

Valutazione dei difetti con tecniche termografiche

I materiali compositi sono utilizzati in tutti i campi dell'ingegneria dove è richiesto un elevato rapporto resistenza-peso. Le proprietà meccaniche di tali materiali possono essere compromesse dalla presenza di difetti generati in fase di produzione o di danneggiamenti dovuti a severe condizioni di esercizio. La termografia stimolata rispetto alle tecniche più tradizionali [1-3], consente di ispezionare grandi superfici di materiale in tempi relativamente brevi, il che la rende particolarmente adatta per la diagnostica di grandi strutture. Le tecniche termografiche stimolate [4] permettono la rilevazione dei difetti grazie al differente comportamento termico di questi ultimi rispetto al materiale base, considerato privo di difetti. Questo comportamento è dovuto alle differenti proprietà termo-fisiche del materiale coinvolte nei fenomeni di trasmissione del calore.

In questo lavoro si focalizzerà l'attenzione sulla tecnica lock-in andando ad analizzare singolarmente i vari parametri di prova. L'obiettivo principale è quello di ottimizzare la procedura di prova non solo in termini di qualità dei risultati ma anche dal punto di vista dei tempi di prova. Tali parametri sono stati poi utilizzati per rilevare i difetti presenti in un componente GFRP utilizzato per la costruzione di pale eoliche ed in componenti aeronautici.

La tecnica termografica lock-in è basata sulla generazione di onde termiche all'interno del provino, ottenute depositando periodicamente calore sulla superficie dello stesso [4]. La risposta termica del materiale può essere ricostruita ottenendo informazioni sia sull'ampiezza sia sulla fase dell'onda termica. Nell'immagine di fase i difetti appaiono con una fase differente rispetto al materiale omogeneo senza difetto. Inoltre la fase dell'onda termica è relazionata direttamente alla profondità raggiunta. La capacità di penetrazione dell'onda termica può essere espressa mediante la lunghezza di diffusione termica μ :

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\rho c_p \omega}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

con k , conducibilità termica, ρ , densità del materiale e c_p capacità termica a pressione costante.

PROVINI E SET-UP DI PROVA

I test sono stati eseguiti su un provino campione sul quale sono stati simulati dei difetti di forma circolare mediante dei fori ciechi (fig.1). La dimensione dei difetti varia tra 7 mm e 15 mm, mentre la profondità varia tra 0,5 mm e 12 mm. Il provino è costituito da resina epossidica rinforzata da un doppio strato di fibre di vetro quadri-assiali, 0°/+45°/90°/-45°.

Le prove termografiche lock-in sono state condotte utilizzando una termocamera FLIR SC640 con sensore microbolometrico 640x512 pixel e sensibilità termica NETD < 30 mK.

Il set-up di prova utilizzato è quello mostrato in figura 1. Con tale set-up si è ottenuta una risoluzione geometrica di 0,76 mm/pixel.

Sono state utilizzate 2 lampade alogene di potenza 500 W ciascuna, controllate mediante la scheda MultiDES® (by DES) che consente di generare differenti forme d'onda tra cui la sinusoidale e la quadra utilizzate in questo lavoro.

I parametri di prova sul quale si è puntata l'attenzione sono stati:

- il numero di cicli di eccitazione termica
- la forma d'onda (sinusoidale o quadra).

