

PROPRIETÀ SIGNIFICATIVE DELLE LEGHE LEGGERE D'ALLUMINIO NELLA PROGETTAZIONE AD ASSORBIMENTO DI ENERGIA DELLE STRUTTURE AERONAUTICHE

A. Airoidi

L'articolo riassume gli aspetti fondamentali della progettazione di strutture e di elementi strutturali in lega d'alluminio per il campo aeronautico nei casi in cui si richiedano particolari prestazioni di assorbimento di energia, focalizzandosi sulla realizzazione di strutture elicoteristiche con caratteristiche di sicurezza passiva e sul dimensionamento delle parti dei velivoli, ad ala fissa e rotante, soggette ad impatto da volatile. Le linee guida di progetto, gli approcci numerici ed i casi sperimentali presentati vengono discussi sottolineando il ruolo delle proprietà delle leghe impiegate, quali i livelli di resistenza, di tenacità e la sensibilità alla velocità di deformazione. Per un elicottero si evidenzia come l'ottimizzazione della risposta all'impatto in caso di incidente abbia una potenziale e significativa influenza su un grande numero di parti strutturali cui sono richieste prestazioni, sia in termini di assorbimento di energia che di resistenza strutturale, in condizioni di carico estremamente gravose. La selezione del materiale dovrà privilegiare diverse caratteristiche a seconda del ruolo svolto dalla parte strutturale presa in considerazione. Formulazioni analitiche ed esempi sperimentali vengono quindi presentati per discutere i diversi ruoli delle proprietà di resistenza, allungamento a rottura e sensibilità alla velocità di deformazione nella progettazione degli elementi ai quali è direttamente demandato l'assorbimento di energia e l'attenuazione delle forze di impatto. Si presentano successivamente le problematiche connesse alla progettazione di strutture in condizioni di impatto da volatile, che risulta, in base alle normative correnti, la condizione dimensionante per bordi di attacco di ali ed impennaggi, carenature di gondole motrici, strutture di vincolo dei trasparenti. In particolare, si presentano le diverse filosofie progettuali che possono essere adottate in questo ambito, con differenti implicazioni sui requisiti richiesti al materiale impiegato. In tutti gli esempi presentati nell'articolo si sottolinea, inoltre, il ruolo fondamentale che possono avere le analisi numeriche per la corretta identificazione dei ruoli e dei requisiti strutturali nella progettazione ad assorbimento di energia e per ottimizzare la selezione dei materiali impiegati.

PAROLE CHIAVE: alluminio e leghe, deformazioni plastiche, simulazione numerica, rassegna, selezione materiali

INTRODUZIONE

Storicamente, le strutture aeronautiche si sono sviluppate per rispondere a severi requisiti conseguenti all'incremento delle prestazioni, delle dimensioni e dei carichi di volo degli aeromobili.

Alessandro Airoidi

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano, Via La Masa, 34 - 20156, MILANO - e-mail airoidi@aero.polimi.it

Le tipologie costruttive ed i materiali impiegati si sono evoluti in modo da garantire la rigidità e la resistenza richieste minimizzando il peso strutturale e rispettando i vincoli di forma imposti da sempre più raffinate esigenze aerodinamiche. Rigidità e resistenza sono rimaste le proprietà più significative per i materiali da utilizzarsi in campo aeronautico sebbene, dagli anni '50 in avanti, la risposta a fatica e la tolleranza al danno di strutture e materiali abbiano acquisito grande importanza nella selezione dei materiali e nell'affinamento delle filosofie di progetto.

Più recentemente, a partire dagli anni '70, nuovi requisiti sono emersi a seguito della nascita e dell'evoluzione dei concetti di sicurezza passiva delle strutture e di tolleranza agli impatti di diversa

natura cui può essere soggetto il velivolo nella sua vita operativa. La sicurezza passiva comporta, fra gli altri, il soddisfacimento di due fondamentali requisiti strutturali: la limitazione delle sollecitazioni trasmesse agli occupanti in caso di incidente, attraverso il controllo delle modalità di cedimento della struttura, e l'integrità strutturale di una cella di sopravvivenza attorno agli occupanti stessi [1,2,3]. Per quanto riguarda la resistenza all'impatto, essa rappresenta, in effetti, un ambito diverso ma in vario modo collegato alla sicurezza passiva, sebbene occorra distinguere fra impatti a bassa energia, quali quelli dovuti a detriti, ghiaia, grandine che sono tipicamente considerati nell'ambito della tolleranza al danno dei componenti strutturali, e impatti a più alta energia in grado di produrre danni considerevoli nell'intera struttura. A quest'ultima categoria di impatti appartiene senz'altro l'impatto da volatile, responsabile di un numero molto elevato di incidenti con conseguenze anche mortali per gli occupanti [4].

Sicurezza passiva e resistenza all'impatto da volatile sono assimilabili per il ruolo fondamentale che, nelle filosofie e nei criteri di progetto sviluppati nel corso degli ultimi trenta anni, assumono le proprietà di assorbimento di energia di strutture e materiali. Nelle strutture metalliche, in particolare, il controllo di tali proprietà si riflette direttamente su caratteristiche dei materiali che sono tradizionalmente prese in considerazione soprattutto in ambito tecnologico, quali il comportamento durante l'incrudimento, la riserva plastica del materiale e la sua sensibilità alla velocità di deformazione.

L'influenza di tali problematiche è ancora relativamente limitata in ambito aeronautico, al contrario di quanto accade in ambito automobilistico. Tuttavia, nell'ambito delle strutture di elicotteri, tipicamente soggetti ad un numero di incidenti significativamente superiore rispetto a quello dei velivoli ad ala fissa [5], la letteratura scientifica e tecnica è ricca di esempi relativi allo sviluppo di sedili, carrelli e sottopavimenti dotati di caratteristiche di sicurezza passiva [6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17]. Per quanto riguarda l'impatto da volatile, esso ha assunto una rilevanza notevole in campo aeronautico, dopo i primi studi sperimentali e numerici effettuati a partire dalla fine degli anni '70 [18,19,20]. È infatti soggetto a normativa per velivoli ad ala fissa ed ad ala rotante [21,22] e risulta, in effetti, la condizione dimensionante per numerosi parti strutturali quali i bordi di attacco di ali e di impennaggi, le carenature delle gondole motrici, i radome, i trasparenti delle cabine e le loro strutture di vincolo, come si può evincere da numerosi lavori in letteratura [23,24,25,26,27]. A medio e a lungo termine, in generale, è possibile che i requisiti di assorbimento di energia e di resistenza all'impatto nelle costruzioni aeronautiche possano acquistare ancora maggiore influenza, a causa dell'incremento di prestazioni degli aeromobili, della comparsa di nuove tipologie di velivoli, quali i convertiplani, dell'incremento previsto del traffico elicotteristico e, non ultimo, dell'affinamento delle metodologie di progetto e della diffusione di strumenti numerici per l'analisi delle risposte strutturali [28]. Per soddisfare tali requisiti, che possono presentare aspetti contrastanti, le leghe di alluminio possiedono proprietà più che adeguate. La selezione del materiale non può però prescindere da una accurata individuazione della funzione che la parte strutturale deve assolvere in condizioni di impatto al suolo, nel caso della sicurezza passiva, o con oggetti di massa non trascurabile come i volatili.

Questo articolo intende presentare alcuni aspetti della progettazione di strutture con caratteristiche di sicurezza passiva e tolleranza all'impatto mettendo in evidenza il ruolo delle proprietà di tenacità e resistenza delle leghe di alluminio nella progettazione di parti con differenti ruoli strutturali. La presentazione delle linee guida di progetto e di alcuni approcci numerici per la progettazione di strutture elicotteristiche con caratteristiche di sicurezza

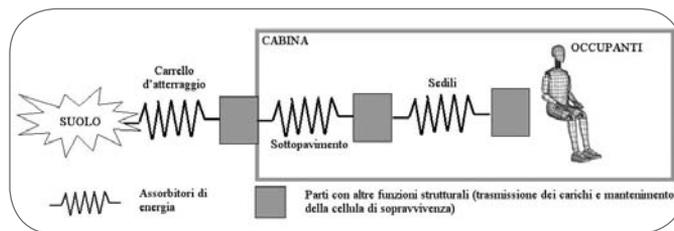


Fig. 1

Schema funzionale di una struttura d'elicottero con caratteristiche di sicurezza passiva.

