato, in ambito aeronautico, grande importanza è attribuita al controllo dei materiali impiegati nella realizzazione dei sistemi finali nel loro complesso.

Nell'ottica di fornire un adeguato *trade-off* tra velocità di ispezione, affidabilità e accuratezza del controllo, costi, le tecniche di ispezione rappresentano un nodo cruciale nella valutazione dell'integrità. Considerando poi il notevole impiego dei mezzi aerei, è facile comprendere come sollecitazioni meccaniche e agenti atmosferici, siano tra le cause di degrado delle strutture. In tale ottica, l'impiego di continui controlli durante il ciclo di vita delle strutture, degli impianti, riporta a quanto precedente puntualizzato in termini di innovazione.

Tenuto conto dei fattori di degrado in fase di esercizio, particolare attenzione deve essere quindi data in fase di produzione, al fine di evitare di introdurre altri fattori di rischio nello stato di vita del componente.

In particolare, nell'ambito della produzione dei CFRPs [7-9], le difettosità in grado di alterare le proprietà chimico/fisiche del materiale, mettendo a rischio l'integrità del velivolo, risultano essere le seguenti:

- delaminazione: separazione delle lamine che si riscontra nelle prossimità dei bordi liberi dei pezzi, dove sono presenti elevati picchi di tensione, per la presenza di aria o gas in fase di polimerizzazione. Come conseguenza di questo processo, si ha uno "sfilacciamento" dei pezzi, con conseguente perdita delle proprietà meccaniche del laminato. Raggruppamenti di delaminazioni distribuite a diverse profondità sono a volte note come micro-delaminazioni;
- inclusione: presenza accidentale di corpi estranei internamente alla struttura;
- porosità: sferica/ellittica, costituita da micro-vuoti distribuiti all'interno di un volume o in un piano (layer) della struttura; le cause possono essere sostanzial-

DEFECTS CHARACTERIZATION IN CFRP

On the basis of what has already been mentioned, in the aeronautical field, great importance is attached to the control of the materials used in the realization of the end systems in their entirety. In order to provide an adequate *trade-off* between speed inspection, reliability and accuracy of control, costs, inspection techniques are a crucial issue in assessing the integrity. Considering the large amount of aircraft, it is easy to understand how mechanical stress and weathering, are among the causes of deterioration of structures. In this context, the use of continuous monitoring during the life cycle of structures, facilities, as previous reports pointed out in terms of innovation. Taking into account the factors of degradation during operation, particular attention must therefore be given in the production phase, in order to avoid the introduction of other risk factors in the state of life of the component. In particular, in the production of CFRPs [7-9], the defects can alter the chemical/physical properties of the material, putting at risk the integrity of the aircraft, are as follows:

- delamination: separation of the lamina is found in the vicinity of its free edges of the pieces, where there are high voltage peaks, due to the presence of air or gas phase polymerization. As a result of this process, it has a "unraveling" of the pieces, with consequent loss of mechanical properties of the laminate. Groupings of

mente quelle della delaminazione, ma, in genere, è indotta dalla pressione errata e gradienti di temperatura durante la fase di polimerizzazione.

Nell'ambito della tipologia di difettosità, occorre sottolineare come le dimensioni relative ai difetti possano variare notevolmente, in funzione del processo e delle condizioni di produzione. Tuttavia, in genere:

- delaminazioni: occupano un'area dell'ordine delle decine di [mm²] (micro-delaminazioni sono notevolmente più piccole, nell'ordine del decimo di [mm²]);
- inclusioni: hanno una gamma di dimensioni veramente grandi, a seconda del tipo di oggetto presente all'interno del prodotto finale;
- porosità: i pori più piccoli hanno un diametro di poche decine di micron, anche se alcuni pori possono anche raggiungere un diametro di pochi decimi di millimetro.

In molti casi, è molto difficile distinguere tra il tipo di difettosità solo a partire da un esame visivo, ad esempio a seguito di esame ultrasonoro.

In effetti, diversi tipi di difetti possono determinare risposte, a prima vista, simili, con la conseguente necessità di operare mediante impiego di risoluzione di problemi inversi per determinare in maniera univoca la tipologia di difetto riscontrata.

Nell'ambito dell'ispezione di difettosità in materiali compositi, l'analisi mediante ECT risulta di grande interesse dal punto di vista scientifico, oltre che di notevole impatto dal punto di vista applicativo [10].