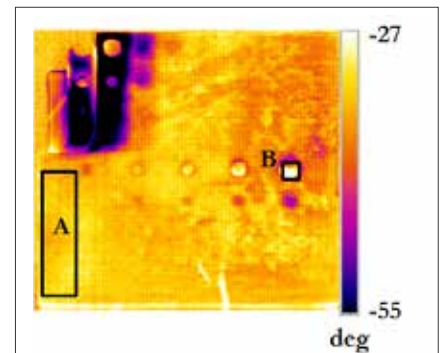


Fig.2: Aree di analisi considerate per la valutazione della deviazione standard

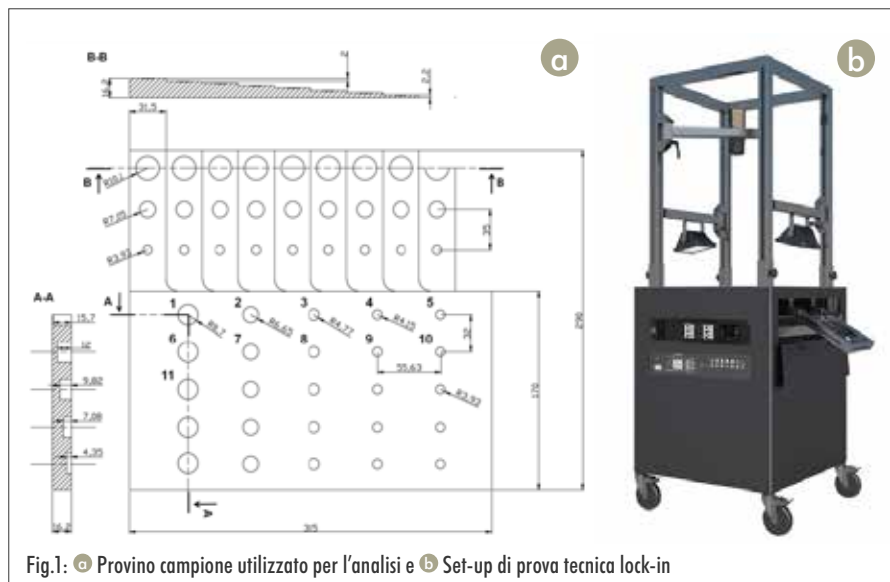


Fig.1: a) Provino campione utilizzato per l'analisi e b) Set-up di prova tecnica lock-in

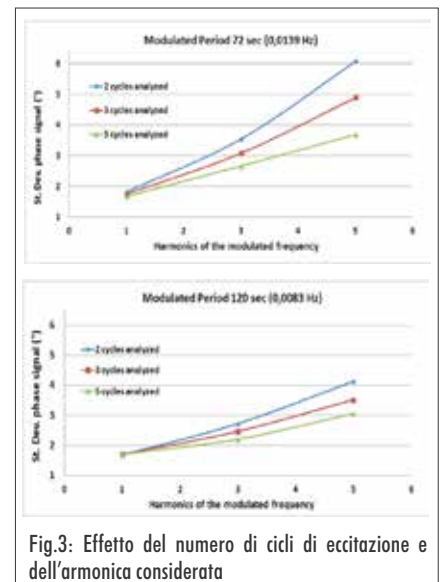
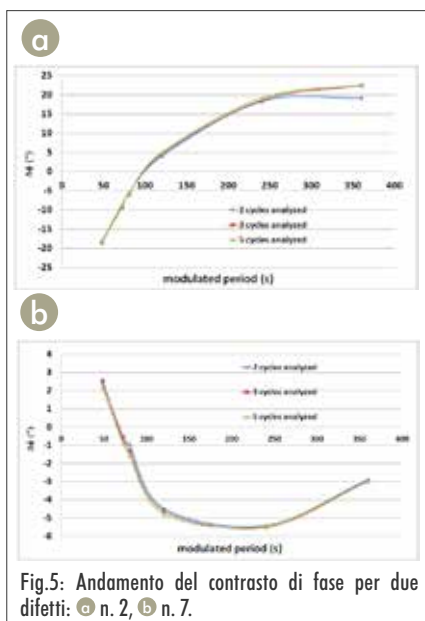


Fig.3: Effetto del numero di cicli di eccitazione e dell'armonica considerata



A tal proposito per entrambe le forme d'onda sono stati utilizzati i seguenti periodi di eccitazione termica 48, 72, 80, 120, 240, 360 s, adottando sempre 100 frame per ciclo come sequenza di acquisizione. Le analisi sono state condotte mediante il software IRTA® che permette di ottenere, in caso di onda quadra, le immagini di fase in corrispondenza delle armoniche più elevate rispetto alla principale (terza e quinta).