Structural roles in a crashworthy helicopter structure.

passiva permetterà di mettere in evidenza come parti con caratteristiche di assorbimento di energia e parti ad elevata resistenza debbano interagire per garantire una risposta strutturale adeguata. Verranno quindi discussi gli aspetti teorici ed alcuni risultati sperimentali relativi alla realizzazione di assorbitori cilindrici in lega di alluminio, per evidenziare i requisiti spesso contrastanti per la progettazione di dispositivi d'assorbimento basati sul collasso plastico di strutture metalliche. L'influenza delle proprietà di tenacità e resistenza delle leghe di alluminio sull'efficacia di diverse soluzioni progettuali nella protezione contro gli impatti da volatile verrà infine discussa, presentando le principali filosofie progettuali e discutendo un esempio di impatto su una struttura ibrida in lega di alluminio e composito, studiata sperimentalmente e numericamente.

PROGETTAZIONE DI STRUTTURE ELICOTTERISTE CHE CON CARATTERISTICHE DI SICUREZZA PASSIVA

Criteri di progetto per strutture d'elicottero con caratteristiche di sicurezza passiva

La definizione delle condizioni di progetto per realizzare una struttura con caratteristiche di sicurezza passiva si basa sull'individuazione di scenari di impatto nei quali è potenzialmente possibile, mediante il controllo della risposta strutturale, proteggere gli occupanti da lesioni gravi o mortali (potenzialmente survivable crash scenario). La definizione di questi scenari è frutto dunque di un compromesso fra quanto si ritiene possibile realizzare in termini di miglioramento della risposta strutturale, anche considerando le conseguenti penalizzazioni in termini di peso e di costi, e l'individuazione di un involucro di condizioni che comprenda una porzione statisticamente significativa degli incidenti con esiti gravi o mortali per gli occupanti. In ambito elicotteristico si considerano impatti in diverse condizioni caratterizzati da componenti verticali ed orizzontali di velocità che possono raggiungere i 12 ms^{-1} ed 30 ms^{-1} , rispettivamente, e da diversi angoli di assetto rispetto al suolo compresi entro determinati intervalli [1,2,3]. Per garantire la sopravvivenza degli occupanti in tali condizioni di impatto, è fondamentale attenuare le sollecitazioni trasmesse agli occupanti e questo può essere ottenuto, secondo le linee guida di progetto sviluppate nella letteratura tecnica e scientifica, installando elementi di assorbimento dell'energia di impatto in tre punti caratteristici della struttura: il carrello di atterraggio, il sottopavimento ed i sedili.

Gli assorbitori di energia possono essere realizzati sfruttando la deformazione plastica di elementi metallici che possiedano adeguata duttilità. La Fig. 1 riporta lo schema funzionale di una struttura sviluppata secondo gli attuali concetti di resistenza passiva. Sebbene le normative civili si limitino a regolamentare i soli sedili [21], che devono superare prove particolarmente severe per la cer-

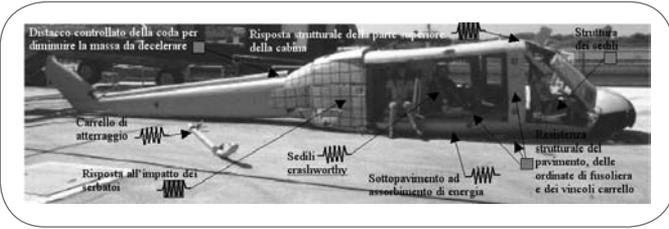


Fig. 2
Impatto in condizioni di crash di una struttura d'elicottero.
Crash test on a helicopter structure.

tificazione, si può osservare come l'introduzione delle caratteristiche di sicurezza passiva abbia potenziale influenza su numerose parti strutturali. Il corretto funzionamento dei sottosistemi di assorbimento di energia, infatti, prevede che la struttura nella quale essi sono installati sia in grado di trasmettere i carichi di impatto con sollecitazioni che possono risultare molte volte superiori rispetto ai carichi di progetto in normali condizioni operative. La trasmissione dei carichi ed il mantenimento della cellula di sopravvivenza comportano quindi la realizzazione di parti strutturali con grande resistenza a rottura e tenacità a frattura.

Le precedenti osservazioni possono essere esemplificate dall'esame della risposta strutturale di un elicottero completo in condizioni di crash, che, pur non essendo prescritta da alcuna normativa, è stata indagata in alcuni programmi di ricerca. La Fig. 2 riporta l'esito di una prova su un Bell UH-1D, elicottero di vecchia concezione progettato precedentemente allo sviluppo dei criteri e delle filosofie di progetto per la realizzazione di strutture con caratteristiche di sicurezza passiva. La prova, eseguita presso il Centro Italiana Ricerche Aerospaziali di Capua nell'ambito del progetto Europeo Helisafe TA, è stata effettuata installando sull'elicottero sedili progettati secondo la normativa corrente. Il risultato mette in evidenza come l'intera struttura dell'elicottero contribuisca a determinare la risposta in condizioni di impatto. La sollecitazione trasmessa ai sedili è stata certamente influenzata dal comportamento del carrello, del pavimento, ma è intuibile come altri fenomeni, quali il distacco della coda e il cedimento della parte superiore della cabina abbiano significativamente contribuito a determinare i livelli di sollecitazione trasmessi ai sedili e quindi agli occupanti. Le annotazioni riportate in Fig. 2 si riferiscono ai punti dove è possibile intervenire, migliorando le caratteristiche di assorbimento di energia o la resistenza all'impatto, per incrementare le caratteristiche di sicurezza passiva. A tale scopo un ruolo fondamentale va comunque svolto dai sistemi di assorbimento di energia da installarsi nei carrelli e, soprattutto, nei sottopavimenti, che possono essere realizzati mediante elementi in lega leggera d'alluminio.

Sistemi di assorbimento di energia installati in carrelli e sottopavimento e loro progettazione

Gli elementi di assorbimento di energia da installarsi nei sottopavimenti possono essere realizzati sfruttando il collasso plastico controllato di elementi in lega d'alluminio caricati assialmente [7,8,9,10,11]. Questi elementi possono essere realizzati da lamiera rivettate ed installati negli incroci strutturali del sottopavimento come indicato in Fig. 3. Per quanto riguarda i carrelli di atterraggio, stadi aggiuntivi di assorbimento di energia possono essere realizzati con tubi in lega leggera di alluminio e installati negli ammortizzatori oleopneumatici per permettere al carrello di fornire un adeguato contributo in condizioni di crash [12,13,14,15,16]. La Fig. 4-A mostra i possibili schemi strutturali per l'introduzione

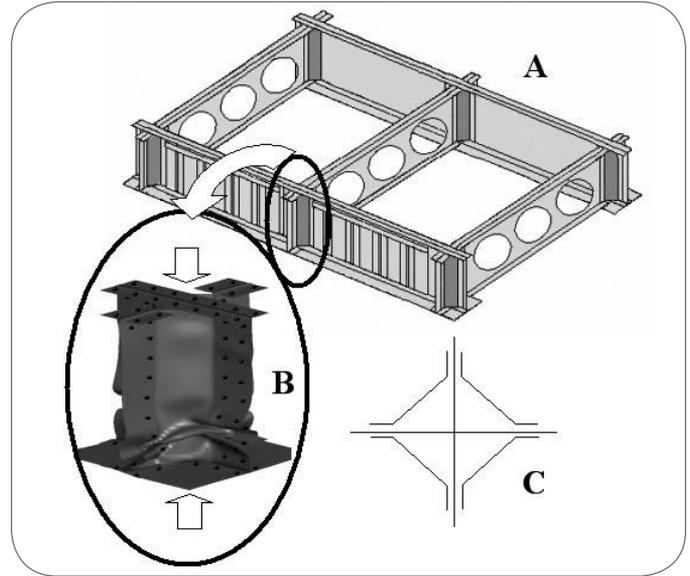


Fig. 3
Struttura di un sottopavimento (A), esempio di assorbitore in lega d'alluminio installato in un incrocio strutturale (B) e sua sezione (C).
Sketch of a subfloor structure (A), example of a light alloy absorber located at a structural intersection (B) and absorber section (C).

dello stadio aggiuntivo di energia in un carrello la cui struttura comprende elementi a rottura programmata (punti a,b e c in Figura 4-A). La rottura di tali vincoli permette lo scorrimento relativo fra le parti del carrello e l'ingaggio dell'elemento sacrificale che si deforma assorbendo energia (Figura 4-B).