A differenza dei tradizionali materiali oggetto di indagine mediante tecnica a correnti indotte, i CFRPs sono caratterizzati dal punto di vista elettrico, dall'essere dei materiali anisotropi, proprio in relazione alla loro struttura composita [10].

laminations distributed at different depths are sometimes known as micro-delamination;

- inclusions: adventitious presence of foreign bodies inside the structure;
- porosity: spherical/elliptical, consisting of micro-gaps distributed within a volume or in a plane (layer) of the structure, the causes can be substantially those of the delamination, but, generally, is caused by incorrect pressure and temperature gradients during the polymerization phase.

Within the type of defects, it should be stressed as the relative size of the defects can vary widely, depending on the process and production conditions. However, in general:

- delamination: occupy an area of tens of [mm²] (micro-delamination are considerably smaller, a tenth of [mm²]);
- inclusions: have a very large range of sizes, depending on the type of object present within the final product;
- porosity: the smallest pores have a diameter of few tens of microns, although some pores can also reach a diameter of few tenths of a millimeter.

In many cases, it is very difficult to distinguish between the type of defect only from a visual inspection, for example as a result of ultrasonic examination. In fact, several types of defects can determine responses, at first glance, similar, with the consequent need to operate through the use of resolution of inverse problems to determine unambiguously the type of defect found. In the framework of defects inspection in composite materials, the analysis by means of ECT is of great interest from the scientific point of view, as well as significant impact from the application point of view [10]. Unlike traditional materials under investigation by means of eddy current technique, the CFRPs are characterized by the electrical point of view, from anisotropic materials, precisely in relation to their composite structure [10].

MECCANICA DEI COMPOSITI LAMINARI FIBRORINFORZATI

Equazioni costitutive
 $\sigma = D(\epsilon + \epsilon^p)$
 Dove σ rappresenta lo stato tensionale, ϵ lo stato deformativo derivante da azioni meccaniche, ϵ^p il tensore della deformazione per azioni termiche e D la matrice delle costanti elastiche.
 Nel caso piano le equazioni costitutive assumono la forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

 dove le Q_{ij} sono i termini della matrice di rigidità ridotta.

MECCANISMI DI DANNEGGIAMENTO

CRITERIO DI RESISTENZA DI TSAI-WU

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \tau) = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \tau + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \tau^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{13} \sigma_1 \tau + 2F_{23} \sigma_2 \tau$$

✓ Figura 4

- Andamento ellittico delle correnti indotte su CFRP: caso simulato su struttura multi-layer (sinistra) e relativa spiegazione elettrica, dovuta a fenomeni elettrici per il non corretto allineamento delle fibre interne (destra);
- Elliptical of the currents induced on CFRP: the case of simulated multi-layer structure (left) and relative electrical explanation, due to electrical phenomena to the incorrect alignment of the internal fibers (right);

Questo aspetto, che determina una deformazione del normale andamento circolare delle correnti indotte (tipico invece per i materiali metallici), ha aperto un filone di ricerca dedicato allo studio e alla modellazione delle interazioni tra i materiali compositi e il campo elettromagnetico, richiedendo approcci di ispezione innovativi [11]. Dal punto di vista sperimentale, le figure 5/6 e 7/8 mostrano il risultato sperimentale relativo ad una ispezione ECT su CFRP, relativamente a set-up specifici, dove è stata effettuata la validazione sperimentale di simulazioni di laboratorio.

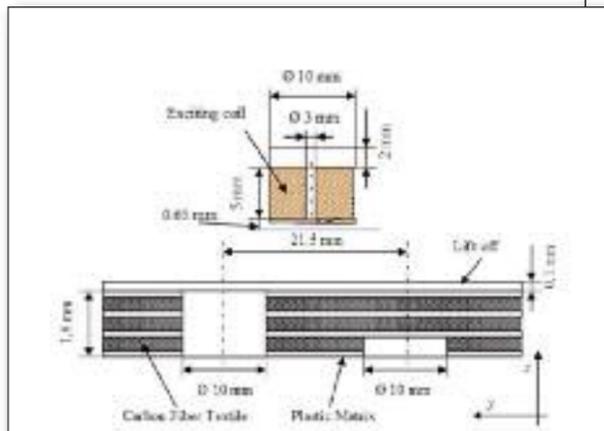
This aspect, which determines a deformation of the normal circular pattern of induced currents (rather typical for metals), has opened a research field dedicated to studying and modeling the interactions of composite materials and electromagnetic field, requiring innovative approaches to inspection [11].