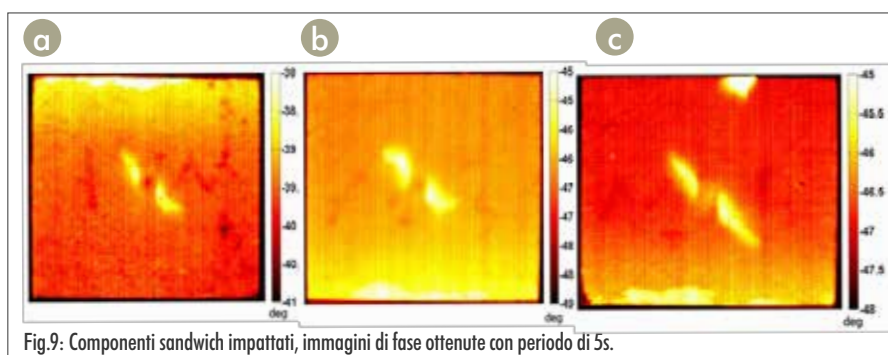
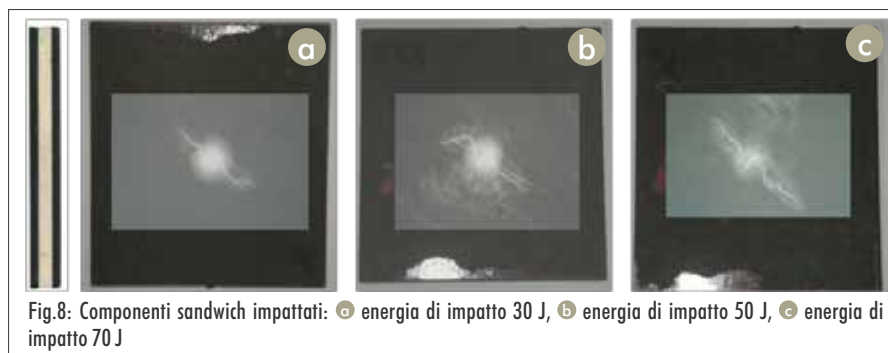
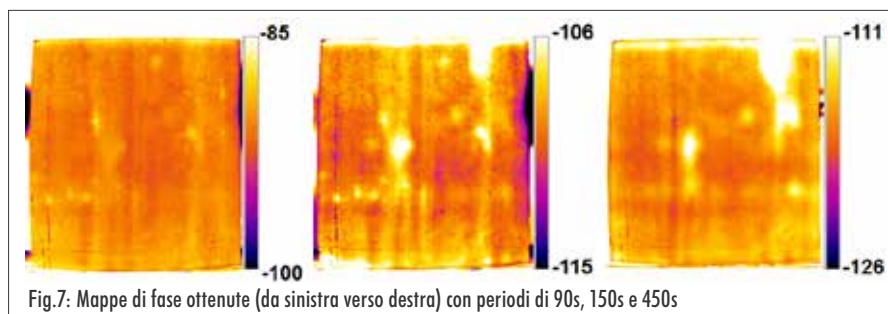
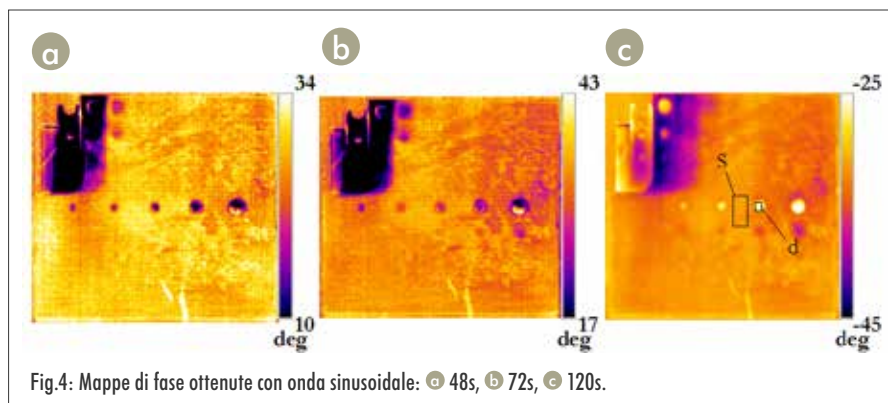
RISULTATI E DISCUSSIONE: PROVINO CAMPIONE

