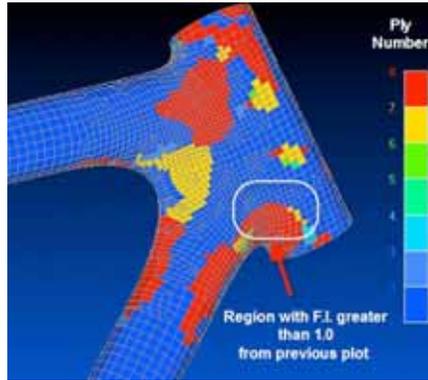
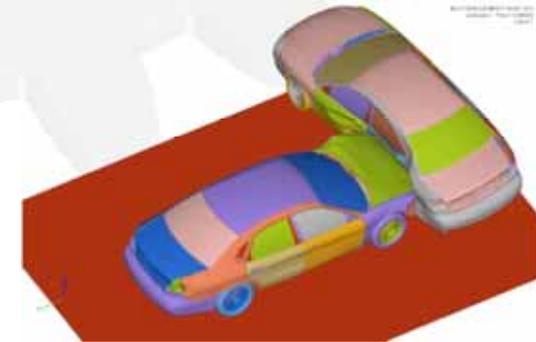
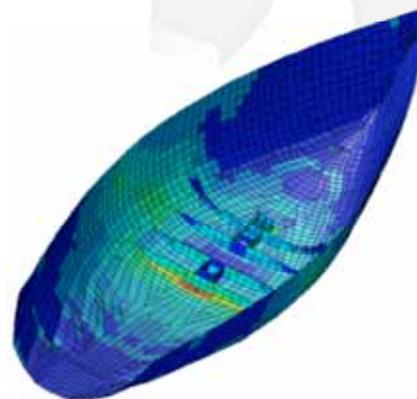
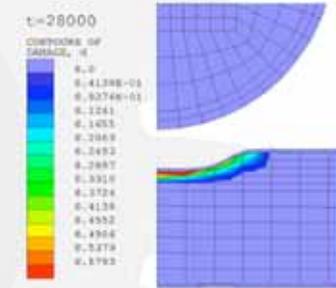


CompositiExpo
 ModenaFiere 14-15 ottobre
 2009

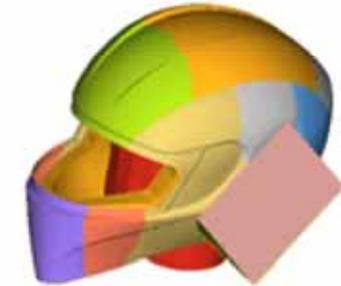


Supporto CAE alla progettazione con i materiali compositi: benefici, problematiche e potenzialità

Ing. L. Ferrero



CAE=Sperimentazione virtuale



1-Analisi delle finalità

Design for stiffness

Design for strength

Design for impact

a - Tipo di analisi (statica lineare e non, dinamica, etc.)

b - Codice (lineare o non, implicito o esplicito)

2-Metodologie di modellazione

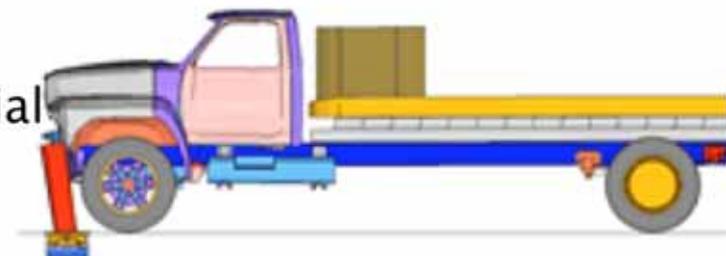
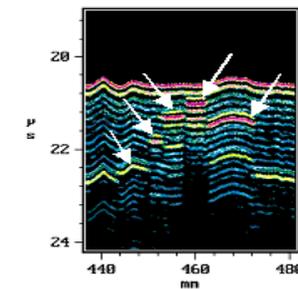
a - geometrie

b - interfacce

c - proprietà materiali

d - condizioni al contorno

e - formulazione/scelta modelli materiali



3-Analisi e interpretazione dei risultati

Design for stiffness

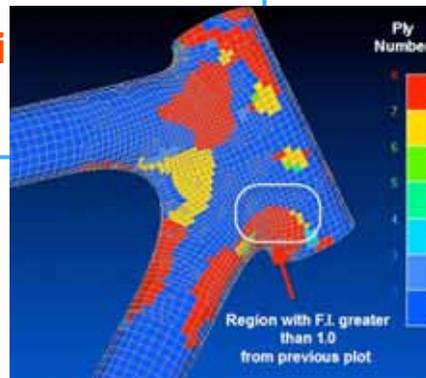
definire se la struttura garantisce la **necessaria rigidezza**

BC = deformazioni e spostamenti controllati, modi propri, NVH, trasmissione di vibrazioni indotte dalla propulsione

campo **lineare elastico**

analisi **statica, modale o armonica**

codici impliciti



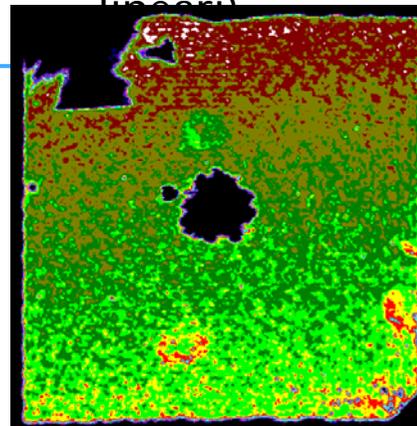
Design for strength

definire se la struttura garantisce la **necessaria robustezza**

Campo **elastico e plastico fino alla rottura**

analisi campo pre-failure, con l'utilizzo di opportuni **coefficienti di sicurezza**

codici impliciti (non lineari)



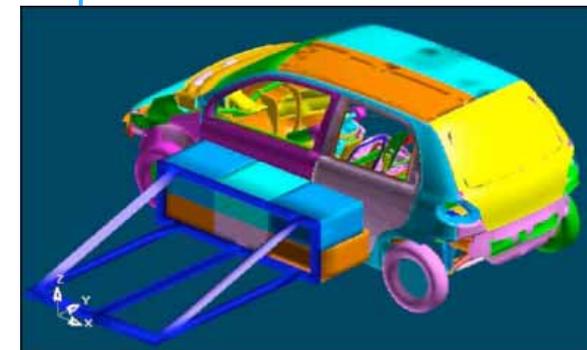
Design for impact

definire se la struttura garantisce il **necessario assorbimento di energia** e la **resistenza strutturale opportuna**

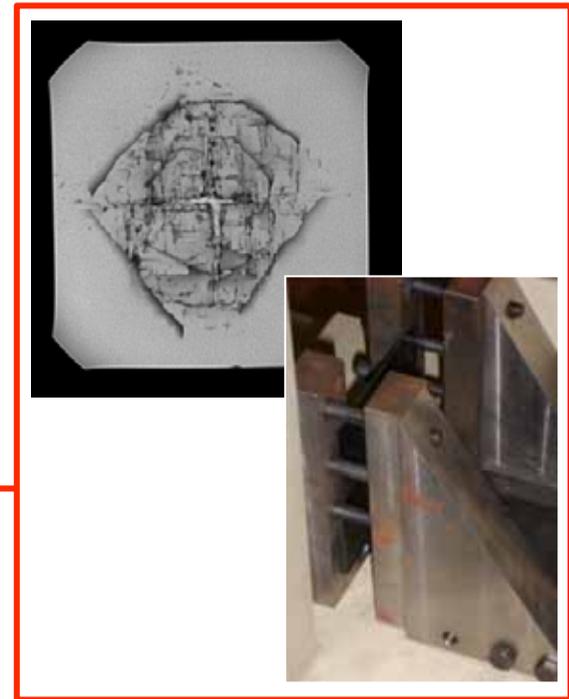
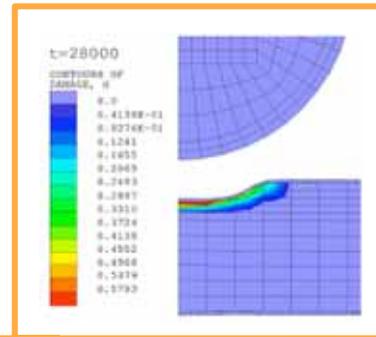
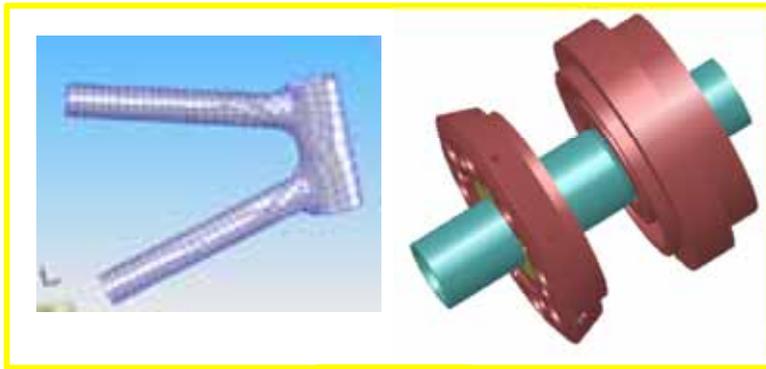
Campo da **pre-failure a post failure**

analisi dei **meccanismi di danneggiamento**

codici espliciti



METODOLOGIE DI MODELLAZIONE



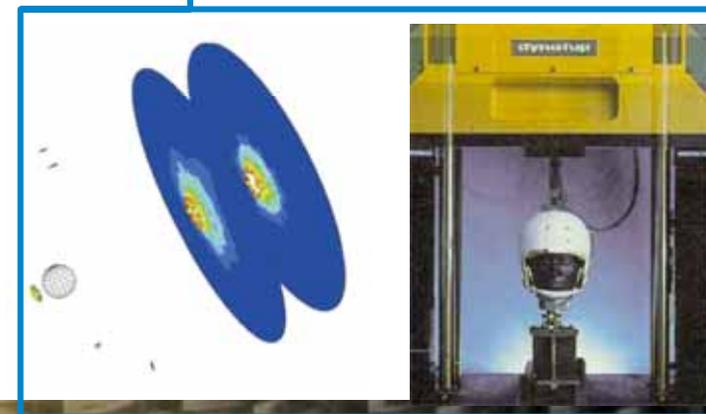
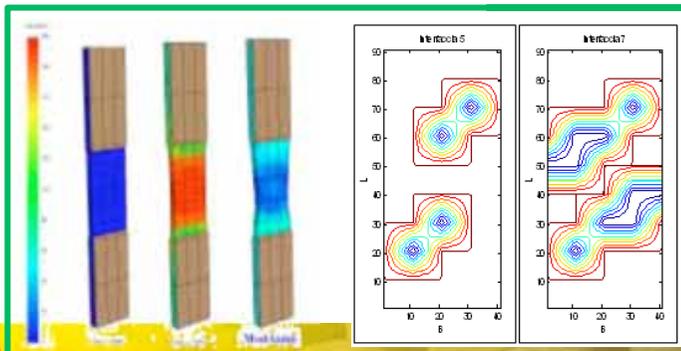
Geometrie