From the experimental point of view, figures 5/6 and 7/8 show the experimental result relative to an inspection of CFRP ECT, in relation to specific set-up, where the validation has been carried out experimental laboratory simulations.

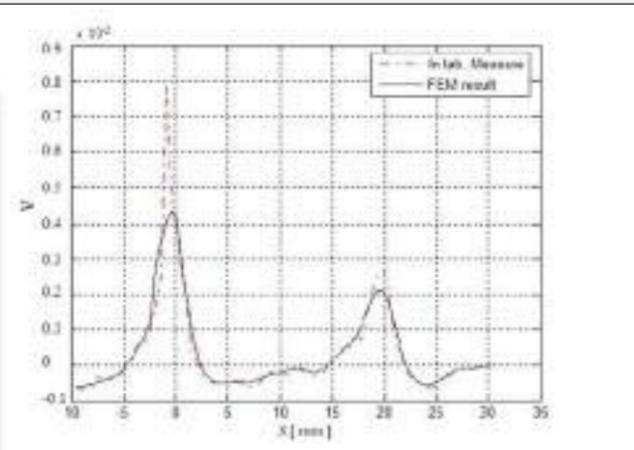


Le figure 9 e 10 mostrano risultati di misura relativi ad ispezioni su materiali per applicazioni aeronautiche caratterizzati dalla presenza di difettosità. In tale ottica, anche gli UT rappresentano, pur con le limitazioni del caso, una metodologia particolarmente utile al fine di controllare questo tipo di materiali [13].

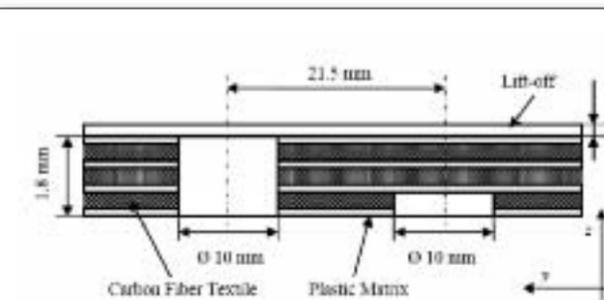
Figures 9 and 10 show measurement results of the inspection materials for aeronautical applications characterized by the presence of defects. In this perspective, the UT also represent, although with the limitations of the case, a methodology is particularly useful in order to control this type of material [13].



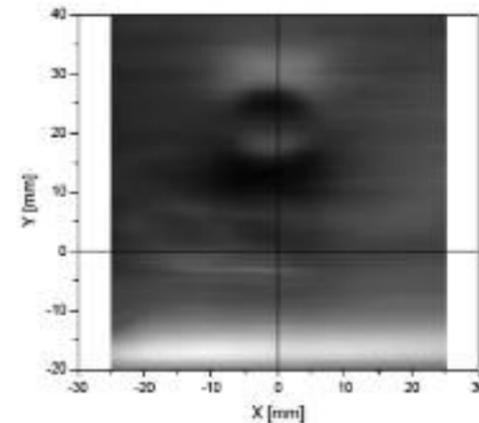
✓ Figura 5 {
 - Set-up di misura per ispezione di difetti su CFRP (tipologia: foro) rilevazione di difettosità del 100% e del 33% avente diametro \varnothing di 10 mm;
 - Measuring Set-up for defects inspection in CFRP (type: hole) detection of defect of 100% and 33% with diameter \varnothing of 10 mm;



✓ Figura 6 {
 - Variazione di tensione dovuta alla presenza di difetto rispetto ad una direzione di scansione longitudinale della sonda ECT di ispezione;
 - Voltage variation due to the presence of a defect with respect to a longitudinal direction of scanning of the probe ECT inspection;