La figura 3 mostra, per 2 differenti periodi di eccitazione con onda quadra, l'andamento della deviazione standard nell'area A di figura 2 in funzione del numero di cicli di eccitazione (2, 3 o 5) e del tipo di armonica considerata (I, III o V).

Come ci si aspettava, la deviazione standard aumenta per le armoniche più alte e considerando un numero di cicli di eccitazione più basso. Tali influenze sono più marcate per periodi di eccitazione più bassi e tendono a diventare quasi trascurabili per periodi alti.

La figura 4 mostra le mappe di fase ottenute con sorgente sinusoidale e con 3 cicli di eccitazione per 3 differenti periodi. In particolare si può notare come i difetti più piccoli e più profondi sono visibili in corrispondenza di periodi più alti.

In figura 5 è mostrato l'andamento del contrasto di fase per due difetti delle stesse dimensioni (diametro 13 mm) ma a profondità differenti (0,5 mm e 4 mm). Come ci si aspettava, il difetto superficiale ha i valori più alti di $\Delta\phi$ in corrispondenza di periodi più bassi rispetto al difetto più in profondità. Differenze si notano anche in termini assoluti nel senso che $\Delta\phi$ più alti si hanno in corrispondenza dei difetti più superficiali.



- Valutazione dei difetti con tecniche termografiche -

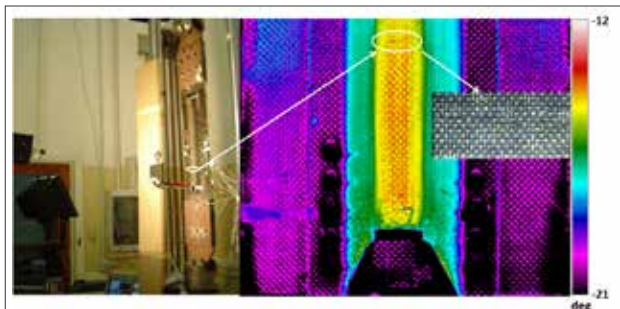


Fig.10: Prova termografica lock-in su un componente aeronautico stringer durante una prova di fatica. Particolare della cricca rilevata.

APPLICAZIONI SU COMPONENTI IN MATERIALE COMPOSITO

Componente GFRP pala eolica

In figura 6 è mostrato il componente in GFRP utilizzato per i test di dimensioni 350x350 mm e spessore variabile (spessore medio circa 20 mm).

In figura 7 sono mostrate le mappe di fase ottenute con eccitazione di tipo sinusoidale ad un periodo di 90s, 150s e 450s. Come si può notare, all'aumentare del periodo di eccitazione compaiono difetti via via più profondi.

In figura 6 si nota come sulla parte superiore del provino sia presente un difetto posto a circa 6 mm dalla superficie e largo circa 42 mm. Tale difetto diventa visibile in corrispondenza di un periodo pari a 150 s.