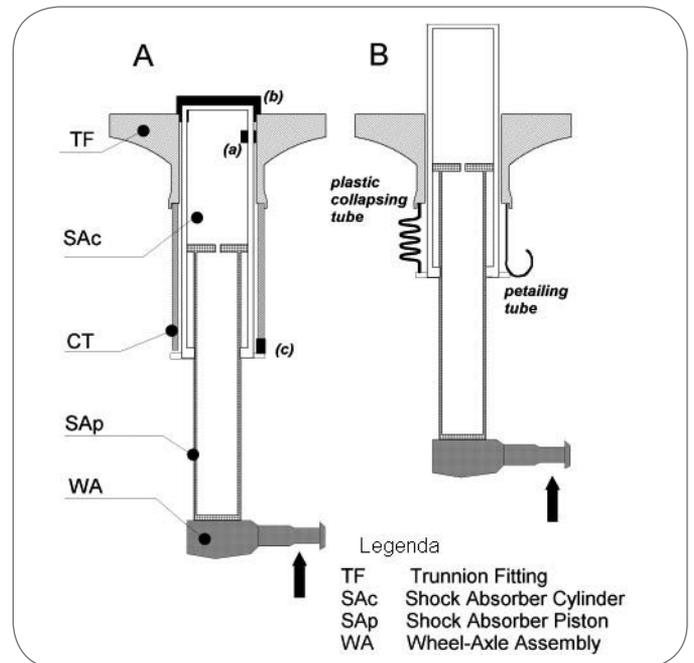


Fig. 4
Schema per l'introduzione di stadi aggiuntivi di assorbimento di energia nei carrelli di atterraggio.
Layout for the introduction of additional energy absorbing stage in landing gears.

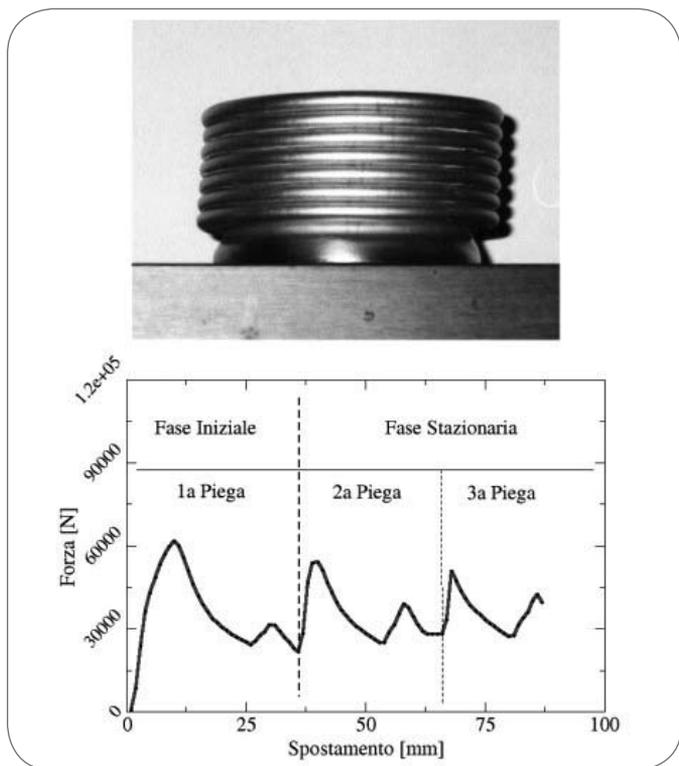


Fig. 5 Esempi di modalità di collasso e curva di forza-schiacciamento di assorbitori cilindrici in lega di alluminio.
Collapse mode and force vs. shortening curve of light alloy absorber.

Il funzionamento di questi sistemi può essere analizzato, nei suoi aspetti generali, indagando il collasso plastico di cilindri in lega d'alluminio che avviene tipicamente con la formazione di pieghe successive, come evidenziato nell'esempio in Fig. 5. La risposta dell'elemento soggetto ad uno schiacciamento in direzione assiale è caratterizzata da una serie di oscillazioni, che corrispondono alla formazione delle pieghe, attorno ad un livello costante di forza. La curva in Fig. 5 è caratteristica di questo tipo di assorbitori. La progettazione dei sistemi d'assorbimento di energia deve tenere conto dei vincoli di progetto rappresentati dalla corsa disponibile, s_{max} , che è sempre comunque limitata dagli ingombri del veicolo, e dalla massima forza ammissibile, F_{max} , determinata dalle massime sollecitazioni che possono essere trasmesse alla struttura o agli occupanti. Tali vincoli comportano che la massima efficienza dell'assorbitore si ottiene massimizzando il fattore di ricoprimento del rettangolo $F_{max} \cdot s_{max}$ da parte della curva forza-schiacciamento. Si massimizza in questo modo l'energia assorbita per un dato schiacciamento, s . In ambito aeronautico, dove le considerazioni ponderali rivestono sempre grandissima importanza, un fondamentale indice di prestazione dell'assorbitore è dato dall'energia specifica assorbita, SE , espressa dal rapporto fra l'energia assorbita e la massa schiacciata, come indicato in Eq. 1, dove A è l'area della sezione trasversale dell'assorbitore.

$$Eq. 1 \quad SE = \frac{F_{media} s}{As \rho} = \frac{F_{media}}{A \rho}$$

Moderni codici di calcolo ad elementi finiti possono essere utilizzati per l'analisi delle prestazioni degli elementi di assorbimento

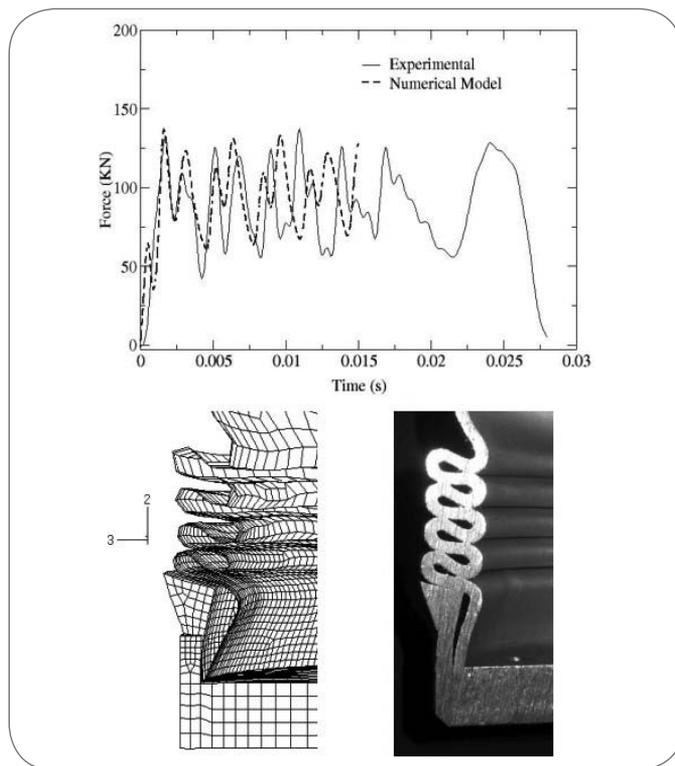


Fig. 6 Correlazione fra di una prova di schiacciamento di un assorbitore in Al 6060 T5 ed i risultati numerici.
Correlation between the crushing test of an Al 6060 T5 absorber and the numerical results.

di energia. Tali codici, ampiamente utilizzati per l'analisi di impatti, si basano su schemi di integrazione esplicita nel tempo e sono particolarmente adatti per modellare transitori dinamici ad alta velocità, con comportamento non-lineare dei materiali ed a gestire complesse interazioni di contatto [28]. La Fig. 6 si riferisce all'analisi numerica di un assorbitore da installarsi in un carrello di atterraggio, eseguita con HKS/Abaqus Explicit [15,16]. L'introduzione della curva sforzi veri - deformazione vera del materiale, della sua sensibilità alla velocità di deformazione e la modellazione di tutte le interazioni di contatto presenti nel fenomeno rappresentano gli ingredienti fondamentali per una accurata rappresentazione della prestazione dell'elemento strutturale. Analisi di dettaglio di questo tipo sono state utilizzate per ottimizzare la risposta di elementi di assorbimento di energia da installarsi in sedili, sottopavimenti e carrelli [7,8,9,15,17]. Tuttavia, con riferimento allo schema mostrato in Figura 1, l'identificazione delle prestazioni ottimali richieste agli elementi di assorbimento di energia e dei livelli di resistenza delle altre parti strutturali deve necessariamente considerare la risposta complessiva della struttura. Sfruttando le potenzialità dei moderni codici di calcolo è stato possibile realizzare modelli ibridi con parti modellate seguendo approcci multi-corpo a parametri concentrati e parti discretizzate in dettaglio con schemi ad elementi finiti [10, 11]. La Fig. 7 mostra tale tecnica applicata ad una porzione di sottopavimento di elicottero modellata con il codice HKS/Abaqus Explicit. Il vantaggio di questa tecnica ibrida è la realizzazione di modelli relativamente piccoli, parametrizzabili e dettagliati solo ove necessario. Il risultato fornisce indicazioni sulle prestazioni degli assorbitori integrati nella struttura (in questo caso: nei sedi-