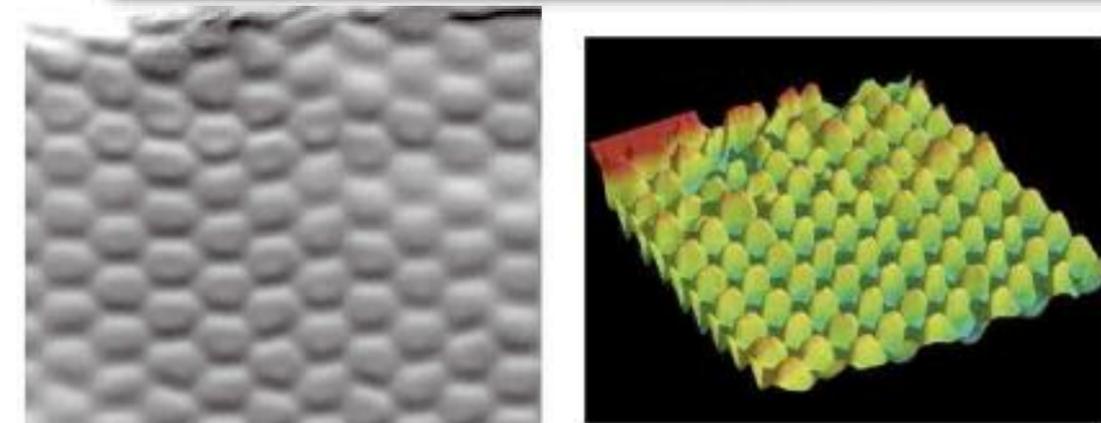
✓ Figura 7 {
 - Set-up di misura per ispezione di difetti su CFRP (tipologia: foro) rilevazione di difettosità del 100% e del 33% avente diametro \varnothing di 10 mm;
 - Measuring Set-up for defects inspection in CFRP (type: hole) detection of defect of 100% and 33% with diameter \varnothing of 10 mm;



✓ Figura 8 {
 - Risultato di ispezione OD alla frequenza di indagine di 15 kHz - parte reale di $|B_y|$;
 - Result of OD inspection at a investigation frequency of 15 kHz - real part of $|B_y|$;



✓ Figura 9 {
 - Rilevazione di difettosità mediante misure ECT condotte su CFRP per applicazioni aeronautiche [12];
 - Defects detection by using ECT measurements on CFRP for aeronautical applications [12];



✓ Figura 10 {
 - Rilevazione di difettosità su materiali compositi in fibra di carbonio con struttura 'a nido d'ape' [12];
 - Defects detection on carbon fiber composite materials with structure 'honeycomb' [12];

Ad esempio, in riferimento alla Fig. 11(b) derivante da analisi UT di tipo A-Scan su un campione di materiale CFRP, è possibile identificare un picco iniziale dovuto alla riflessione del segnale ultrasonico noto come "eco di interfaccia" e un secondo picco (intermedio, in anticipo rispetto all'"eco di fondo") causato dal riflesso del difetto. Tuttavia, in particolari casi, la presenza di difettosità come quelle rappresentate nelle figure 11(b) e 11(c) potrebbe rivelarsi particolarmente difficile da discriminare, avendo, in generale, le risultanze delle delaminazioni forme simili a quelle delle porosità.

Occorre inoltre tener presente come piccoli volumi di difetto potrebbero essere mascherate dalla presenza di rumore di fondo del segnale, mettendo così a rischio la corretta valutazione dell'integrità del materiale anche in una sola logica ON/OFF del difetto (presenza/assenza).

In tal guisa, pur essendo gli UTS in grado di ispezionare efficacemente materiali ad alta densità (come i CFRPs) e pur avendo dalla loro una notevole versatilità operativa [13], i problemi maggiori risultano legati alla corretta classificazione delle tipologie di difetto relativamente alla sola ispezione. Nello state-of-art sono presenti svariate tecniche di risoluzione del cosiddetto problema inverso, quali ad esempio le tecniche di *pattern recognition* ([14, 15] e riferimenti al loro interno). In particolare, un approccio ricorrente si basa sull'impiego delle

For example, with reference to Fig. 11(b) resulting from analysis of type A-Scan UT on a sample of material CFRP, it is possible to identify an initial peak due to the reflection of the ultrasonic signal known as the "echo interface" and a second peak (intermediate, ahead of all "echo back") caused by the reflection of the defect.