Componenti Aeronautici Sandwich (CFRP)

In figura 8 sono mostrati 3 componenti sandwich composti da schiuma sintattica "Henkel Syncore 9872.1, K40" (spessore 4 mm) e 2 laminati in fibra di carbonio CFRP (spessore 2.3 mm) sottoposti a prova di impatto con 3 differenti livelli di energia: 30, 50, 70J. Sono mostrate anche lastre radiografiche che evidenziano l'estensione del danneggiamento prodotto. In figura 9 sono riportate le immagini di fase lock-in ottenuto con periodo di eccitazione di 5 secondi. Si può osservare come in questo caso la tecnica lock-in sia competitiva con gli x-ray nella individuazione delle zone delaminate prodotte dall'impatto.

Componenti Aeronautici Stringer (CFRP)

In figura 10 è riportato un componente aeronautico in fibra di carbonio (stringer) durante una prova di fatica. In questo caso si è utilizzata la tecnica lock-in per monitorare il danneggiamento a fatica del componente. Come si evince dall'immagine di fase di figura 10 (periodo 10 secondi), in questo caso la tecnica è stata in grado di rilevare la presenza di una cricca sul rinforzo centrale del componente. Nella stessa figura è riportata un'immagine della cricca ottenuta con il microscopio ottico.

CONCLUSIONI

In questo lavoro si è focalizzata l'attenzione sull'utilizzo della tecnica termografica lock-in per il controllo non distruttivo dei materiali compositi. I risultati ottenuti in termini di capacità di rilevare e caratterizzare difetti quali delaminazioni, cricche, bolle d'aria, risultano ottimi in comparazione alle tecniche NDT tradizionali consolidate.

BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

- [1] Hosur, M.V., Murthy, C. R. L., Ramamurthy, T. S., Shet, A. (1998) *Estimation of impact-induced damage in CFRP laminates through ultrasonic imaging*, *NDT&E International*, 31-5, 359-374.
- [2] Palumbo D., Ancona, F., Galietti, U. (2015) *Quantitative damage evaluation of composite materials with microwave thermographic technique: feasibility and new data analysis*, *Meccanica*, 50, 443-460.
- [3] Tamborrino R., Aversa P., Tati A., Luprano V. A., Galietti U., Palumbo D. (2014) *Ultrasonic and thermographic analysis of composite adhesive joints subjected to accelerated aging*, *ECNDT 2014*, Prague.
- [4] Maldague, X. P. V. (2001) *Theory and practice of infrared technology of non-destructive testing*, John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-18190-0.

Evaluation of defects by means of thermographic methods

Composite materials are used in all sectors of engineering that require a high strength-weight ratio. The mechanical properties of such materials can be compromised by the presence of defects generated during the production phase or damage due to severe operating conditions.

Stimulated thermography, compared to more traditional methods [1-3], allows for the inspection of large surfaces of material in quite short times, which makes it particularly suitable for the diagnostics of large structures.

Stimulated thermographic methods [4] allow for the detection of defects thanks to the different thermal behavior of the latter compared to the sound material that is considered free of defects. This behavior, as already mentioned, is due to the different thermal and physical properties of the material involved in the phenomena of heat transmission. This paper will focus on the lock-in thermography, individually analyzing the various test parameters. The main target is to optimize the test procedure, not only in terms of quality of the results but also from the perspective of test times. These parameters were then used to detect defects in a GFRP component used for the construction of wind turbines and in aircraft components.

The lock-in thermographic method is based on the generation of thermal waves inside the specimen obtained by periodically depositing heat over the surface of the same [4]. The thermal response of the material can be reconstructed providing information both on the amplitude and on the phase of the thermal wave. In the image phase, defects appear with a different phase compared to homogeneous non-defective material. Furthermore, the phase of the thermal wave is directly related to the depth reached.

The penetration capacity of the thermal wave can be expressed by the thermal diffusion length μ :

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\rho c_p \omega}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

with k , thermal conductivity, ρ , density of material and c_p thermal capacity with constant pressure.