Interfacce

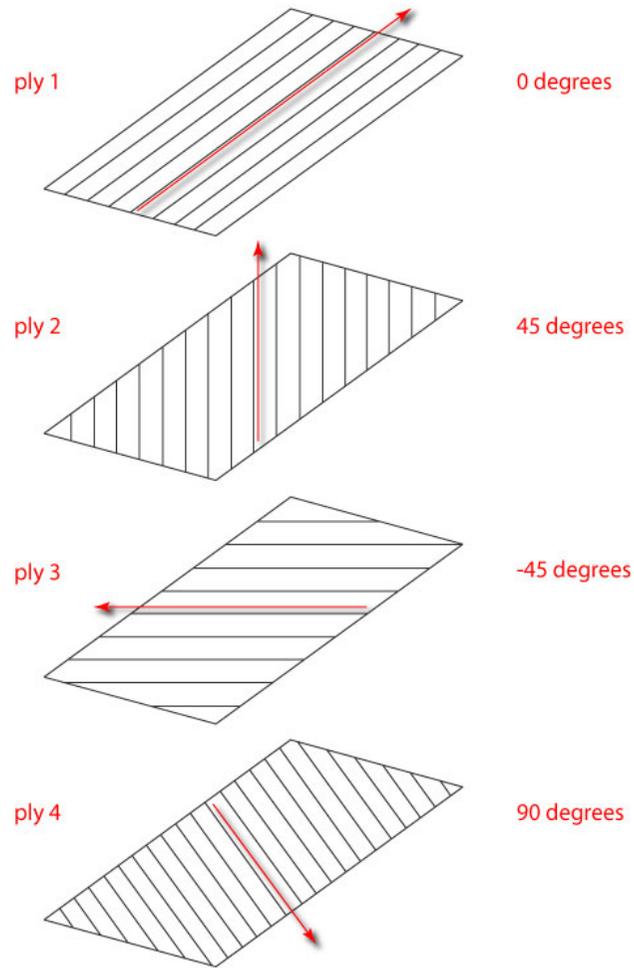
Proprietà materiali

Condizioni al contorno

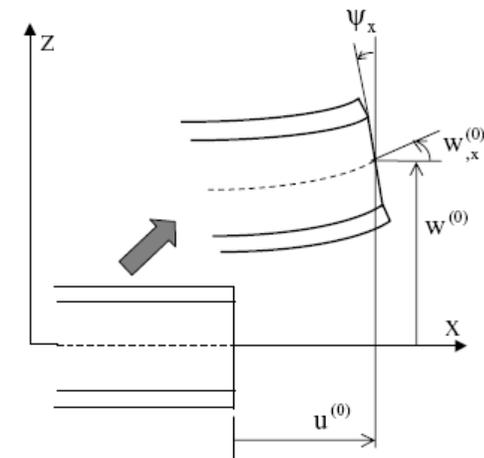
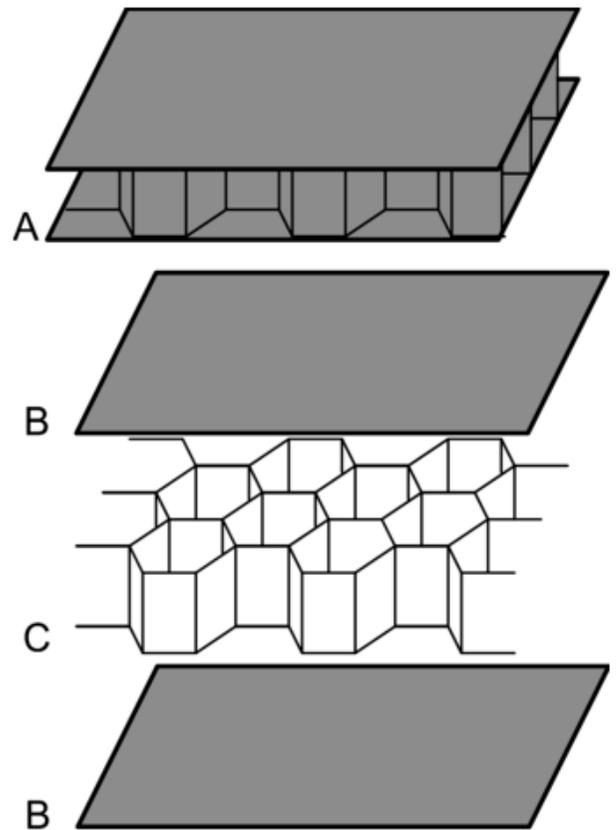
Formulazione/scelta modelli materiale

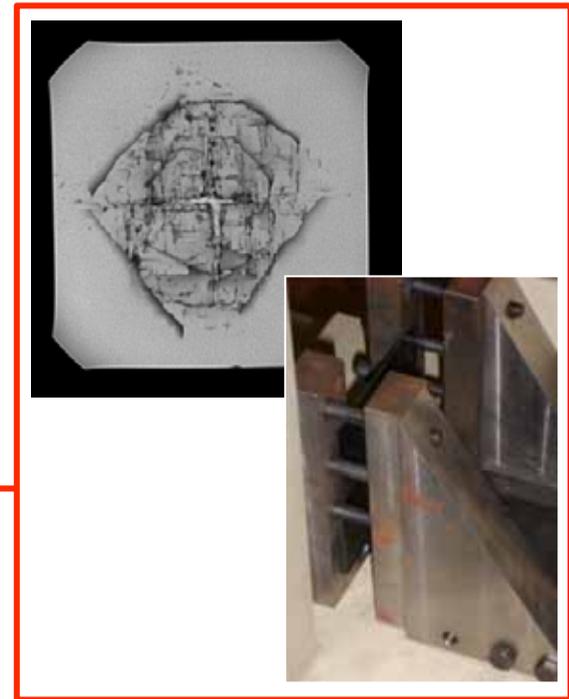
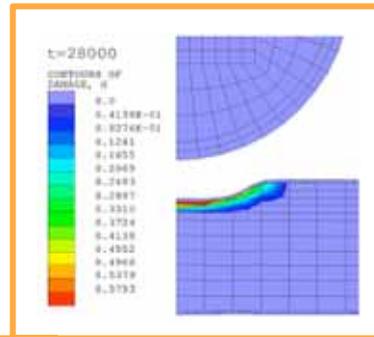
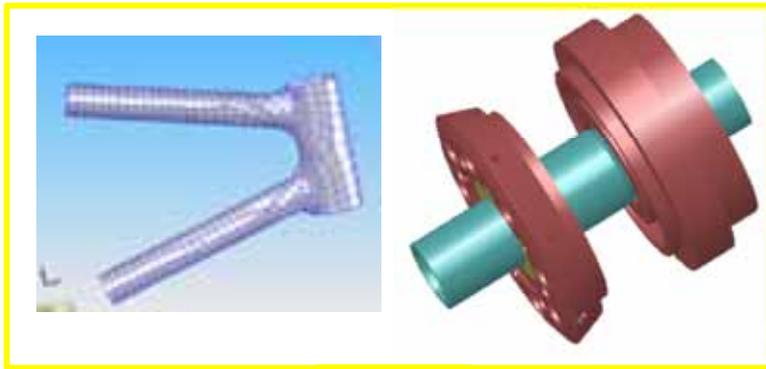


Multilayered composite panel



Sandwich composite panel





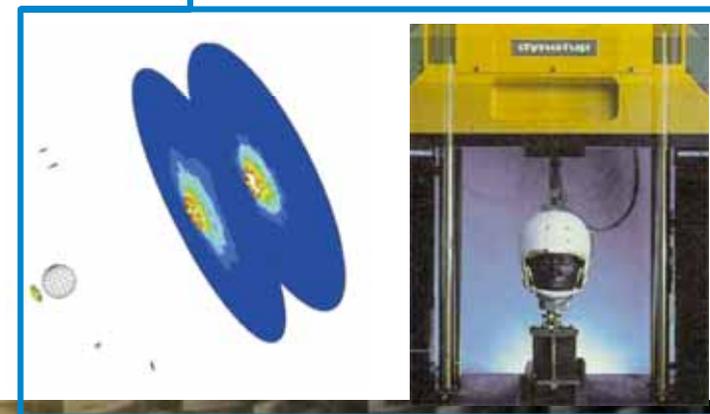
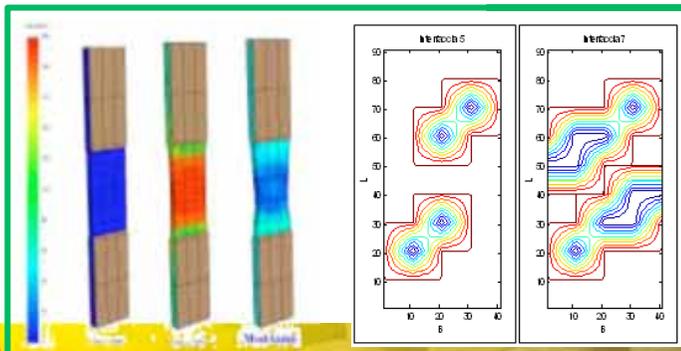
Geometrie

Interfacce

Proprietà materiali

Condizioni al contorno

Formulazione/scelta modelli materiale



MODELLO

INTERNE ☒ ply-to-ply

- multistrato: l'elemento shell usato prevede una stratificazione = teorie Equivalent Single Layer (ESL)
- sandwich: come multistrato o, per analisi più specifiche, modellazione shell ESL per facce, solidi per core

ESTERNE ☒ component-to-component

- si modellizzano in modo analogo ai materiali classici, compatibilmente con le tecniche adatte per i compositi

GIUNTI INCOLLATI

- + continuità struttura, assenza effetti intaglio
- peel stress ☒ necessità di studio locale dell'interfaccia

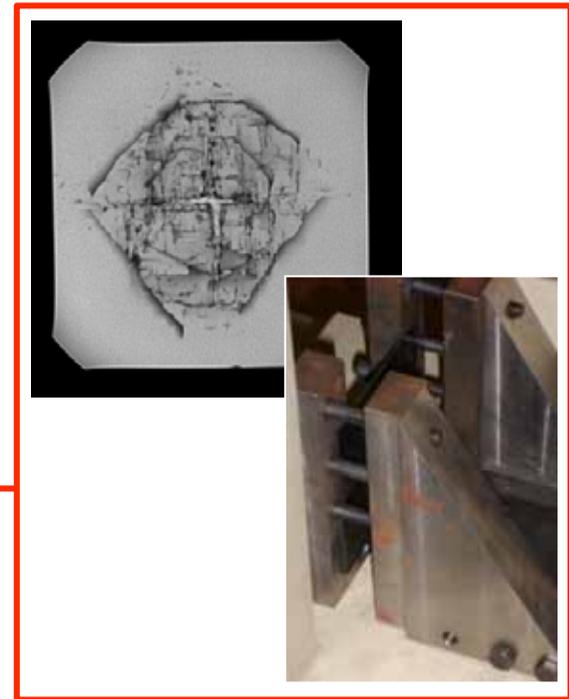
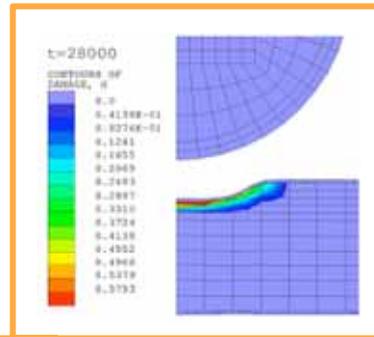
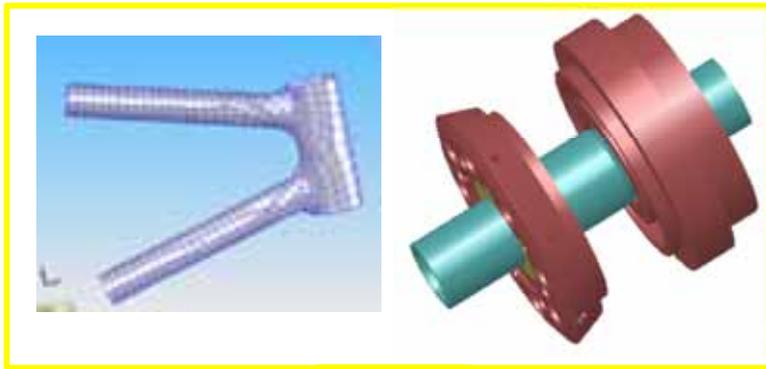


