

# COMPORTAMENTO DI TUBI SALDATI IN TITANIO TI 50A SOTTOPOSTI A PROVA DI IMPATTO

M. Marchetti<sup>1</sup>, M. Anghileri<sup>2</sup>, A. Pacchiarotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale,  
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale,  
Politecnico di Milano*

**SOMMARIO:** In questo lavoro è stato studiato il caso di tubi saldati in Titanio TI 50A sottoposti ad impatto normale (crash) sia con prove sperimentali che numeriche avvalendosi del programma PAM-CRASH della ESI-GROUP per lo studio agli elementi finiti. La scelta di studiare un elemento tubolare è dovuta principalmente al fatto che il suo meccanismo di cedimento è quello tipico delle strutture dei veicoli terrestri ed aerei realizzati in lamiere sottili di lega leggera e che assorbono energia deformandosi permanentemente per instabilità a compressione. I risultati ottenuti individuano il TI 50A come il materiale metallico a più elevato valore di assorbimento di energia specifica tra quelli fino ad ora testati presso il Politecnico di Milano, unica università italiana ad effettuare studi in tale settore; sono inoltre stati ottenuti ottimi risultati qualitativi relativi alla simulazione numerica eseguita.

**PAROLE CHIAVE:** Titanio, tubi, saldatura, crash, impatto normale.

## INTRODUZIONE

Nel progetto di strutture di veicoli e velivoli ed in particolari di elicotteri e velivoli ad ala fissa i requisiti di sicurezza passiva rivestono un'importanza in continua crescita. Infatti le norme di aeronavigabilità, militari prima e civili poi, richiedono alla struttura di garantire la sicurezza degli occupanti in urti col terreno compresi entro un prestabilito inviluppo di condizioni potenzialmente sopravvivibili. Questa sicurezza deve essere ottenuta attraverso un attento e non facile accordo fra le caratteristiche di rigidità da una parte e i livelli di carico ed i modi di collasso dall'altra. Viceversa, la pressante esigenza di economia del trasporto e di prestazioni elevate richiede la capacità di scelte progettuali il più possibile vicine al miglior compromesso fra i molteplici e contrastanti requisiti, ivi compresi quelli di sicurezza passiva. Ecco quindi necessario approfondire il comportamento dinamico dei materiali delle strutture sottoposti ad urti di intensità tale da produrre il collasso elasto-plastico di parti importanti ed essendo il Titanio uno tra i materiali utilizzati per le costruzioni aeronautiche in percentuale di peso sempre maggiore, si fa sentita l'esigenza di andare a valutare il comportamento di queste leghe durante i fenomeni di crash; in particolare il Titanio esaminato in questo lavoro è il TI 50A. Il Ti 50A è il nome commerciale dato dalla TIMET (società leader nella produzione e lavorazione del titanio) al Titanio Gr.2, ovvero al secondo dei sei tipi di Titanio puro

che vengono comunemente denominati Commercialmente Puro (CP). Il Gr.2 è stato scelto in quanto rappresenta il miglior compromesso tra prestazioni e prezzo ed è il Titanio che trova il più grande impiego nelle applicazioni industriali avendo un elevato (ma non altissimo) valore di resistenza a rottura, 345MPa garantiti, buona conducibilità e lavorabilità; anche il campo elastico è paragonabile a quello degli acciai austenitici inossidabili, ai quali aggiunge una resistenza alla corrosione ottima. Il presente lavoro consiste nella sperimentazione e simulazione numerica con il programma PAM-CRASH, codice FEM esplicito sviluppato appositamente per lo studio di fenomeni di crash, applicato, nel nostro caso, a collisioni di provini cilindrici saldati in parete sottile. Sono state eseguite prove di caratterizzazione del materiale, con lo scopo di studiare la struttura chimico-fisica attraverso l'analisi chimica, macrografica e micrografica; prove di trazione e compressione quasi-statica, da usare come dati input per la simulazione numerica ed infine prove di crash per valutare il comportamento del materiale al variare della velocità di deformazione. Sono stati così acquisiti dati relativi alle caratteristiche di assorbimento di energia del Titanio e al modo di deformarsi dei tubi in oggetto. Tali dati sono stati confrontati con ciò che è stato ottenuto dal processo numerico ed i risultati sono stati estremamente interessanti sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