SPECIMENS AND EXPERIMENTAL SET-UP

The tests were carried out on a sample specimen on which circular shape defects were simulated by flat-bottom holes Fig.1. The dimension of defects varies between 7 mm and 15 mm while the depth varies between 0,5 mm and 12 mm. The test piece is composed of epoxy resin reinforced by a double layer of quadriaxial glass fibers, $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$.

Lock-in thermographic tests were carried out using a Flir sc640 thermal camera with microbolometer sensor 640x512 pixel and thermal sensitivity NEDT < 30 mK.

The test set-up used is that shown in figure 1. With this set-up we obtained a geometric resolution of 0,76 mm/pixel. We used 2 halogen lamps of 500 W each power controlled by the Multi-DES® (by DES) which allows for generation of different waveforms including the sinusoidal and square used in this work.

The test parameters on which we focused were:

- the number of thermal excitation cycles,
- the waveform (sinusoidal or square).

In this regard, for both waveforms we used the following periods of thermal excitation 48s, 72s, 80s, 120s, 240s, 360s, always adopting 100 frames per cycle as a sequence of acquisition.

Analyses were carried out using the IRTA® software which allows us to obtain – in case of square wave – the phase images in correspondence of the harmonics which were higher than the main (third and fifth).

RESULTS AND DISCUSSION: SPECIMEN TEST PIECE

Figure 3 shows, for 2 different periods of excitation with square wave, the trend of the standard deviation in area A of figure 2 as a function of the number of excitation cycles (2, 3 or 5) and of the type of harmonic considered (I, III o V). As expected, the standard deviation increases for the higher harmonics and considering a lower number of excitation cycles. These influences are more pronounced for lower periods of excitation and tend to become almost insignificant for high periods

Figure 4 shows the phase maps obtained with a sinusoidal source and with 3 excitation cycles for 3 different periods. In particular, it can be noticed how smaller and deeper defects are visible in correspondence with higher periods. Figure 5 shows the trend of the phase contrast for two defects of the same size (diameter 13 mm) but with different depths (0,5 mm and 4 mm). As expected, the surface defect has $\Delta\phi$ values higher in correspondence with lower periods compared to the deeper defect. Differences are also observed in absolute terms meaning that higher $\Delta\phi$ are found in correspondence with more superficial defects.

APPLICATIONS ON COMPONENTS IN COMPOSITE MATERIAL

Wind turbine GFRP component

Figure 6 shows the GFRP component used for the tests with a size of 350x350 mm and variable thickness (average thickness about 20 mm).

Figure 7 shows the phase maps obtained by sinusoidal excitation with a 90s, 150s and 450s period. As you can see, increasing the excitation period, ever deeper defects appear.

Figure 6, shows how on the upper part of the specimen there is a defect placed at about 6 mm from the surface and measuring about 42 mm wide. This defect becomes visible in correspondence with a period equal to 150s.

Aircraft Sandwich Components (CFRP)

Figure 8 shows 3 sandwich components composed of syntactic foam "Henkel Syncore 9872.1, K40" (thickness 4 mm) and 2 laminates in carbon fibre CFRP (thickness 2.3 mm) subject to impact test with 3 different energy levels: 30, 50, 70J. There are also radiographic plates highlighting the extent of the damage produced.

Figure 9 shows the lock-in phase image obtained with an excitation period of 5 seconds. it can be observed how in this case the lock-in thermography is competitive with x-rays in the identification of the delaminated areas produced by the impact.

- Integrity assessment by thermographic methods -

Stringer Aircraft Components (CFRP)

Figure 10 shows an aircraft component in carbon fibre (stringer) during a fatigue test. In this case, we used the lock-in thermography to monitor the fatigue damage of the component. As it can be seen from phase image in figure 10 (period, 10 seconds), in this case, the method was able to detect the presence of a crack on the central bracing of the component.

In the same figure there is an image of the crack obtained by the optical microscope.