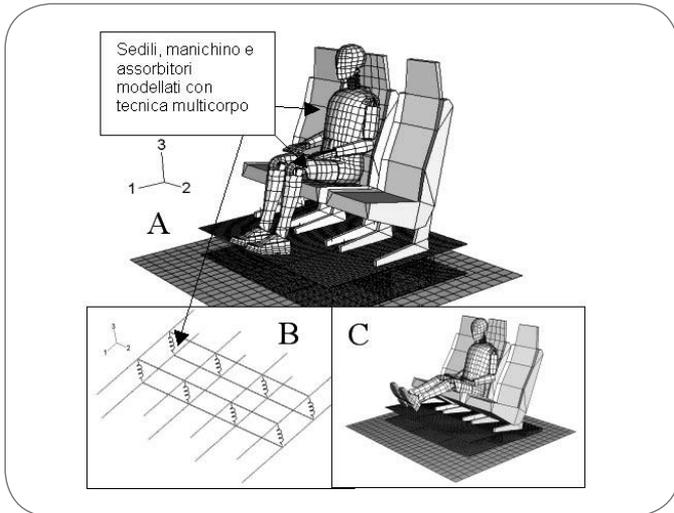


Fig. 7
Modellazione ibrida multi-corpo/EF di una porzione di sottopavimento.
 Hybrid multi-body/FE modelling technique applied to a part of a helicopter subfloor.

li e nel sottopavimento) ed evidenzia il ruolo strutturale di altre parti, non direttamente coinvolte nel processo di assorbimento di energia, per le quali la selezione del materiale può tuttavia costituire un aspetto particolarmente critico. Affinché gli assorbitori, schematizzati con le molle visibili in Fig. 7-B, possano funzionare nel modo previsto è necessario che la struttura primaria del sottopavimento rimanga integra e svolga la funzione di trasferimento di carico fra le masse da decelerare e gli assorbitori. Il dimensionamento e la selezione del materiale per questa struttura dovranno quindi evitare la formazione di fratture in condizioni di sollecitazione molto più gravose che le normali condizioni operative, come può intuirsi dalla condizione deformata in Figura 7-C, riferita ad un impatto con velocità verticale di 10 ms⁻¹.

Ruolo delle proprietà del materiale nella progettazione di sistemi di assorbimento in lega di alluminio

Numerosi lavori in letteratura scientifica sono stati dedicati alla descrizione ed alla previsione delle modalità di cedimento e dei livelli di forza media di collasso in base alle caratteristiche geometriche ed alle caratteristiche del materiale, in particolari per assorbitori a sezione circolare [29,30,31,32,33,34,35,36,37]. La maggior parte degli autori fornisce espressioni analitiche per il calcolo della forza media in cui sono riconoscibili due fattori: il primo rappresenta il momento flettente di collasso plastico della sezione sottile, mentre l'altro è un fattore dipendente dalla geometria. Ad esempio, l'Eq. 2 si riferisce alla formulazione semi-empirica riportata in [30], dove σ_0 è un valore rappresentativo del livello di sforzi in campo plastico del materiale, t è lo spessore della parete e D è il diametro medio della sezione dell'assorbitore.

$$\text{Eq. 2 } P_m = \left[\frac{1}{4} \sigma_0 t^2 \right] \left[72.3 \left(\frac{D}{t} \right)^{0.32} \right]$$

Lo sforzo σ_0 da alcuni autori considerato come lo sforzo di snervamento del materiale, è in effetti utilizzato per valutare il momento flettente di collasso plastico della sezione per unità di lunghezza ed è quindi più opportunamente determinato calcolando il valor medio dello sforzo nella curva σ - ϵ fra lo snervamento, σ_y e la rottura, σ_U , in particolare per leghe che presentano un incru-

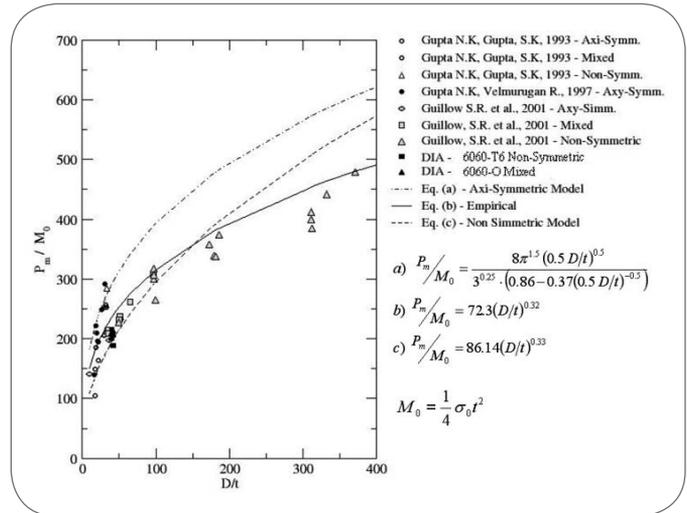


Fig. 8
Correlazione fra i livelli di forza media prevista da alcune formulazioni analitiche ed i risultati sperimentali.
 Correlation between the mean collapse force of light alloy absorbers predicted by the analytical formulations and experimental results.

dimento non trascurabile. In generale, pertanto:

$$\text{Eq. 3 } \sigma_Y < \sigma_0 < \sigma_U$$

La Fig. 8 riporta la correlazione fra alcune formulazioni presentate in letteratura, fra cui la precedente Eq. 2 e le espressioni sviluppate in [31, 32], e una serie di risultati sperimentali comprendenti dati pubblicati in letteratura [30,34,37] ed esperimenti eseguiti presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano (DIA). Si può osservare come le predizioni fornite dalle formulazioni analitiche non possano essere considerate completamente affidabili. La formulazione considerata in Eq. 2 coglie tuttavia abbastanza correttamente la tendenza di aumento della forza media con l'incremento del rapporto fra diametro e spessore, in modo da permettere alcune considerazioni di carattere generale. Va anche osservato che i dati sperimentali considerati nella correlazione presentata in Fig. 8 si riferiscono sia a prove di schiacciamento eseguite in condizioni quasi-statiche sia a prove di impatto, eseguite in condizioni quindi dinamiche di applicazione del carico assiale all'assorbitore. La dipendenza delle proprietà del materiale dalla velocità di deformazione non è stata introdotta nelle previsioni fornite dalle formulazioni analitiche riportate in Fig. 8. Un modo di tenerne conto consiste nel sostituire il valore di sforzo σ_0 con un suo equivalente dinamico, σ_d , dipendente dalla velocità di deformazione. Fra le espressioni empiriche più utilizzate a questo scopo, da calibrare in base a specifiche prove sperimentali, vi è la formulazione di Cowper-Symonds [29,38,39,40] riportata in Eq. 3, dove la dipendenza di σ_d dalla velocità di deformazione $d\epsilon/dt$ è definita attraverso due parametri H e q.

$$\text{Eq. 3 } \sigma_d = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{d\epsilon/dt}{H} \right)^{1/q} \right]$$

L'esame dei dati riassunti da alcune fonti in letteratura [29,39,40], relativamente alla sensibilità alla velocità di deformazione delle leghe leggere, può essere riassunto nelle due osservazioni seguenti: - la dipendenza del comportamento con la velocità di deformatio-

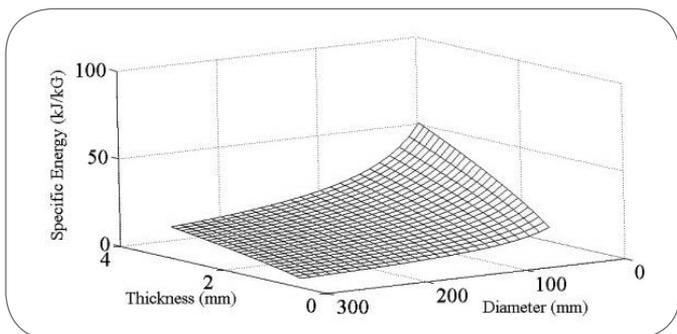


Fig. 9 **Andamento dell'energia specifica assorbita con i parametri geometrici per una lega con $\sigma_d = 200$ MPa.**
Specific energy as a function of the geometrical characteristics of the absorber for a material having $\sigma_d = 200$ MPa.

ne varia da lega a lega e al variare del trattamento termo-meccanico della lega stessa; essa, comunque, diminuisce con l'aumentare dello sforzo di snervamento della lega di alluminio, e quindi con l'aumentare di σ_d ;

- la sensibilità delle leghe leggere di alluminio alla velocità di deformazione è limitata e notevolmente inferiore a quella relativa agli acciai a basso tenore di carbonio.