GIUNTI IMBULLONATI/RIVETTATI

- + rapido disassemblaggio per manutenzione/ispezione
- effetti di intaglio, discontinuità



TECNOLOGIE



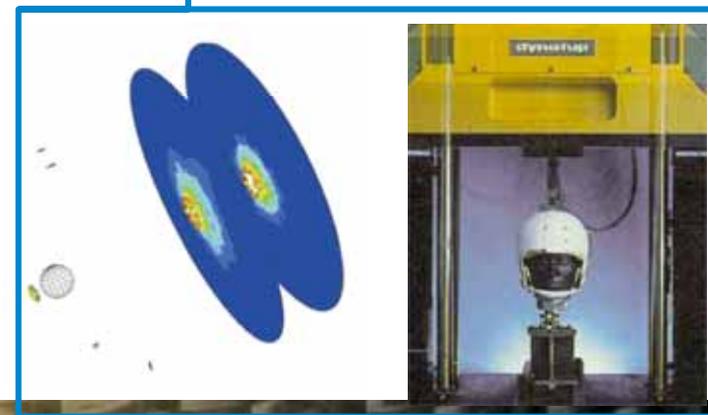
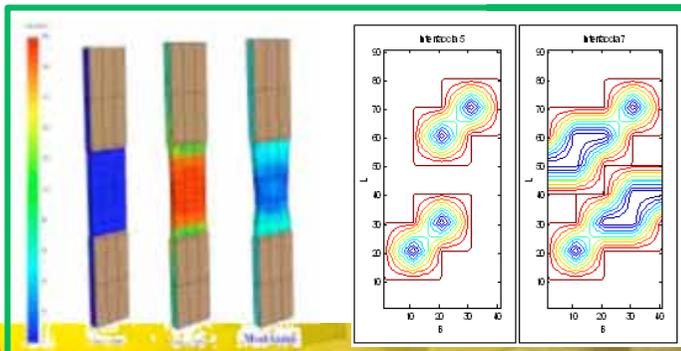
Geometrie

Interfacce

Proprietà materiali

Condizioni al contorno

Formulazione/scelta modelli materiale



CAMPO ELASTICO

- Ortotropia
- Prove di trazione 0°, 90°, 45°
- Pre-failure, no danneggiamento

DESIGN FOR STIFFNESS

INNESCO DI FAILURE NELLE COMPONENTI

- Fiber breakage, fiber kinking, matrix cracking
- Degrado locale e progressivo delle proprietà meccaniche
- Prove trazione/compressione 0°, 90°, 45°

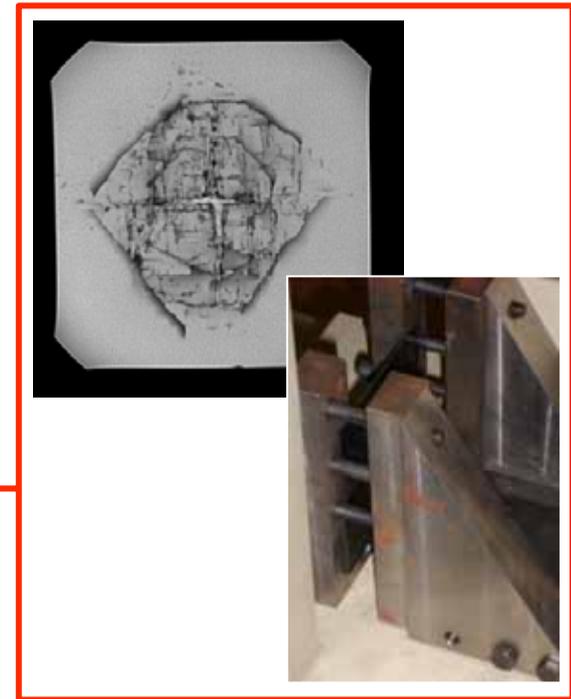
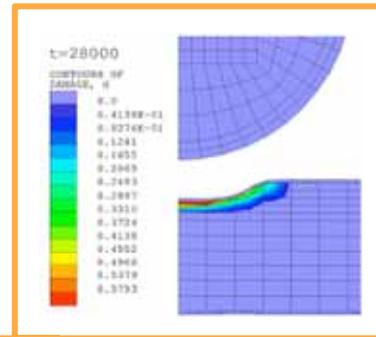
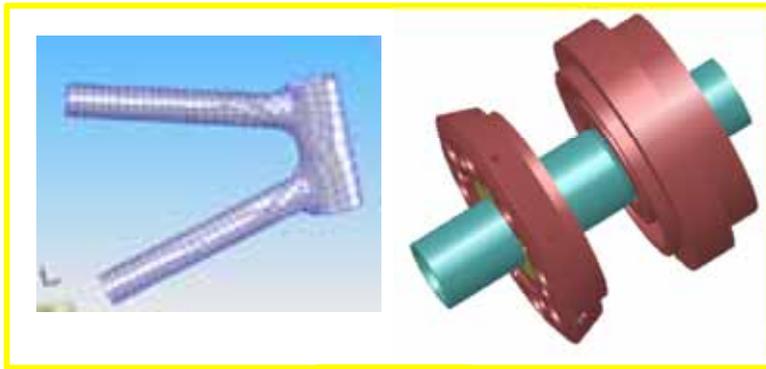
DESIGN FOR STRENGTH

PROPAGAZIONE FAILURE E CEDIMENTO

- Macro-failure (coalescenza di micro-damages)
- Delaminazione alle interfacce, delaminazione tra fibre e matrice, cricche passanti
- Analisi delle proprietà residue e dell'energia assorbita nell'innescò e nella propagazione di failures

DESIGN FOR IMPACT / CRASHWORTHINESS

- Ispezioni C-scan, spettrografie, modi di apertura e il



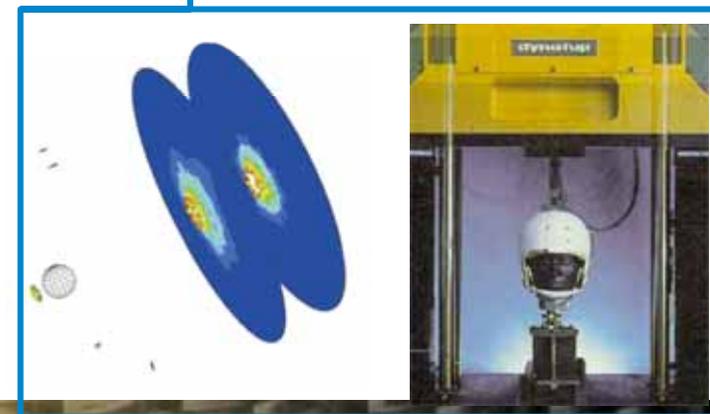
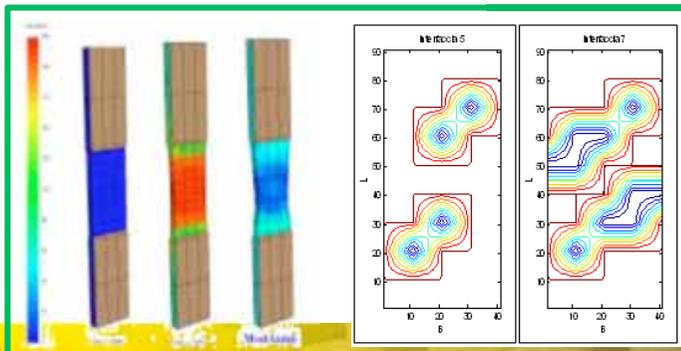
Geometrie

Interfacce

Proprietà materiali

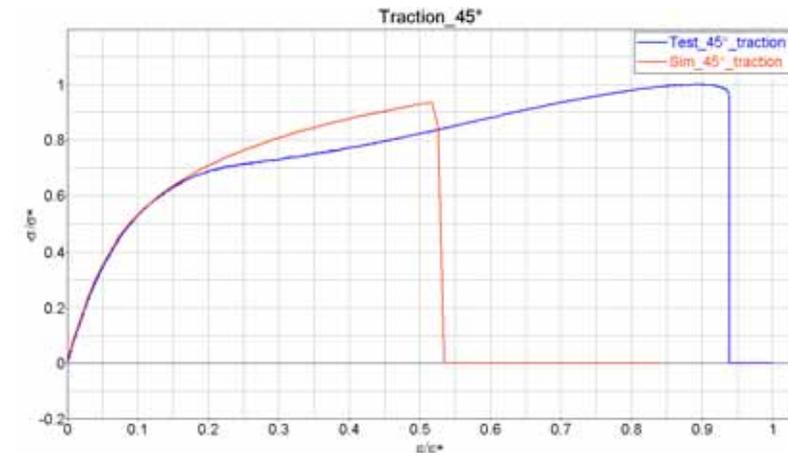
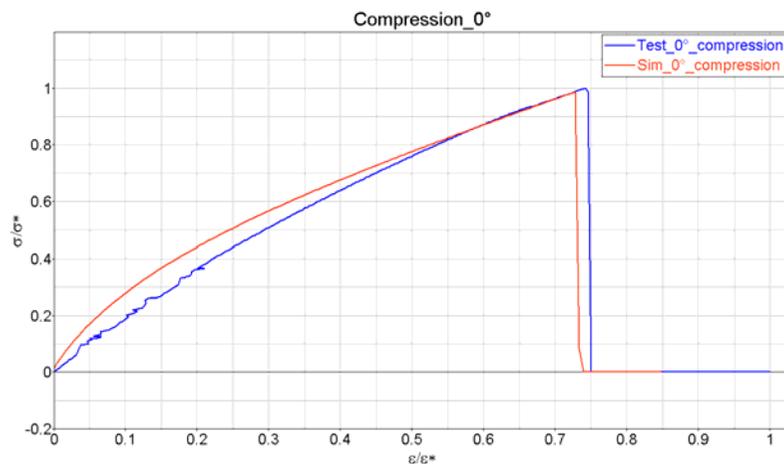
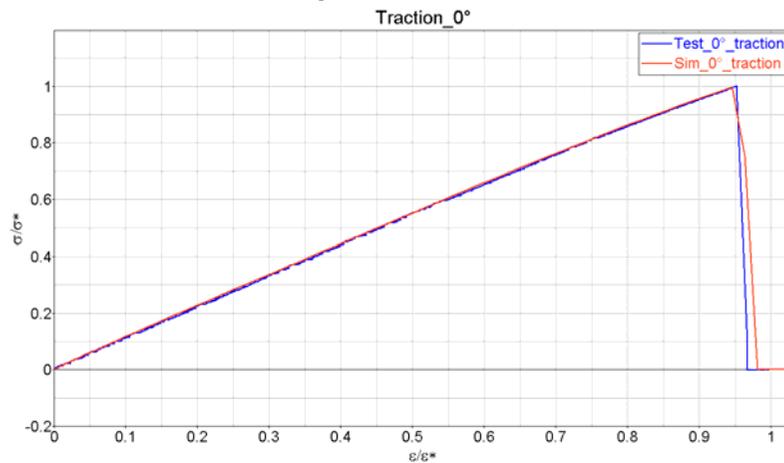
Condizioni al contorno