However, in certain cases, the presence of defects such as those represented in Figures 11(b) and 11(c) could be particularly difficult to discriminate, having, in general, the results of the delamination shapes similar to those of porosity. Account should also be present as small volumes of defect could be masked by the presence of background noise signal, thereby jeopardizing the correct evaluation of the integrity of the material even in a single ON/OFF logic of the defect (presence/absence).

In this manner, while being able to inspect the UTS effectively high-density materials (such as CFRPs) and while having from their considerable operational versatility [13], the main problems are related to the correct classification of the types of defect in relation to the single inspection. In the state-of-art there are various techniques for resolution of the so-called inverse problem such as the *pattern recognition* techniques ([14, 15] and references therein).

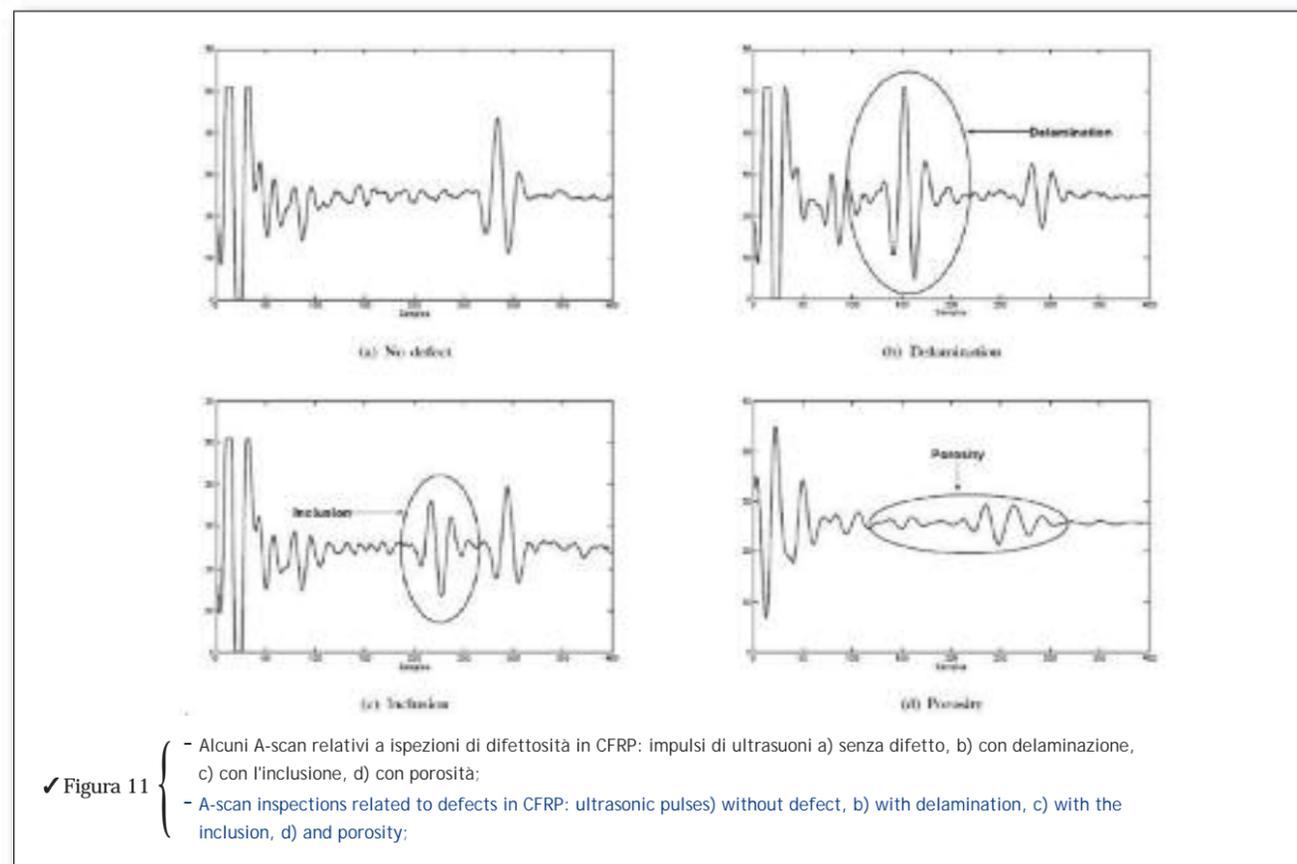
In particular, an approach is based on the applicant of