RESULTS

This work focused on the use of the lock-in thermographic method for non-destructive testing of composite materials. In particular, various tests

were made on a specimen test piece in GFRP in order to analyze the influence of the different test parameters on the quality of the results obtained. Then we applied the method on different components in composite material used in the aircraft and renewable energy industry. In all cases, the results obtained in terms of ability to detect defects such as delaminations, cracks and air bubbles, prove satisfactory compared to the usual traditional NDT methods.

All the mentioned figures refer to the Italian version

Fig.1: a) specimen used for the analysis and b) set-up for lock-in thermography

Fig.2: Areas of analysis considered for the assessment of the standard deviation

Fig.3: Effect of the number of excitation cycles and of the harmonic considered

Fig.4: Phase maps obtained with sinusoidal wave: a) 48s, b) 72s, c) 120s.

Fig.5: Trend of the phase contrast for two defects: a) $n^{\circ} 2$, b) $n^{\circ} 7$.

Fig.6: blade component and defect in the upper part of the specimen

Fig.7: map of phases obtained (from left to right) at 90s, 150s and 450s

Fig.8: Impacted sandwich components: a) impact energy 30 J, b) impact energy 50 J, c) impact energy 70 J

Fig.9: Impacted sandwich components, phase image obtained with 5s period.

Fig.10: Lock-in thermographic test on a stringer aircraft component during a fatigue test. Detail of the crack detected.

ALTAIR

Accordo pluriennale per l'accesso globale ai software

Altair ha annunciato un accordo con Airbus Group che permetterà ai designer ed agli ingegneri delle sue divisioni di Airbus di poter accedere all'intero portfolio di Altair, inclusa la suite HyperWorks® CAE per le sue funzionalità di modellazione, visualizzazione e per le soluzioni di ottimizzazione e calcolo.

Il nuovo accordo segue la precedente scelta strategica fatta da Airbus di adottare OptiStruct®, la soluzione di Altair per l'analisi e l'ottimizzazione strutturale.

Airbus ha potuto applicare OptiStruct in numerosi piani di ottimizzazione del peso e delle performance delle strutture dei suoi aeromobili per molti anni. I termini del contratto forniscono ad ogni ingegnere Airbus un accesso estremamente flessibile ad Altair HyperWorks per la computer-aided-enginee-

ring (CAE), a PBS Works™ per l'high-performance computing (HPC) e a solidThinking® per le soluzioni software per la progettazione a supporto dello sviluppo di aeromobili più leggeri e ad elevate prestazioni.

"La decisione di Airbus segna un'importante pietra miliare per HyperWorks che va così a collocarsi come una delle piattaforme preferite per i processi di design orientato dalla simulazione e di alleggerimento delle strutture per l'industria aerospaziale," ha dichiarato Robert Yancey, Senior Vice President of global aerospace ad Altair. "Siamo davvero molto lieti di continuare la nostra stretta e proficua collaborazione con Airbus Group grazie a questo nuovo contratto pluriennale. Attraverso questo elevato livello di coinvolgimento, ci aspettiamo di

potenziare maggiormente la nostra roadmap tecnologica ed i servizi offerti per supportare le diverse esigenze di Airbus, dei suoi fornitori e dell'intero settore, per favorire lo sviluppo degli incredibili design di aeromobili del domani."

Inoltre, l'accordo si completa con una collaborazione di consulenza a lungo termine tra Airbus ed Altair ProductDesign (APD, la divisione globale per i servizi di consulenza di Altair, che offre competenze ingegneristiche ed il know-how per lo sviluppo del settore aerospaziale e di molti altri settori industriali.

Tra gli altri progetti, APD ha contribuito alla nascita del primo Optimization Center d'Europa di Airbus, un innovativo business model di consulenza che permette l'applicazione strategica di tecnologie di ottimizzazione direttamente in azienda, con team specializzati, per raggiungere obiettivi di riduzione di peso. Ad oggi Altair vede i suoi Optimization Centers dislocati in oltre 20 OEM aeronautici ed automotive di tutto il mondo.