Formulazione/sceita modelli materiale



ESEMPI DI LEGGI COSTITUTIVE

Modello di materiale implementato in RADIOSS per lo studio dei compositi:

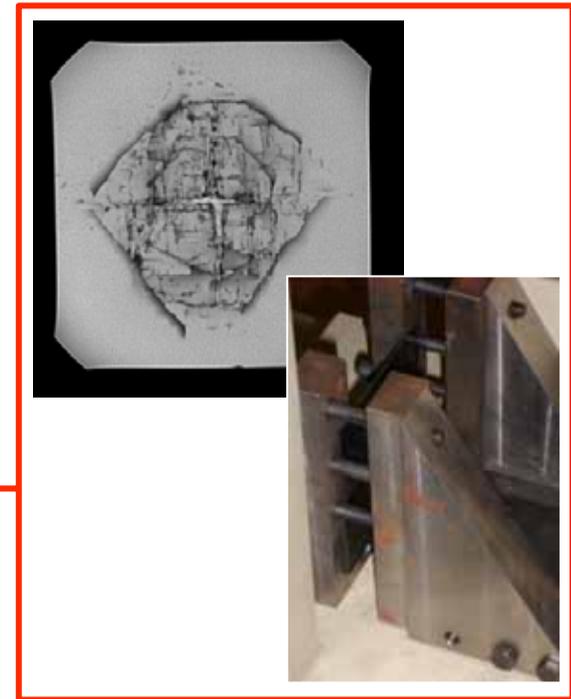
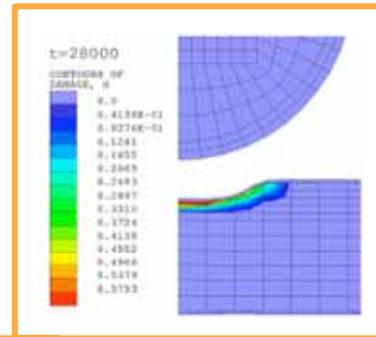
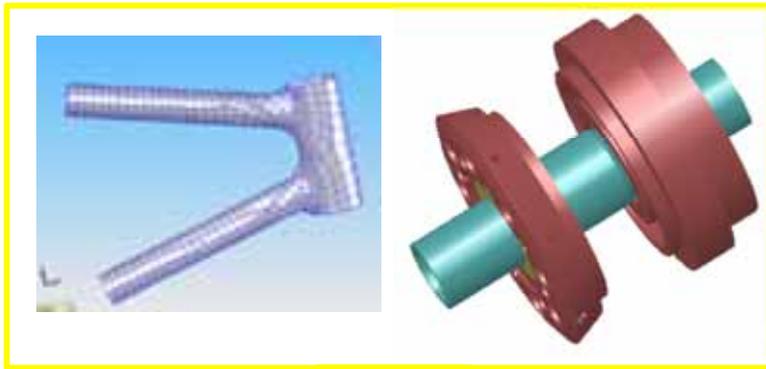


- Campo elastico ortotropo
- Due modelli per la plasticizzazione:
 1. Tsai-Wu – hardening isotropo
 2. CRASURV – hardening ortotropo
- Failure fragile σ_1 trazione
- Failure per lavoro di plasticizzazione massimo σ_2 compressione e taglio
- Innesco del danneggiamento ($d > 0$) e propagazione lineare verso la rottura ($0 < d < 1$), con d specializzato per le direzioni di ortotropia

MODELLI FAILURE

Nei codici commerciali oggi disponibili troviamo svariati modelli per lo studio del danneggiamento nei materiali compositi.

1. **Modelli stress-based** – il failure viene descritto in funzione del campo di tensione e/o di deformazione che si riscontra a livello di ply
3. **Modelli component-level** – il failure viene descritto in funzione del campo di tensione, ma calcolato a livello di componenti (fibra, matrice) o di interface model, solo studi accademici
5. **Modelli basati sulla Fracture Mechanics** – il failure viene descritto in funzione dell'energia assorbita al momento dell'innesco e della propagazione di una cricca. Di queste teorie la più celebre è la Virtual Crack Closure Technique, nata per lo studio di materiali che evidenziano frattura fragile per coalescenza di micro-porosità (ceramici e cementi), alcuni codici stanno lavorando in questa direzione



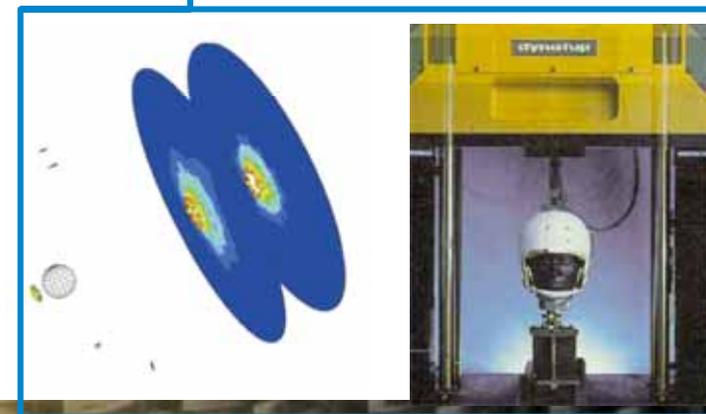
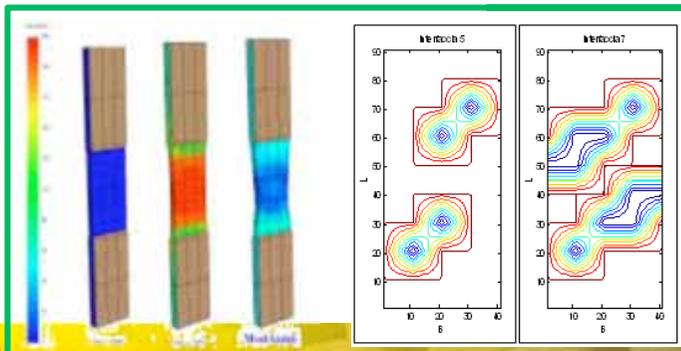
Geometrie

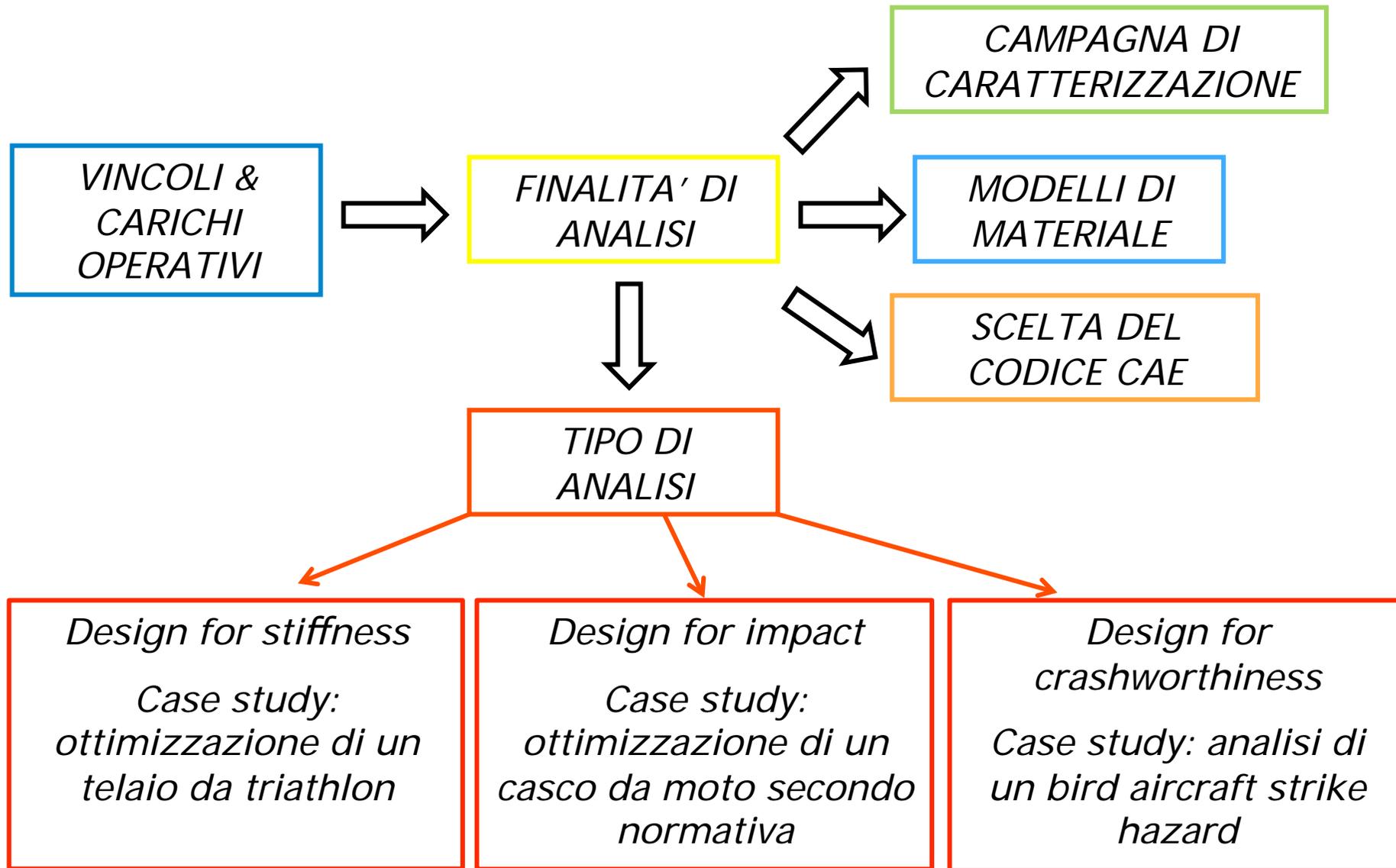
Interfacce

Proprietà materiali

Condizioni al contorno

Formulazione/scelta modelli materiale



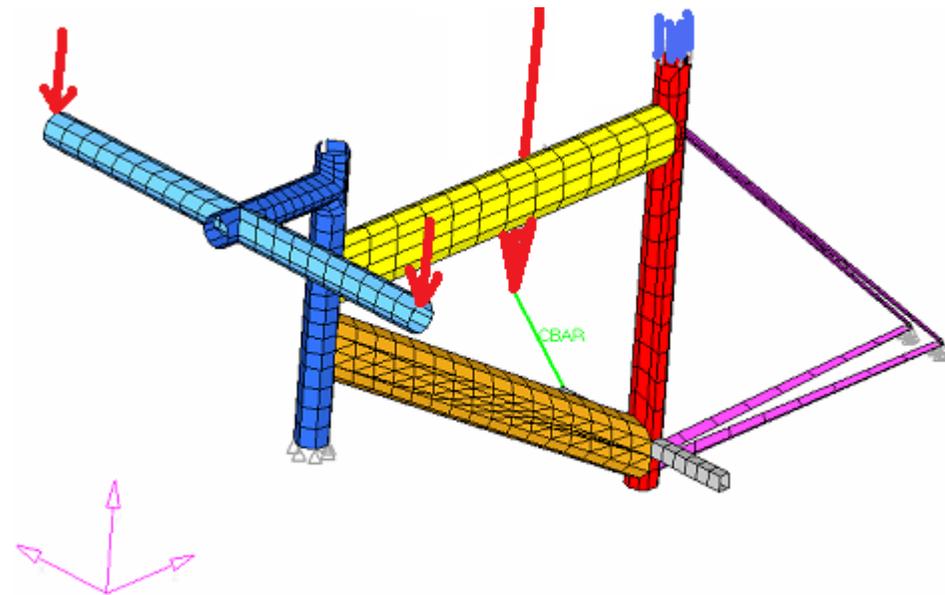


DESIGN FOR STIFFNESS

CASE STUDY: Telaio bici da triathlon

Scarsa rigidezza del telaio trasversalmente rispetto al suo piano principale \square parte dell'energia muscolare del corridore in pedalata (movimento asimmetrico) è impiegata per deformare il telaio più che per generare movimento.