tecniche di *Computazione Intelligente*. L'idea di base è infatti quella di risolvere il problema di classificazione mediante un approccio euristico, basato sull'impiego di misure sperimentali effettuate ad-hoc, che vanno a costituire la base di dati di partenza (su cui si operano eventualmente step di pre-elaborazione), operando con funzioni appositamente realizzate, per effettuare l'apprendimento del sistema e giungere alla regolarizzazione mediante apprendimento del problema. In tale ottica, occorre sottolineare come sia necessaria l'analisi, oltre che la conoscenza, dei parametri statistici caratteristici dei segnali da investigare (siano essi mono che bi-dimensionali) e come particolare attenzione debba essere dedicata al database di partenza (in termini di dimensione o tipologia), onde evitare di incorrere in problemi caratteristici di queste metodologie, quali il *curse of dimensionality* (numero eccessivo di ingressi che aumenta il grado di complessità del sistema senza alcun vantaggio in termini di prestazioni classificazione). Per questo scopo, una banca dati appropriata può essere costruita operando in fase di pre-elaborazione delle misure sperimentali, selezionando quelle caratteristiche in grado di fornire una separazione delle classi il più netta possibile.

the techniques of *computation intelligent*. The basic idea is indeed to solve the problem of classification by means of a heuristic approach, based on the use of experimental measurements carried out ad-hoc, which go to form the basis of initial data (on which the operating step may be pre-processing), working with functions specifically made to make learning the system and achieve through learning the regularization of the problem.

In this context, it should be stressed as is necessary in the analysis, as well as the knowledge of the statistical parameters characteristic of the signals to be investigated (whether they are mono or bi-dimensional) and as a particular attention must be dedicated to the database of departure (in terms of size or type) in order to avoid running into problems characteristic of these methods, such as the *curse of dimensionality* (too many inputs, which increases the complexity of the system without any benefit in terms of classification performance).

For this purpose, an appropriate database can be constructed by making a pre-processing of the experimental measurements, selecting those features can provide the clearest possible classes separation.



Bibliografia

1. L. Allegrucci, Incidenti per cedimenti strutturali: cause tecniche o Fattore Umano? Sicurezza del Volo, 275, 14-2.5, 2009.
2. F. De Paolis, Controlli non Distruttivi sulle Strutture Aeronautiche in Materiale Composito, Sicurezza del Volo, 280, 14-25, 2010.
3. L. Allegrucci, Chip Detector e Studio del Particolato Metallico, Sicurezza del Volo, 271, 12-23, 2009.
4. E. J. Hearn, Mechanics of Materials, 2voll., 3rd Ed., Butterworth & Heinemann, Oxford, 1997.
5. A. Carpinteri, Meccanica dei Materiali e della Frattura, Pitagora Ed., Bologna, 1992.
6. M. W. Hyer, Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, McGraw Hill Int. Ed., Boston, 2000.
7. G. Caligiana, F. Cesari, I Materiali Compositi, Pitagora Editrice, Bologna, 2002.
8. A. Carotti, P. Benetti, Materiali avanzati e compositi, Pitagora Editrice, Bologna, 1999.
9. G.H. Staab, Laminar Composites, Butterworth & Heinemann, Oxford, 1999.
10. R. H. Knibbs, J. B. Morris, The effects of fiber orientation on the physical properties of composite, Composites, 5, 209-218, 1974.
11. M. Cacciola, A Gasparics, G. Megali, D. Pellicano, F. C. Morabito, T. Farkas, J. Szolloy, Model for Eddy Current Testing of CFRPs, AIRTEC Conference, 2009.
12. G. Megali, Technology transfer for civil and industrial applications in non destructive testing and evaluation, PHD Thesis, 2011.
13. M. Buonsanti, M. Cacciola, S. Calcagno, F. C. Morabito, M. Versaci, Ultrasonic pulse-echoes and eddy current testing for detection, recognition and characterization of flaws detected in metallic plates, ECNDT06, 2006.
14. L. M. Brown, R. W. Newman, R. Denale, C. A. Lebowitz, F. G. Arcella, Graphite epoxy defect classification of ultrasonic signatures using statistical and neural network techniques, Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 11, 677684, 1991.
15. S. Mukherjee, S. Samanta and D. Datta, Ndt of a composite domain using ultrasonic tomography, NDE Conference, (2006).