I dati pubblicati permettono di identificare due calibrazioni limite per la legge di Cowper-Symonds applicata alle leghe di alluminio, la prima, caratterizzata da $q = 4$ e $D = 6500 \text{ s}^{-1}$, definisce la sensibilità più elevata ed è più adatta a leghe ricotte e la seconda, con $q = 5$ e $D = 1.288 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, configura una sensibilità molto ridotta ed è adatta a leghe con resistenza meccanica pari o superiore alla Al 6061 T6 [29].

Valutando i livelli di velocità di deformazione nominali per le prove riportate in Figura 8, la variazione di forza media dovuta all'introduzione dello sforzo dinamico σ_d è sempre inferiore al 10%.

Quindi, combinando le Eq. ni 1, 2 e 3 l'energia specifica per un assorbitore cilindrico, può essere espressa in funzione dello sforzo in campo plastico, σ_d , della densità ρ e, considerato che $A = \pi D t$ per un cilindro a parete sottile, dei parametri geometrici t e D , come indicato in Eq. 4.

$$\text{Eq. 4 } SE = \frac{\left[\frac{1}{4} \sigma_d t^2 \right] \left[72.3 \left(\frac{D}{t} \right)^{0.32} \right]}{\rho \pi D t}$$

La Fig. 9 mostra l'andamento dell'energia specifica ottenuto applicando l'Eq. 4 al variare dei parametri geometrici e considerando un valore di $\sigma_d = 200$ MPa. Tale valore può considerarsi rappresentativo di leghe quali la Al 6060 T5 o T6, adottate nella maggior parte delle prove sperimentali presentate in letteratura [30,34,37].

L'andamento riportato in Fig. 9 evidenzia come l'energia specifica possa essere incrementata riducendo i diametri ed aumentando gli spessori mentre, dall'esame dell'Eq. 4, si evince chiaramente come l'energia specifica possa essere significativamente aumentata incrementando σ_d e quindi adottando leghe leggere a più elevata resistenza.

Tali considerazioni appaiono fondamentali per installare sistemi di assorbimento di energia di basso peso ed elevata efficienza, ma non tengono conto di un aspetto, che è effettivamente scarsamente considerato in letteratura ma di grande rilievo per l'applicazione ingegneristica, relativo alla necessità di utilizzare materiali con adeguato allungamento a rottura per evitare la formazione di

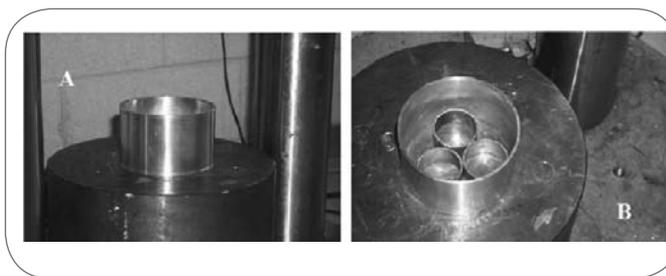


Fig. 10 **Apparato sperimentale per prove su assorbitori realizzati in diverse leghe di alluminio.**
Experimental set-up for the performed tests on absorbers manufactured using different types of light alloy.

fratture durante la formazione delle pieghe. Poiché le deformazioni durante il processo di collasso aumentano con lo spessore delle pareti dell'assorbitore, elementi di spessore non trascurabile o realizzati con materiale non sufficientemente duttile non possono essere utilizzati come assorbitori. Il fenomeno è stato documentato con una serie di prove, effettuate presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano, realizzati su assorbitori di uguale diametro e progettati con diverso materiale e spessori con l'obiettivo di ottenere una forza media di collasso identica. La Fig. 10 mostra l'apparato sperimentale utilizzato, basato su una slitta verticale con massa battente di 200 kg. All'interno degli assorbitori, appoggiati su una incudine fissa, sono stati preliminarmente introdotti degli elementi in lega d'alluminio per fermare la massa battente prima dello schiacciamento completo (Fig. 10-B). I risultati, mostrati in Fig. 11, evidenziano come solo la lega Al 6061 T4 sia risultata adeguatamente duttile per permettere lo sviluppo completo delle pieghe prima della formazione di fratture che impediscono l'assorbimento dell'energia.

PROGETTAZIONE DI STRUTTURE IN CONDIZIONI DI IMPATTO DA VOLATILE

Aspetti teorici e filosofie di progetto

L'aumento del traffico aereo, delle prestazioni dei velivoli e la tendenza alla realizzazione di strutture di estrema leggerezza rendono l'impatto da volatile un aspetto non più trascurabile nella progettazione degli aeromobili. Le normative valide in ambito civile per i velivoli ad ala fissa e rotante [22, 23] hanno da tempo recepito la necessità di dimensionare tutte le parti esposte dei velivoli per ridurre le conseguenze dovute a tali impatti [4]. Secondo le norme, la struttura deve essere dimensionata in modo da resistere a impatti di volatili da 1 kg a 2 kg, rispettivamente per aerei ed elicotteri, a velocità prossime a quelle di crociera.

Una valutazione approssimativa delle forze in gioco può ottenersi applicando un modello idealizzato di volatile e considerando l'impatto normale su un corpo rigido. L'idealizzazione si basa sulla possibilità di considerare, alle velocità di interesse, l'impatto del volatile come quello di un getto di fluido, eventualmente caratterizzato da una certa porosità [18,19,20,23]. Secondo tali assunzioni, la forza media scambiata con la superficie è pari al rapporto fra la quantità di moto del volatile e la durata dell'impatto che, a sua volta, può essere valutata nota la lunghezza del volatile (Eq. 5).

$$\text{Eq. 5 } F_0 = \frac{MV_i}{T_0} = \frac{MV_i^2}{L_0}$$

Considerando il volatile come un corpo cilindrico, di lunghezza

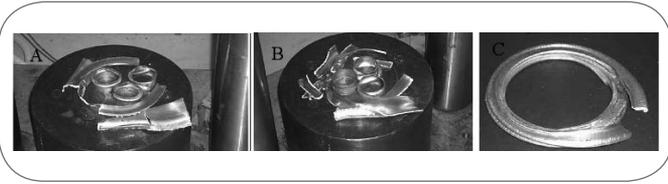


Fig. 11
Risultati sperimentali con assorbitori in Al 6061 T6 (A), Al 7075 T6 (B) e Al 6061 T4 (C).
Experimental results obtained with absorbers made of Al 6061 T6 (A), Al 7075 T6 (B) and Al 6061 T4 (C).

L0 e diametro L0/2 [18,19,20,23], l'Eq. 5 fornisce una indicazione dell'ordine di grandezza della forza di impatto per volatili con massa compresa fra gli estremi previsti dalla normativa e per velocità nell'intervallo $100 \text{ ms}^{-1} \div 200 \text{ ms}^{-1}$. La Fig. 12 mostra che forze dell'ordine delle decine di daN possono essere esercitate su strutture di grande rigidezza. L'impatto su superficie deformabile può comunque attenuare tali livelli di forza [18,23].

Le considerazioni precedenti permettono di introdurre le principali filosofie di progetto che possono essere applicate per gli elementi, quali i bordi di attacco, le carenature e le strutture di vincolo dei trasparenti, che devono svolgere la funzione di barriere protettive nei confronti di strutture primarie, degli occupanti o di impianti in caso di impatto da volatile. Il caso mostrato in Fig. 13-A esemplifica una scelta basata sull'adozione di barriere estremamente rigide e resistenti. Le forze di impatto, come appena affermato, possono essere notevolmente ridotte se parte dell'energia di impatto è assorbita per deformazione strutturale, come nel caso schematizzato in Fig. 13-B. Il pericolo è, tuttavia, di intrappolare il materiale del volatile nella struttura deformata e di impedirne il flusso, amplificando in realtà le forze trasmesse. La soluzione in Fig. 13-C si affida invece alla forma geometrica di un'ulteriore barriera strutturale, in grado di deflettere il materiale del volatile. È intuibile come le proprietà del materiale selezionato per realizzare le barriere strutturali giochino un ruolo di primaria importanza nel progetto di una soluzione soddisfacente con il minimo aggravio di peso. Per le leghe di alluminio, la possibilità di sfruttare le deformazioni plastiche per attenuare le forze di impatto è di fondamentale importanza, ma il compromesso ottimale fra la tenacità e la resistenza del materiale impiegato dipenderà dal tipo di filosofia di progetto adottata.