La rigidezza secondo l'asse della sella, invece, non deve essere troppo elevata per non generare fastidiose vibrazioni quando il terreno è accidentato.

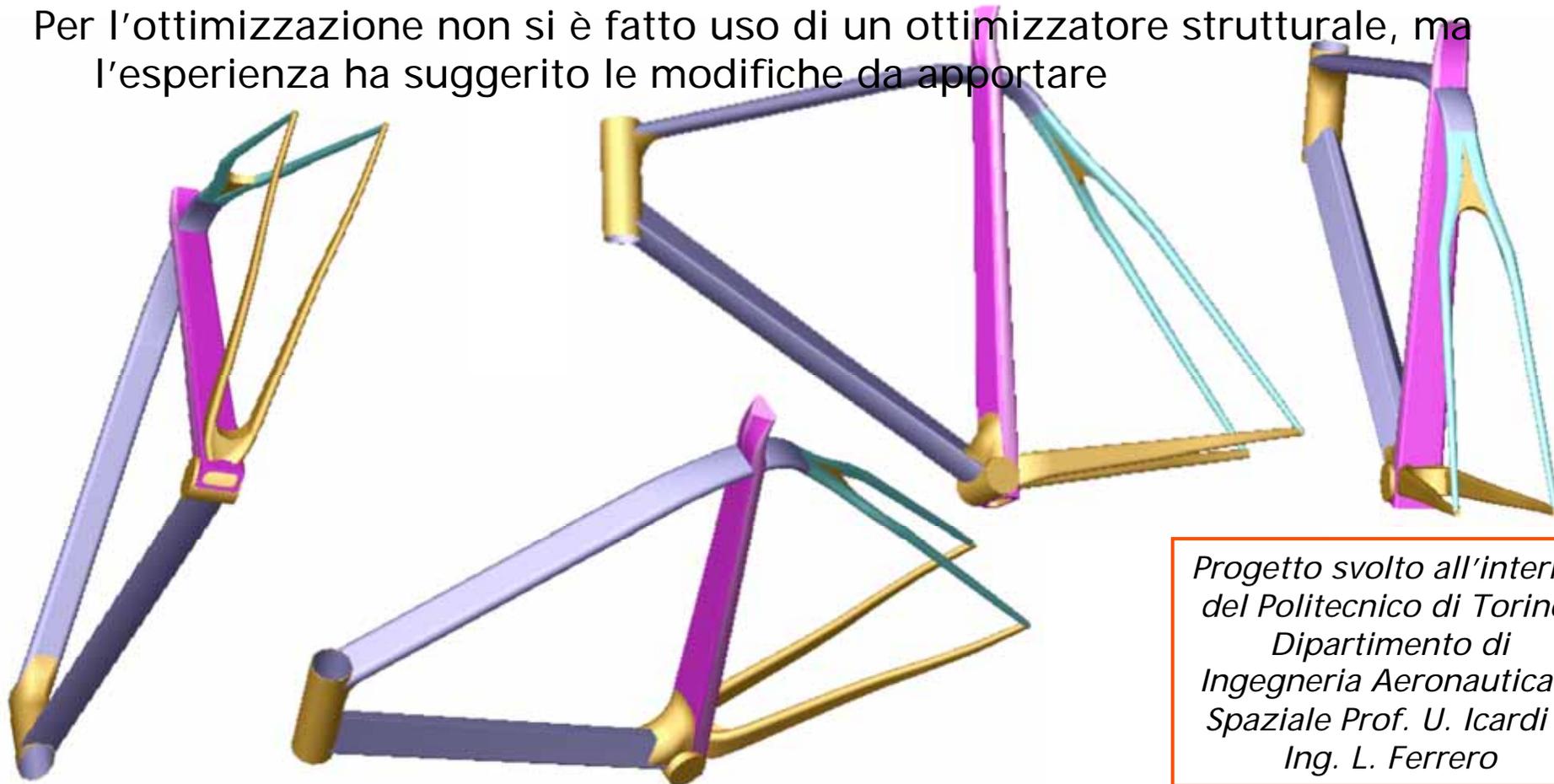


*Progetto svolto all'interno del
Politecnico di Torino,
Dipartimento di Ingegneria
Aeronautica e Spaziale
Prof. U. Icardi e Ing. L. Ferrero*

STRUTTURA OTTIMIZZATA

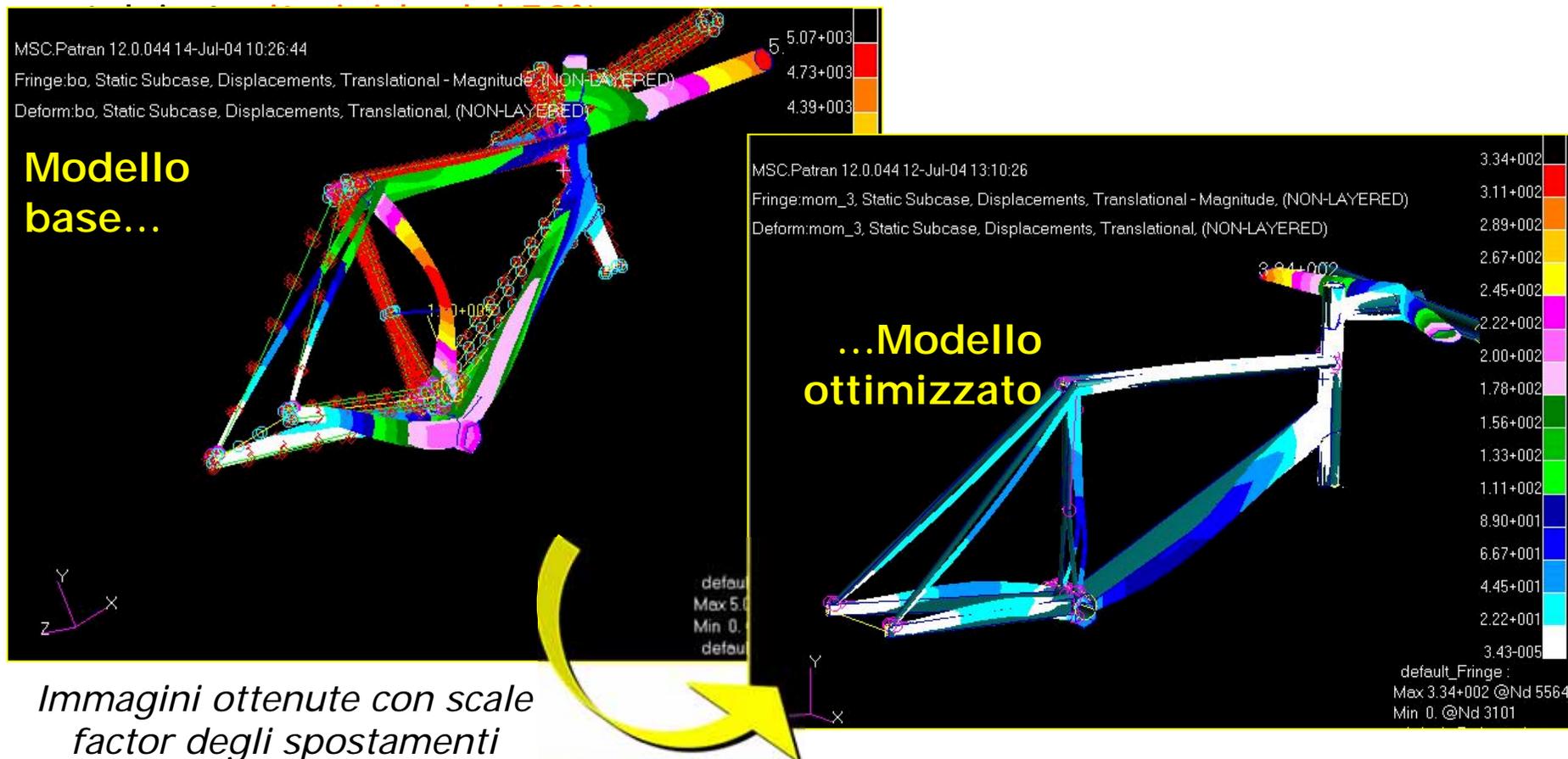
Modifiche apportate nel rispetto del regolamento previsto dalla federazione per i telai.

Per l'ottimizzazione non si è fatto uso di un ottimizzatore strutturale, ma l'esperienza ha suggerito le modifiche da apportare



*Progetto svolto all'interno
del Politecnico di Torino,
Dipartimento di
Ingegneria Aeronautica e
Spaziale Prof. U. Icardi e
Ing. L. Ferrero*

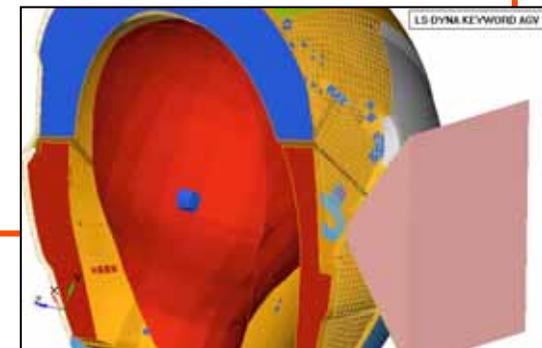
L'analisi degli spostamenti generati dall'applicazione del peso del corridore, l'azione del medesimo su pedali e manubrio hanno dimostrato che la configurazione ottimizzata presenta nel piano una rigidità analoga a quella del modello base, ma trasversalmente il



DESIGN FOR IMPACT

Compositi ☒ + elevata **capacità di assorbimento energetico**
+ failure locali e degrado progressivo delle proprietà
+ **elevate proprietà specifiche**

= Ottimi materiali per strutture sottoposte ad impatto:
§ Assorbitori d'urto per vetture
§ Pannelli di rivestimento di aerei
§ Gusci di protezione da esplosioni
§ Caschi



conoscenza meccanismi failure
impact

stima energia assorbita attraverso failure

comportamento post-failure e proprietà residue

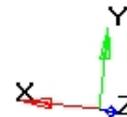
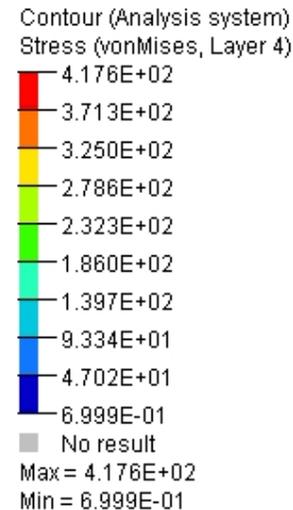
☒ Analisi design for

CASE STUDY: Casco in composito

Ottimizzazione nell'ottica design for impact di un casco in composito
Impatti con impattatore piatto e kerbstone, secondo la norma E 22:05,
nei quattro punti di impatto previsti (B/X/P/R)

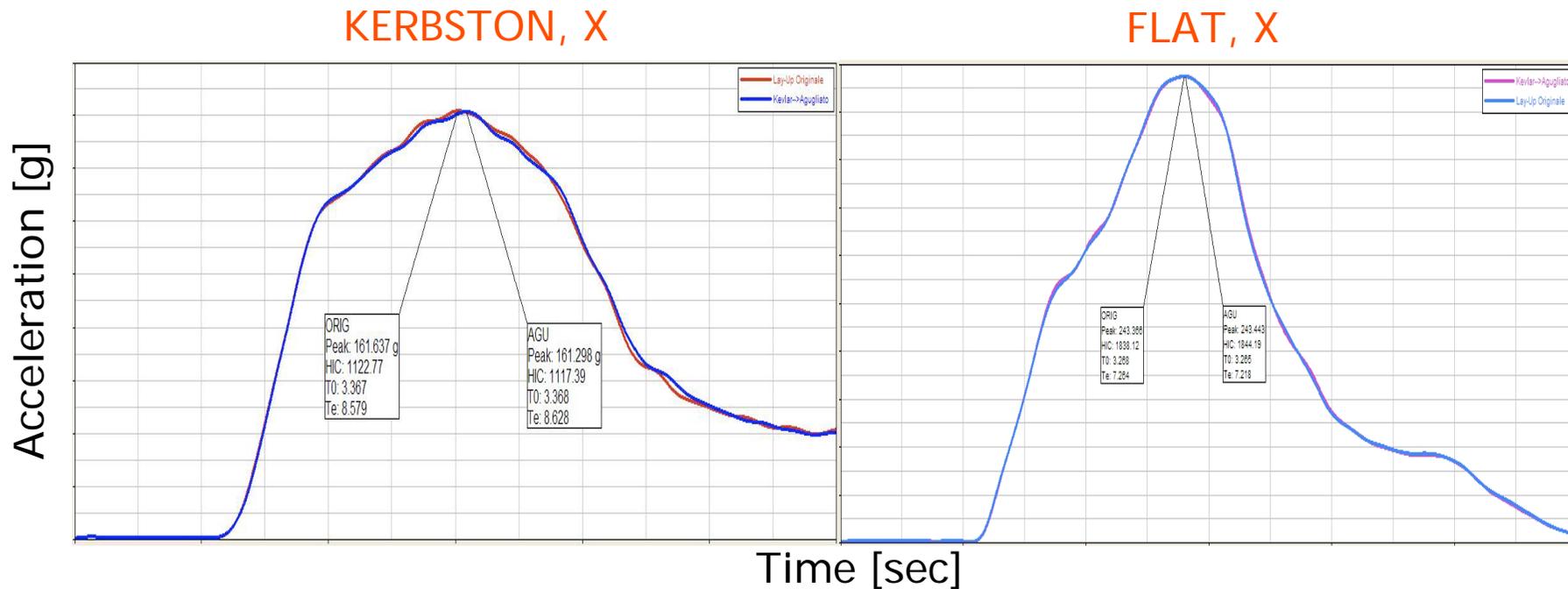
L'analisi dello stato di tensione in ogni ply ha evidenziato l'inefficace utilizzo di alcuni strati in materiale molto costoso, che risultavano poco caricati rispetto alle loro proprietà

*Progetto svolto
in collaborazione
con AGV*



Sostituzione del materiale dello strato poco caricato con un materiale meno pregiato e quindi meno costoso (con una strength più bassa).

Sulla curva delle accelerazioni non si sono osservati peggioramenti di prestazioni con entrambi gli impattatori.



Risultato dell'ottimizzazione = riformulazione stratificazione

 Riduzione dei costi della calotta (-70%)

DESIGN FOR CRASHWORTHINESS

CASE STUDY: Bird-strike su ala in composito

DATI

Segmento: A320

Apertura alare: 30 m

Materiale: T300/T700

Stratificazioni: rivestimento – $[[0/45/-45/90/0]_2]_s$
centine – $[[0/45/-45/90/0]_s/0]_s$
correnti – $[[0/45/-45/0]_2/0/0]_s$

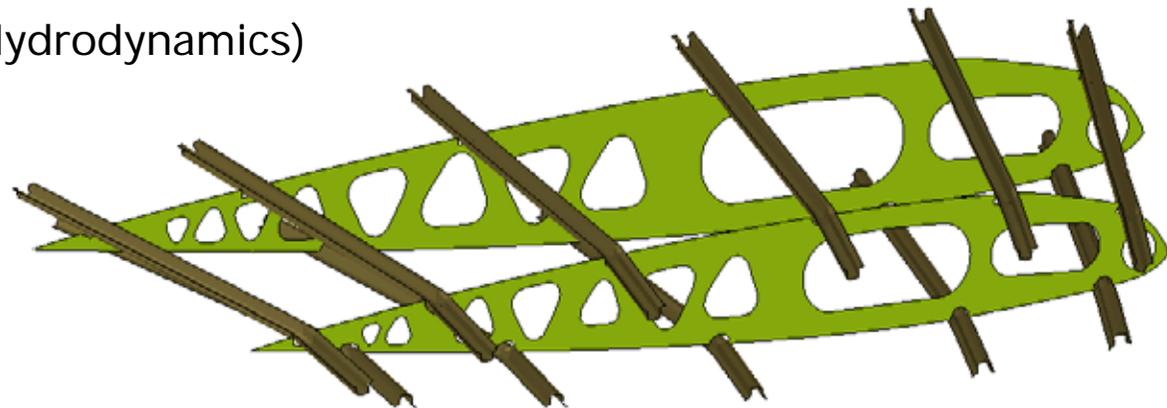
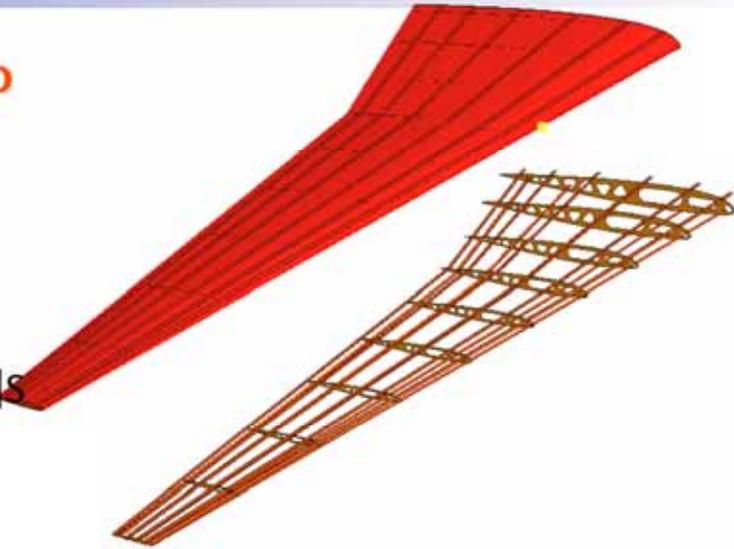
Bird: massa – 5 kg

velocità 80 m/s ☒ horizontal impact on leading edge

20 m/s ☒ vertical impact on panels

diametro max – 12 cm

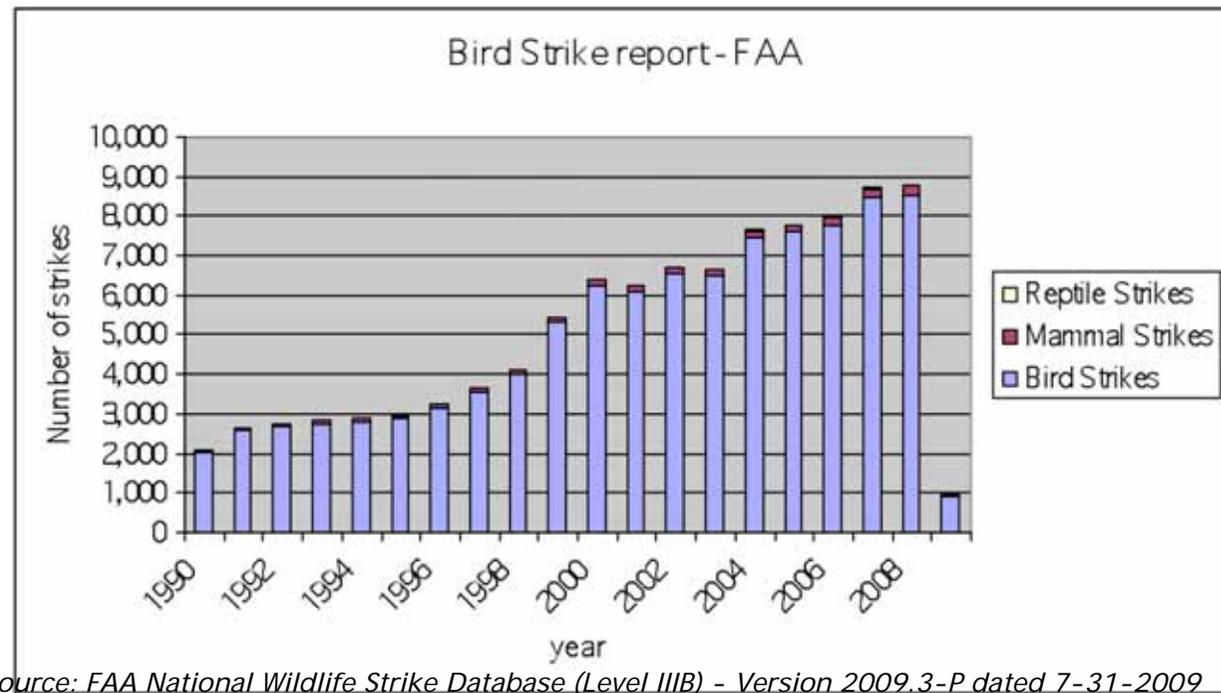
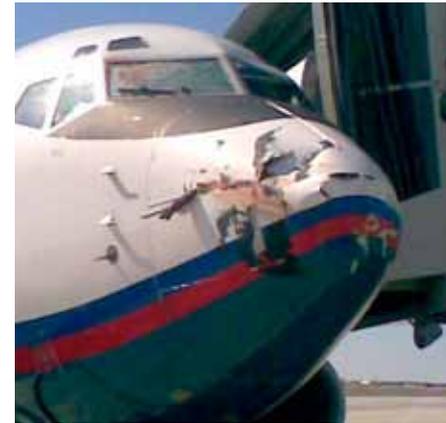
SPH (Smooth Particle Hydrodynamics)



DESIGN FOR CRASHWORTHINESS

Il bird strike è un evento accidentale che:

- Non è raro
- Può arrecare danni molto gravi
- Riscuote crescente interesse nella FAA