Tali valutazioni necessitano di strumenti in grado di analizzare il fenomeno che non può essere affrontato con i tradizionali metodi di analisi lineare. Non è neppure realisticamente possibile individuare le soluzioni ottimali, in termini di approccio progettuale e di selezione del materiale, basandosi sulla sola attività sperimentale che, risultando particolarmente complessa e costosa in questo ambito, deve necessariamente orientarsi verso approcci molto conservativi per minimizzare i costi e i tempi di realizzazione e di prova di prototipi dettagliati della struttura. L'analisi numerica dei fenomeni di impatto da volatile è quindi di primaria importanza per individuare soluzioni progettuali e materiali adeguati.

Approcci numerici e modellazione del materiale per la progettazione ad impatto da volatile

A titolo di esempio, sarà presentato un caso di impatto su un impennaggio verticale con struttura primaria in composito [25]. Il comportamento fragile del composito e la possibile attenuazione dei carichi ottenibile sfruttando la deformabilità strutturale hanno suggerito di realizzare la parte anteriore in lega di alluminio. La Fig. 14 mostra il prototipo dell'impennaggio ed il suo modello ad

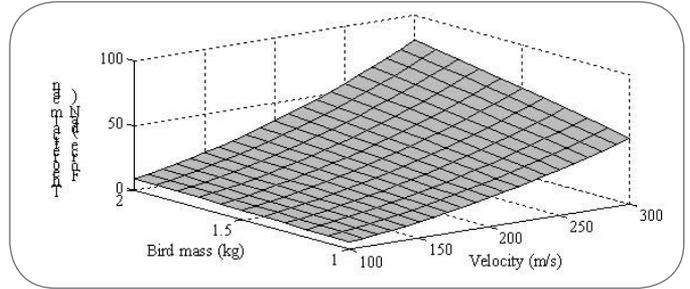


Fig. 12
Stima teorica delle forze medie esercitate durante un impatto normale di volatile su superficie rigida.
Theoretical evaluations of the mean forces exerted by an idealised bird in a normal impact on a rigid surface.

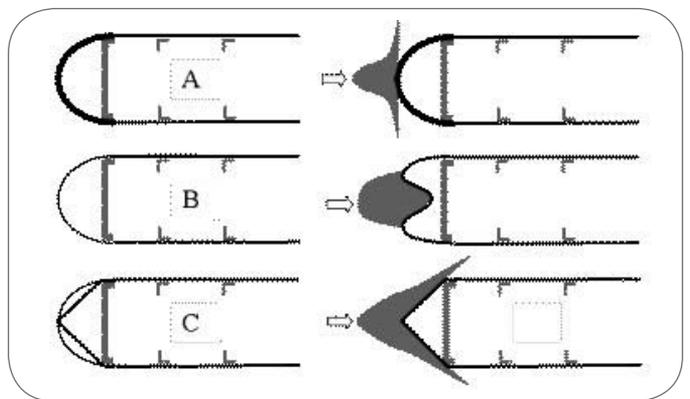


Fig. 13
Filosofie progettuali per strutture resistenti all'impatto da volatile.
Possible design philosophies for bird proof structures.

elementi finiti, realizzato per l'analisi di impatto eseguita con il codice ESI/Pam-Crash.

Sia le parti metalliche che la parte in composito sono state caratterizzate nel modello con approcci basati sulla meccanica del danno per rappresentare, in modo approssimato, l'evoluzione di fratture e lacerazioni negli elementi strutturali. In estrema sintesi, come indicato in Eq. 6, l'introduzione di una variabile di danneggiamento, d , nel modello di materiale ha l'effetto di ridurre gli sforzi effettivi trasmessi dal materiale, σ_{eff} rispetto a quelli determinati dal comportamento costitutivo in assenza di danno, σ , calcolati in base ad una legge elasto-plastica per il metallo o ad una legge elastica ortotropa per il composito.

$$\text{Eq. 6 } \sigma_{eff} = \sigma(1 - d)$$

La degradazione modellata in Eq. 6 giunge, in corrispondenza ad un valore unitario della variabile di danno, a rappresentare la rottura del materiale. In realtà, un approccio di questo per la modellazione di fratture e lacerazioni deve essere applicato con estrema cautela e non può ritenersi altrettanto affidabile rispetto ad approcci più rigorosi basati sulla meccanica della frattura computazionale. Per analisi di grande complessità, come quella in oggetto, tale approccio rappresenta tuttavia una via praticabile per indagare approssimativamente la possibilità di lacerazione della barriera strutturale da parte del volatile. In particolare, nella legge impiegata per caratterizzare il bordo d'attacco in alluminio,

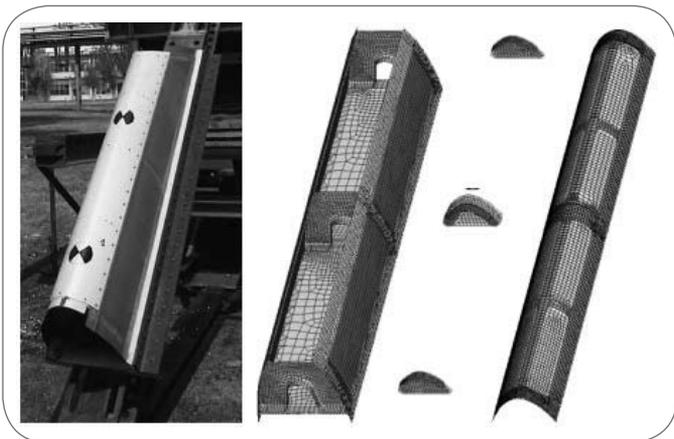


Fig. 14

Prototipo dell'impennaggio e modello ad elementi finiti.

Prototype of a vertical stabilizer subjected to bird impact tests and numerical FE model.

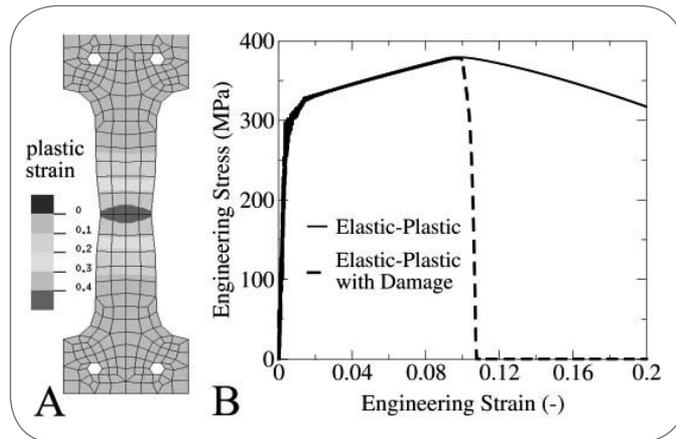


Fig. 15

Modello di provino e curve numeriche di sforzo-deformazione ingegneristica ottenute applicando il modello elastico di materiale ed il modello elasto-plastico con danneggiamento.

FE model of a tensile specimen and numerical engineering stress-strain curves obtained by applying an elastic-plastic material model with and without damage.

il danno è stato fatto evolvere semplicemente in funzione della deformazione plastica. La legge di danno è stata calibrata in modo da non interferire con la curva sforzi veri - deformazioni vere del materiale fino al raggiungimento dei carichi di rottura e con l'obiettivo di rappresentare approssimativamente la tenacità del materiale [25]. Da questo punto di vista, l'introduzione della legge di danno permette di evitare errori grossolani, come dimostrato in Figura 15, che mostra un modello numerico di provino (Fig. 15-A) e le curve sforzo-deformazioni ingegneristiche ottenute con e senza l'applicazione del modello di danno (Fig. 15-B).

Il modello dell'impennaggio è stato analizzato in due condizioni di impatto. Nella prima condizione il volatile è stato diretto sul bordo di attacco, fra le due centine inferiori. L'esperienza, come correttamente individuato anche nell'analisi numerica (Fig. 16), ha evidenziato come il bordo di attacco sia, in questo caso, eccessivamente deformabile. Il materiale del volatile non è stato deviato, ma, intrappolato nella piega formatasi con la deflessione del bordo di attacco, ha portato alla formazione di fratture ed ha impattato con la sottostante struttura in composito.

Nella seconda condizione di impatto il volatile è stato diretto sul bordo di attacco in corrispondenza della centina centrale. In questo caso la struttura si è deformata attutendo le forze di impatto senza tuttavia cedere completamente, permettendo quindi di deflettere il materiale del volatile (Fig. 17). I livelli di danno sulla struttura primaria in composito sono da considerarsi accettabili.

L'esempio conferma ancora l'importanza che le analisi numeriche possono assumere per una selezione ottimale del materiale. Il modello numerico, infatti, è potenzialmente in grado di indicare l'adeguatezza delle proprietà del materiale per assorbire l'energia del volatile o per deviarne la traiettoria. Sebbene due condizioni di impatto siano state utilizzate per permettere di valutare la correlazione numerico-sperimentale, il modello risulta sufficientemente affidabile per valutare possibili modifiche rispetto all'ipotesi di progetto originale.

CONCLUSIONI

Gli esempi e gli approfondimenti discussi in questo articolo indicano come i livelli di resistenza, tenacità complessiva e allungamento a rottura delle leghe di alluminio giochino un ruolo fondamentale nella progettazione di strutture aeronautiche con

caratteristiche di sicurezza passiva e di tolleranza agli impatti. Si è evidenziato come i requisiti di tenacità e di elevato allungamento a rottura siano fondamentali nella realizzazione di elementi in grado di assorbire energia mediante processi deformativi in campo plastico. Tuttavia, la necessità di preservare l'integrità strutturale delle parti cui è demandata la trasmissione dei carichi fra i diversi sistemi di assorbimento di energia indica come siano da privilegiare, in questi casi, i requisiti di resistenza. I livelli di resistenza e di tenacità a frattura risultano determinanti anche per la prestazione di parti strutturali soggette ad impatto da volatile, dove si è evidenziata la necessità di evitare che eccessive deformazioni portino ad intrappolare il materiale del volatile, ostacolando il flusso ed amplificando i carichi di impatto. Si può quindi affermare che i compromessi ottimali fra resistenza e tenacità del materiale, e quindi la selezione ottimale della tipologia di lega e dei trattamenti, dipendano dalla funzione che la parte strutturale svolge nella risposta complessiva della struttura. In questo ambito un ruolo fondamentale può essere svolto dalle moderne tecniche numeriche applicate all'analisi dei fenomeni di impatto. Gli esempi presentati in questo articolo consentono di apprezzare come l'applicazione delle tecniche numeriche, in presenza di una modellazione del comportamento del materiale adeguata, completa ed affidabile, possa fornire importanti indicazioni per sfruttare appieno le proprietà e la versatilità delle leghe di alluminio. Si può affermare che, allo stato attuale, tali tecniche forniscano risultati di notevole affidabilità relativamente alla modellazione del comportamento in campo plastico delle strutture. Sebbene molti progressi siano stati compiuti dal punto di vista teorico e speculativo, è invece più difficile, almeno per quanto riguarda il campo aeronautico, ritenere altrettanto affidabili i risultati relativi alla predizione di fratture e lacerazioni nella parti strutturali. Spesso, infatti, i modelli costitutivi proposti risultano estremamente semplificati o, all'altro estremo, particolarmente complessi e di difficile calibrazione, prevedendo la necessità di ricorrere a molte prove svolte in condizioni dinamiche di applicazione dei carichi. Uno sforzo ulteriore è quindi richiesto in questa direzione per mettere a punto tecniche di modellazione, con leggi e procedure di calibrazione affidabili ma di complessità accettabile, in modo da per-

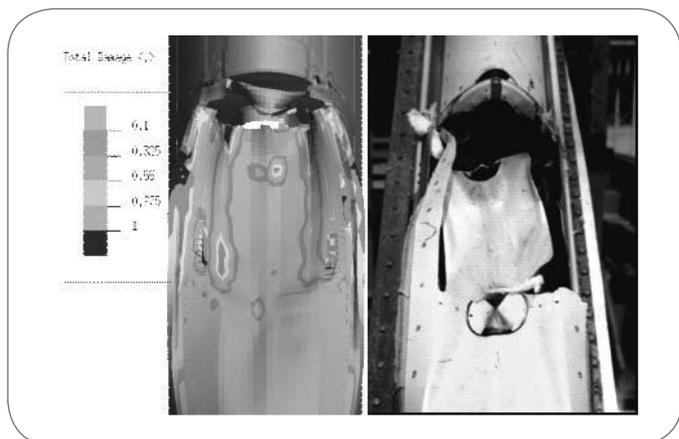


Fig. 16

Correlazione numerico-sperimentale dei livelli di danno nella prima condizione di impatto sull'impennaggio.
Numerical-experimental correlation of the damage level in a first bird impact condition on a vertical stabilizer.

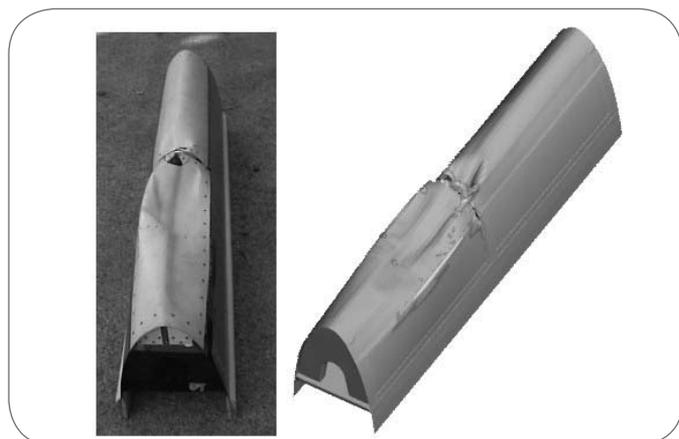


Fig. 17

Correlazione numerico-sperimentale di livelli di danno nella prima condizione di impatto sull'impennaggio.
Numerical-experimental correlation of the damage level in a second bird impact condition on a vertical stabilizer.

mettere ai progettisti la selezione accurata di leghe e trattamenti in grado di rispondere nel modo più adeguato ai requisiti imposti dal controllo della risposta strutturale in condizioni di impatto.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Joint Service Specification Guide, JSSG-2010-7, "Crew System Crash Protection Handbook", Department of Defense, United States of America, 1998.
- 2) Military Standard, MIL-STD-1290, "Light Fixed and Rotary-Wing Aircraft Resistance", Department of Defense, United States of America, 1995.
- 3) Aircraft crash survival desing guide, Simula Inc, Phoenix, Az, USA, 1989.
- 4) Thorpe, J., "Fatalities and destroyed civil aircraft due to bird strike, 1912-2002", International Bird Strike Committee, 26th Meeting, Warsaw, Poland, May 2003.
- 5) Harris, F.D., Kasper, E.D., Iseler, L., "US Civil Rotorcraft Accidents, 1963 through 1997", NASA/TM-2000-209597.
- 6) Giavotto V., Caprile C. and Sala G., "The Design of Helicopter Crashworthiness; Energy Absorption of Aircraft Structures as an Aspect of the Crashworthiness", AGARD, 66th Meeting of structures and material, Luxemburg, 1988.
- 7) McCarthy M.A., Wiggeraad J.F.M., "Numerical investigation of a crash test of a composite helicopter subfloor structure", Int. J. of Composite Structures, 2001, Vol. 51, pp. 345-359.
- 8) Lanzi L., Bisagni C., Ricci S., "Neural Network Systems to Reproduce Crash Behavior of Structural Components", Computers & Structures, 2004. Vol. 82, N. 1, pp. 93-108.
- 9) Lanzi L., Castelletti L., Anghileri M., "Multi-objective Optimisation of Composite Absorber Shape under Crashworthiness Requirements", Composite structures, Vol. 65 N. 3-4, 2004, pp. 433-441.
- 10) Lanzi L., Airolidi A., Chirwa E.C., "Numerical Techniques for the Design of Crashworthy Subfloors", Proceedings of the ICrash 2004, San Francisco, July 14-16, 2004.
- 11) Lanzi L., Airolidi A., Astori P., Grassi F., "Optimisation of Energy Absorbing Subsystems for Helicopter Vertical Crashes", 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2006, Hamburg, Germany, September, 3-8, 2006.
- 12) Schut R., "NH90 Nose Landing Gear Behaviour during Crash Landing", Proceedings of European Rotorcraft Forum, 26th, The Hague, Netherlands, Sept. 26-29, 2000, Vol. 1 (A01-20808 04-05), Amsterdam, Netherlands, National Aerospace Laboratory, 2000, p. 7.1-7.7.
- 13) Clarke C. W., Garman J. C., "Using KRASH to Assess the Crash Survivability of the RAH-66 Comanche Helicopter", Proceedings of the 3rd International KRASH User Seminar, Tempe, AZ, U.S.A., January 8-10, 2001.
- 14) Fagan C.H., "Crash attenuation landing gear", US Patent, 3,997,133, 1975.
- 15) Airolidi A., Janszen G., "A Design Solution for a Crashworthy Landing Gear with a New Trigger Mechanism for the Plastic Collapse of Metallic Tubes", Aerospace Science and Technology, Vol. 9, N. 5, 2005, pp. 445-455.
- 16) Airolidi A., Janszen G., Bergamelli C., Sanvito M., "Triggering System for the Plastic Collapse of a Metal Structural Element", Patent, PCT Application Number PCT/EP2004/005805, International Publication Number WO 2004/106769 A1, 2004.
- 17) Airolidi A., Guardone A., Astori, P., Parazzoli L., "A Numerical Approach for the Development of a Crashworthy Landing Gear" Proceedings of the 6th International KRASH User Seminar, Milano, Italy, September, 2006.
- 18) Wilbeck J.S., "Impact Behaviour of Low Strength Projectiles", Ph.D. dissertation, Texas A&M University, 1977.
- 19) McCarthy R.E., "Finite Element Analysis of F-16 Aircraft Canopy Dynamic Response to Bird Impact Loading", AIAA Paper AIAA 80-0804, 21st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Seattle, WA, USA, 1980.
- 20) Brockman R.A., Held T.W., "Explicit Finite Element Method for Transparency Impact Analysis", University of Dayton Research Institute Report WL-TR-91-3006, 1991.
- 21) FAR part 25, "Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes", FAA, 2008.
- 22) FAR part 29, "Airworthiness Standards: Transport Category Rotorcraft", FAA, 2008.
- 23) Airolidi A., Cacchione B., "Modelling of Impact Forces and Pressures in Lagrangian Bird Strike Analysis", International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, 2006, pp. 1651-1677.
- 24) Johnson A.F., Holzapfel M., "Modelling Soft Body Impact on Composite Structures", Composite Structures, 2003, Vol. 61, pp. 103-113.