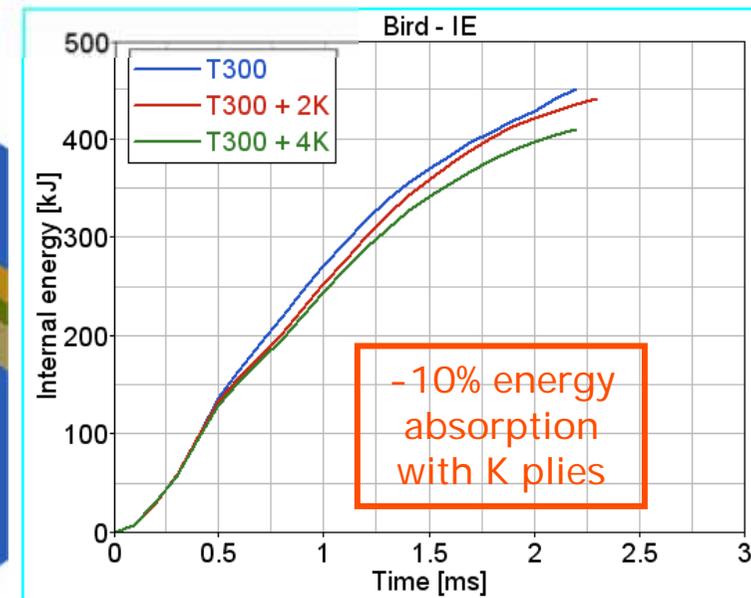
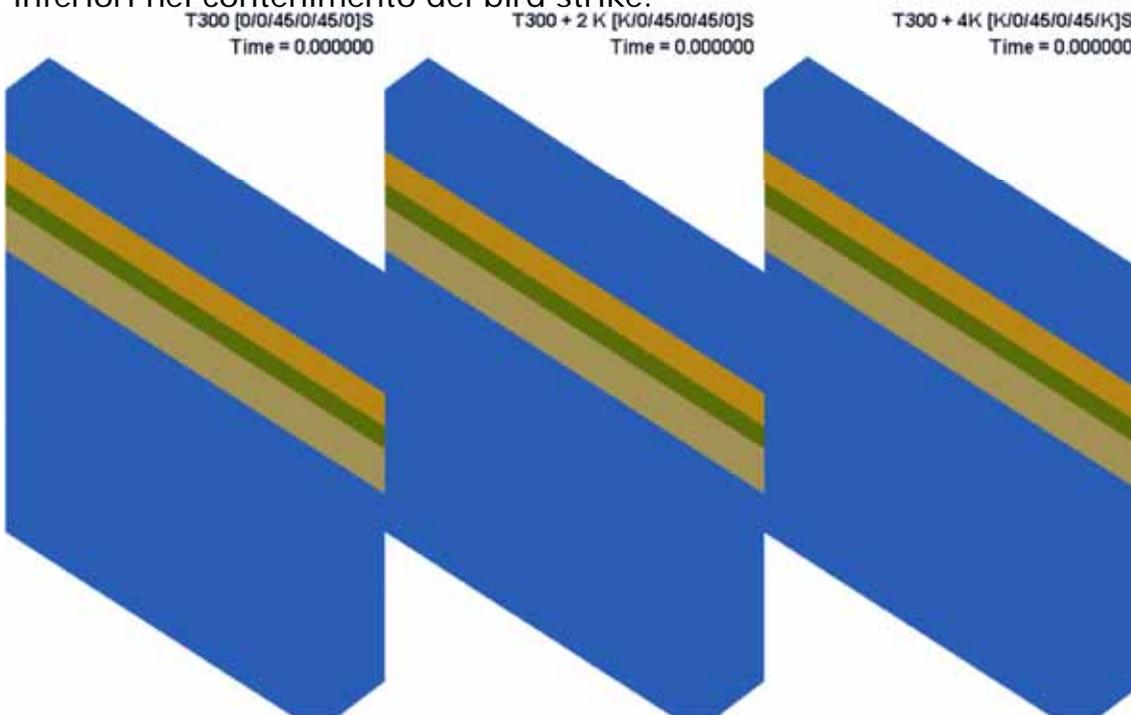
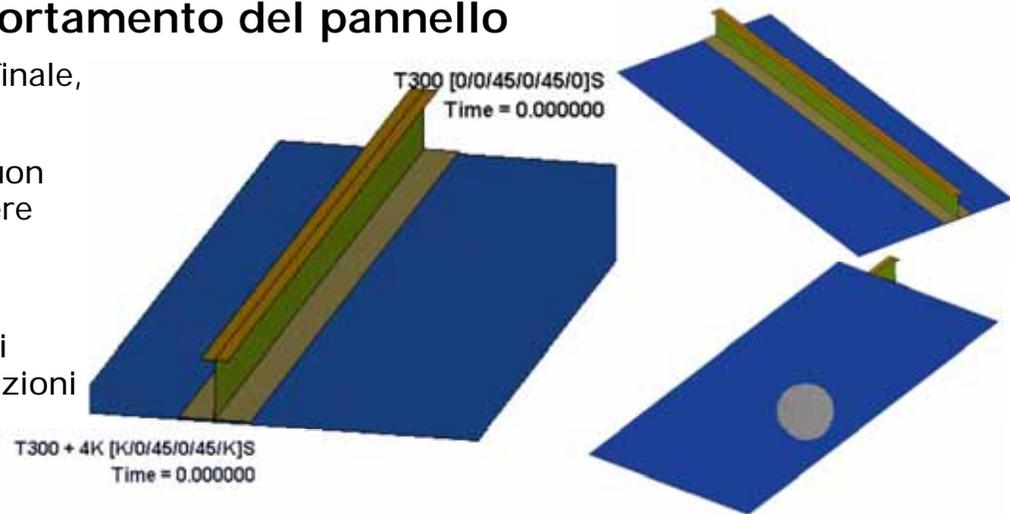


Influenza della stratificazione sul comportamento del pannello

In generale, il bird strike viene simulato sulla struttura finale, presso i grossi produttori attraverso sperimentazione.

Tuttavia quando nella progettazione si dispone di un buon modello per la simulazione virtuale, è possibile conoscere l'effetto delle scelte progettuali sulle prestazioni che la struttura evidenzia nel caso di impatto

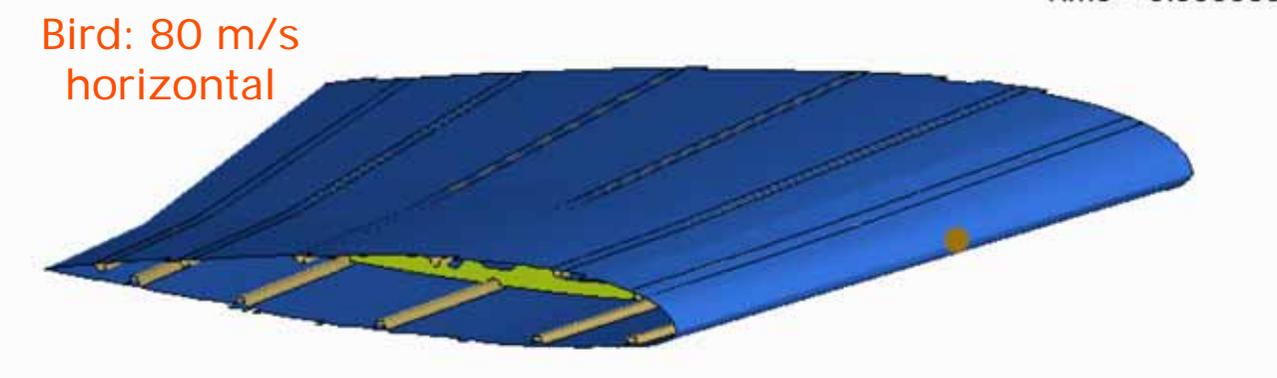
In questo caso il fornitore ha proposto la sostituzione di alcuni strati con un nuovo materiale, che però ha prestazioni inferiori nel contenimento del bird strike.



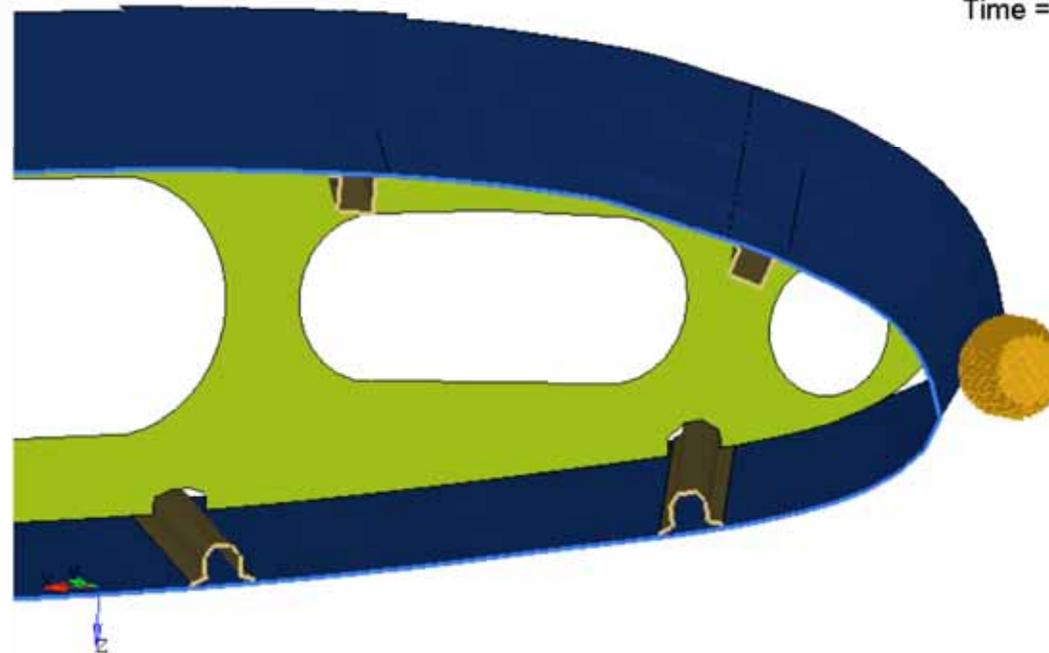
Influenza della velocità e del punto di impatto sull'ala completa