- 25) Airoidi A., Tagliapietra D., Bird Impact Simulation Against a Hybrid Composite and Metallic Vertical Stabilizer", AIAA Paper AIAA 2001-1390, 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Seattle, WA, USA, 2001.
- 26) Langrand B., Bayart A.S., Deletombe E., Chauveau Y., "Assessment of Multi-Physics FE Methods for Bird Strike Modelling - Application to a Metallic Riveted Airframe" ONERA TP no 2002-53. ICRASH 2002 Congress. Melbourne, Australia, 2002.
- 27) Airoidi A., Cacchione B., "Numerical Analyses of Bird Impact on Aircraft Structures Undergoing Large Deformations and Localised Failures", International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures. Florianopolis, Brazil. 8-12 May 2005, published in Impact Loading of Lightweight Structures, Editors Alves M., Jones N., WIT Press, Southampton, UK, 2005, pp. 1-18.
- 28) Schweizerhof, K., Nilsson, L. and Hallquist, J.O., "Crashworthiness Analysis in the Automotive Industry", International Journal of Computer Applications in Technology, Special Issue on the Industrial Use of Finite Element Analysis, Vol. 5, No. 2/3/4, pp. 134-156.
- 29) Jones N., "Structural Impact", Cambridge University Press. 1989.
- 30) Guillow, S.R., Lu, G., Grzebieta, R.H., "Quasi-Static Axial Compression of Thin-Walled Circular Aluminium Tubes", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, 2001, p. 2103-2123.
- 31) Abramowicz W., Jones N., "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", International Journal of Impact Engineering, Vol. 2, 1984, pp. 263-281.
- 32) Abramowicz W., Jones N., "Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes", International Journal of Impact Engineering, Vol. 4, 1986, pp. 243-269.
- 33) Wierzbicki T., Bhat S.U., Abramowicz W., Brodtkin D., "Alexander Revisited - a Two Folding Element Model of Progressive Crushing of Tubes", International Journal of Solid and Structures, Vol. 29, pp. 3269-3288.
- 34) Gupta N. K., Gupta S.K., "Effect of Annealing, Size and Cut-outs on Axial Collapse Behaviour of Circular Tubes", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35, 2001, pp. 597-613.
- 35) Singace, A. A., "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Lobe Mode", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, 1999, pp. 865-890.
- 36) Pugsley A., Maculay M., "The Large Scale Crumpling of Thin Cylindrical Columns", Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 13, 1960, pp. 1-9.
- 37) Gupta N.K., Velmurugan R., "Consideration of Internal Folding and Non-symmetric fold formation in Axi-symmetric Axial Collapse of Round Tubes", International Journal of Structures, Vol. 34, 1997, pp. 2611-2630.
- 38) Cowper G. R., Symonds P. S., "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams", Technical Report No. 28 from Brown University, Providence, to the Office of Naval Research under Contract No. 562, 1957.
- 39) Zukas, J. et al., "Impact Dynamics" John Wiley & Sons, Inc, 1982.
- 40) Meyers M. A., "Dynamic Behavior of Materials", John Wiley & Sons, Inc, 1994.

ABSTRACT

SIGNIFICANT PROPERTIES OF ALUMINIUM LIGHT ALLOYS IN THE DESIGN OF ENERGY ABSORBING AIRCRAFT STRUCTURES

Keywords: aluminium light alloy, plastic deformation, numerical simulations, review, material selection

The paper summarises the fundamental aspects of the design of structures and structural parts in aluminium light alloys in cases when energy absorption performances are required. Particularly, the design of crashworthy helicopter structures and the development of leading edges, for wings or tail empennages, in bird impact conditions are considered. In both cases the structural performance turns out to be strongly influenced by the material properties beyond the elastic range, such as the ultimate strength, the overall toughness, the elongation at failure and the strain rate sensitivity of the plastic response. The design conditions of crashworthy helicopter structures are referred to potentially survivable crash scenarios where the absorption of the impact energy by means of absorbers located in the landing gears, in the subfloor and in the seats can significantly reduce the occupant injuries (Figure 1). The deceleration experienced by the occupants is actually influenced by the response of the whole structure of the helicopter, as it can be outlined by the experimental evidence in an helicopter crash test (Figure 2). As far as the subfloor and the landing gears are concerned, some design solutions developed to integrate energy absorbing elements in their structural lay-outs are presented (Figures 3,4). The working mechanism of light alloy absorbers is exemplified considering a light alloy crushing tube (Figure 5) and the role that can be played by numerical analyses in the design and verification of the absorbers integrated in the helicopter structure is outlined (Figure 6). Indeed, many helicopter structural parts contribute to transmit the loads thus allowing the absorbers to properly work and, for thus parts, strength requirements have to be considered far more important than energy absorbing issues. To identify the role played by the different parts and the consequent requirements, an hybrid

multi-body/finite elements modelling technique is presented with an application to an helicopter subfloor (Figure 7). A general evaluation of the roles played by the strength level, the elongation at failure and the strain rate sensitivity in the design of light alloy absorbers is then carried out, basing on analytical formulations for the prediction of the absorber performances that are correlated with a data base of experimental results (Figures 8,9). Experiments performed with absorbers made of different light alloy are also discussed (Figures 10,11). Attention is then focused on the issues relevant to the bird impacts on aircraft structures, after having pointing out that this occurrence turns out to be, basing on the current civil aviation regulation, the dimensioning condition for many parts of fixed and rotary wing aircraft structures. The force levels that can be exerted by a bird strike are evaluated (Figure 12) and the main design philosophies developed to design bird proof leading edges are presented (Figure 13). It is evidenced that, also in this case, the problem can not be reduced to design a structure and select a material for maximum energy absorbing capabilities. In fact, the risk of bird pocketing due to an excessive structural deformation suggests to take into considerations design solutions where the bird material is actually deflected. In such cases, the strength levels of the chosen light alloy may determine the development of an adequate bird proof structure. These concepts are illustrated considering the bird impact on a hybrid light alloy/carbon composite vertical stabilizer (Figure 14). A numerical model of the impact test is also presented discussing the key role performed, in the performed numerical analysis, by a damage law introduced to approximately model the tearing of the structural barrier (Figure 15). The completely different experimental outcomes obtained in two impact conditions are presented, indicating that the adopted simplified material characterisation can indeed evaluate the adequacy of the structural impact strength levels (Figures 16, 17). Globally, all the presented numerical cases highlight the potential role that can be played, in exploiting the full range of properties offered by aluminium alloys, by the execution of numerical analyses, when reliable and complete descriptions of the material behaviour beyond the elastic range are introduced in the models.