Bird: 80 m/s
horizontal

Time = 0.000000

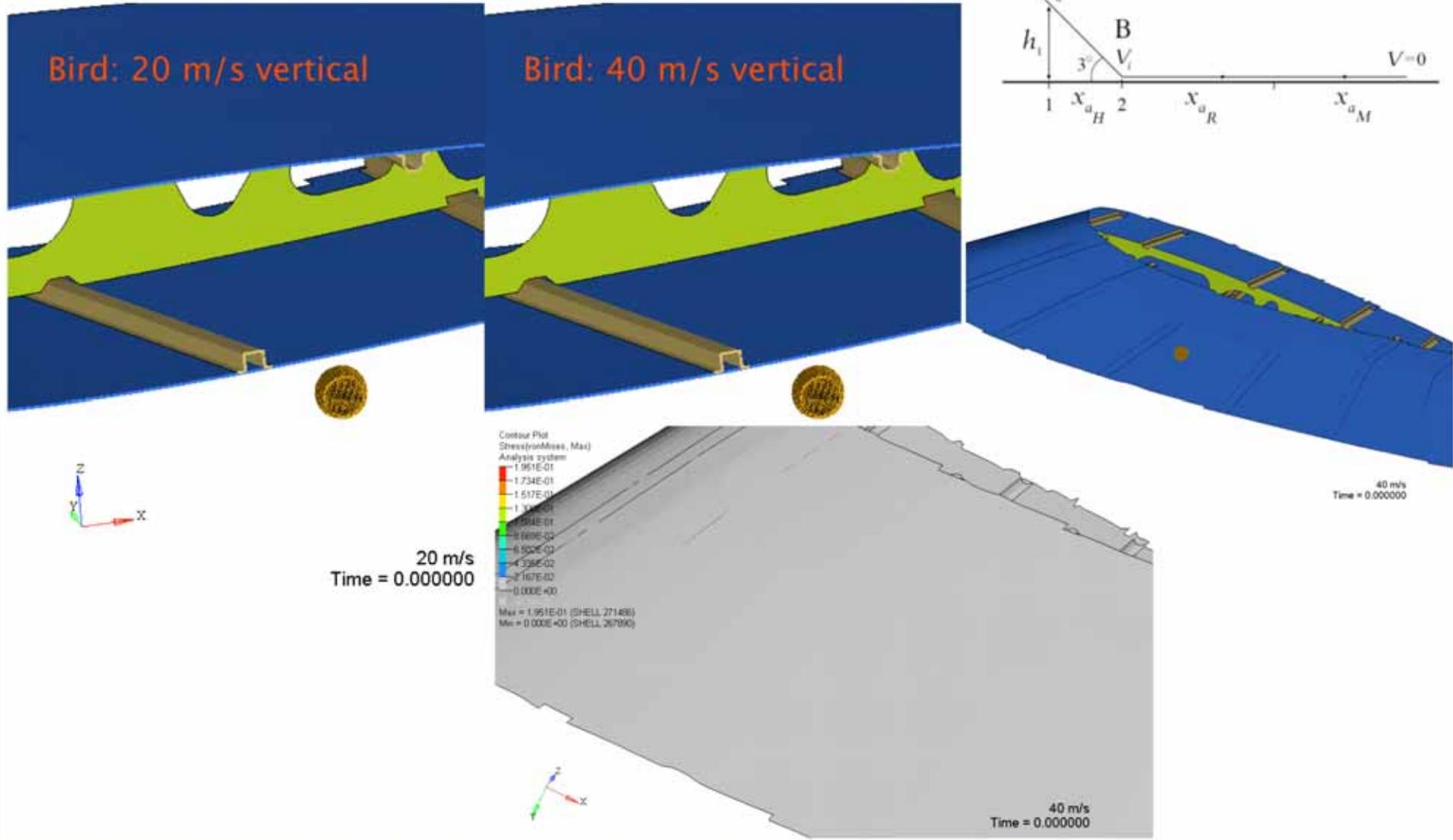


Time = 0.000000



DESIGN FOR CRASHWORTHINESS

Influenza della velocità e del punto di impatto sull'ala com



STATO DELL'ARTE: delaminazione via criteri di danneggiamento di altra natura e/o plasticizzazione

MIGLIORAMENTI:

modello di materiale tenere conto dei failure locali nell' energia globalmente assorbita

campo tensionale elementi mixed o ibridi, capaci di cogliere adeguatamente le

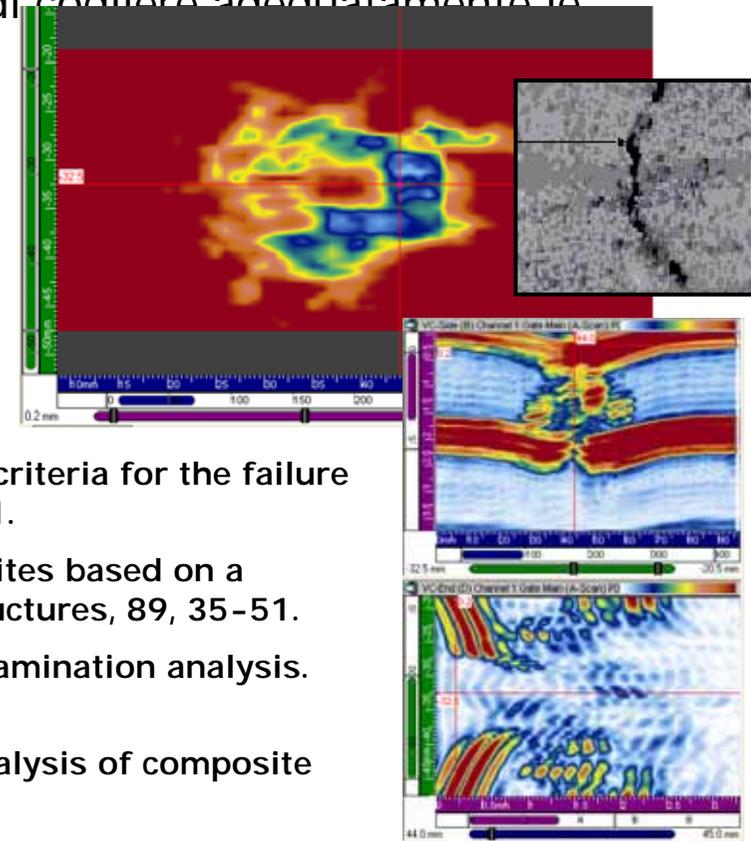
Analisi C-Scan svolta al Politecnico di Torino (Prof. U. Icardi, Ing. L. Ferrero), in collaborazione con l'università di

Cranfield (Dr J. Njuguna)

Per approfondimenti:

Area delaminata a seguito dell'impatto:

1. Perdita continuità tra le lamine
2. Degrado delle proprietà
3. Elevato assorbimento di energia



ICARDI U, FERRERO L. (2008). A comparison among several recent criteria for the failure analysis of composites. *Journal of Advanced Materials*, 40, 73-111.

ICARDI U, FERRERO L. (2009). Impact analysis of sandwich composites based on a refined plate element with strain energy updating. *Compositre Structures*, 89, 35-51.

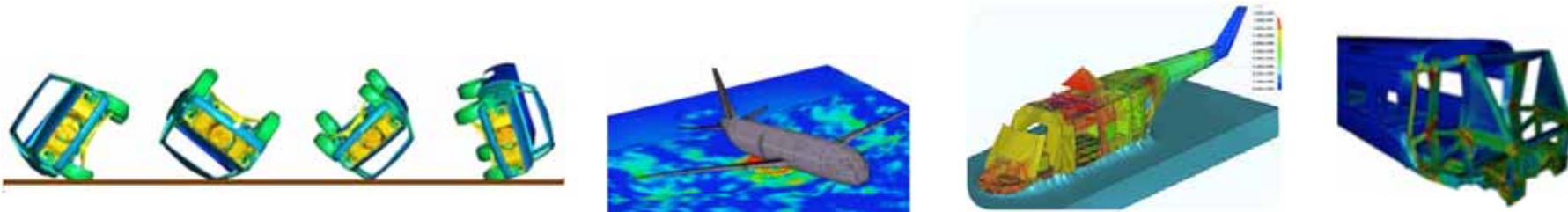
ICARDI U, FERRERO L. A comparison among several models for delamination analysis. *Journal of Aerospace Engineering*. Submitted for publication.

ICARDI U, FERRERO L. Singular wedge element for delamination analysis of composite laminated. *Computers&Structures*. Submitted for publication.

BENEFICI del CAE nella progettazione con materiali

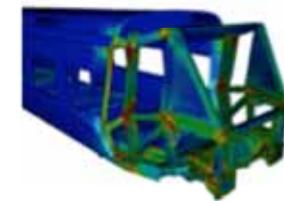
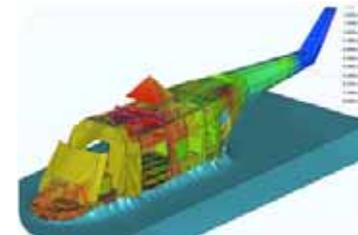
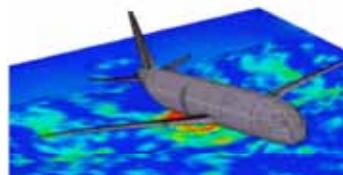
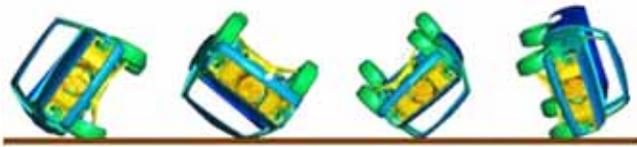
compositi:

- q Conoscenza delle prestazioni “virtuali” del prodotto in qualsiasi fase del progetto
- q Forte riduzione della sperimentazione fisica su prototipi
 - ☒ globale riduzione costi progettazione
- q Ottimizzazione strutturale del prodotto già in fase di design
 - ☒ riduzione pesi prodotto
 - ☒ riduzione costi prodotto
- q Eventuale verifica virtuale in condizione di mis-use
- q Progettazione ad hoc del materiale/struttura (tailoring)
- q Possibilità di applicazione di metodologie D.O.E. vs ROBUST DESIGN



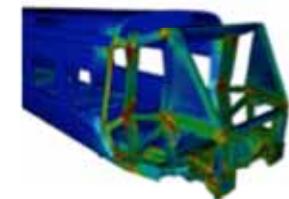
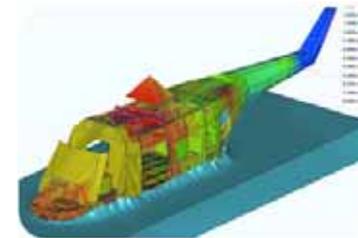
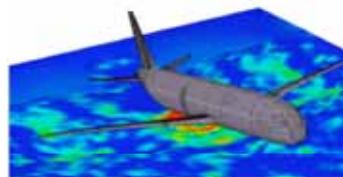
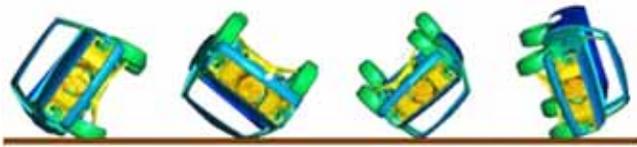
PROBLEMATICHE del CAE nella progettazione con materiali compositi:

- q Assenza di **database** delle proprietà meccaniche
- q Complessità nella **caratterizzazione** dei materiali
- q Ridotta comprensione del loro **comportamento meccanico**
- q Criticità nella **modellazione** del materiale
- q Forte e spesso poco controllata influenza del **processo di produzione**
- q **Efficienza dei codici di calcolo** ancora limitata (elementi poco accurati, incapacità dei codici di calcolo di replicare alcuni fenomeni, i.e. delaminazione)
- q **Competenze** ancora di nicchia
- q Mancata spinta verso un investimento massiccio nei **mercati di larga scala**



POTENZIALITA' del CAE nella progettazione con materiali compositi:

- q Costante e continuo ampliamento dei **database dei materiali**
- q Superamento dei limiti oggi presenti per i **codici di calcolo** grazie a notevoli investimenti/ricerche in corso da parte di software house, università e centri di ricerca
- q Riduzione e superamento del **gap di conoscenze** tra università/centri di ricerca specializzati e applicazioni industriali
- q Continuo miglioramento delle **potenze di calcolo** disponibili maggiore potenza computazionale per modelli full-scale accurati
- q Introduzione dei materiali compositi nei settori in cui performances e peso sono importanti, in **sostituzione/completamento materiali tradizionali**, anche per produzioni di larga scala



Domande & Considerazioni?



AMET Italy
Environment Park
via Livorno,60
10144 Torino - Italy

Grazie dell'attenzione

Ing. Laura Ferrero
laura.ferrero@amet.it
+39-011.9007.754