## IL MATERIALE

Il TI 50A è il nome commerciale dato dalla TIMET al titanio Grado 2. E' un Titanio che comunemente non trova impiego in campo strutturale, ma questa particolare produzione fornitoci, denominata Aero Strip, definisce un prodotto di qualità superiore a cui è possibile assegnare le specifiche militari (serie MIL-T) ed AMS (Aerospace Material Specification). Al fine di verificare la composizione del materiale, le quantità di elementi ed impurità presenti, è stata eseguita un'analisi di laboratorio. E' stato fatto riferimento alla normativa ASTM riguardante le specifiche sul Titanio ed in particolare alla ASTM B338; tale specifica è quella applicata dalla casa madre al prodotto fornitoci. Analizzando i dati in tabella 1 possiamo verificare che il nostro materiale ha ampiamente rispettato le percentuali previste dalla normativa, consentendoci di stimare ottima la qualità del metallo.

	Composizione nominale (%)				Max tenore di impurezza (%)					Ti50A
	N	C	H	Fe	O	Al	Cr	Mo	V	
ASTM Gr2	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	-	-	-	-	99.47
Ti50A	0.009	0.017	0.007	0.12	0.11	0.042	0.13	0.005	0.084	99.59

Tabella1: Composizione chimica del TI 50A

I tubi testati sono stati saldati con il processo TIG. La normativa ASTM assegna al Gr.2 una saldabilità eccellente ed inoltre, trattandosi di materiale puro al 99%, non si hanno problemi di segregazioni interne. Per la saldatura è stata usata un'apparecchiatura in corrente continua avente un amperaggio di 25-30A, con una torcia di diametro 3/4" ed un elettrodo non consumabile in Tungsteno, classificato come ERTi-3 dalle norme AWS (American Welding Society) del diametro di 1/16" ed eseguendo un solo passaggio di saldatura. Particolare attenzione è stata dedicata alla pulizia delle superfici ed al disegno delle giunture. Per la pulizia è essenziale che le superfici siano libere da olio, scorie di

lavorazione, polvere e umidità in genere a non meno di un pollice dalla zona da saldare. Per il disegno, con questi spessori sottili, si usa tagliare il pezzo ad angolo retto ed affiancare le parti da unire senza creare svasature. Altro punto di vitale importanza per la buona riuscita della saldatura è la schermatura della saldatura stessa; qui si usa la combinazione di tre condotti che insufflano gas inerte per controllare l'atmosfera e per mantenere nello stesso tempo entro parametri accettabili la temperatura di raffreddamento. Indice di buona schermatura e quindi di saldatura eseguita in modo corretto è la colorazione della saldatura stessa, che deve apparire di colore argento brillante, senza sfumature blu o bianche, indicanti contaminazioni atmosferiche.

## **METODOLOGIA E RISULTATI DELLE PROVE**

Le prove sperimentali effettuate possono essere divise in due parti:

1°) prove di caratterizzazione del materiale;

2°) prove di crash.

Le prime sono state fatte con lo scopo di studiare la struttura chimico-fisica del materiale, attraverso l'analisi chimica, macrografica e micrografica. Una particolare attenzione è stata riservata alle zone termicamente alterate dalla saldatura, nelle quali sono state successivamente effettuate delle prove di microdurezza Vickers. Infine si è passati ad impiegare provini con la forma standard per la prova di trazione, la quale ha lo scopo di individuare un modello di materiale da usare come input per le simulazioni numeriche. La seconda tipologia di prove è stata eseguita su provini cilindrici in Titanio TI 50A, esattamente lo stesso materiale di quelli visti in precedenza.. E' da segnalare che non si è potuto utilizzare dati reperiti in altri lavori perchè numericamente troppo diversi tra loro e quindi inutilizzabili. Inoltre, non ci risulta che siano state condotte prove di crash sul TI 50A.

## **PROVE DI CARATTERIZZAZIONE**

L'analisi metallografica ha evidenziato il variare dell'andamento della struttura cristallina dal metallo base al cordone di saldatura. Si sono evidenziate le ridotte dimensioni della saldatura, indice di buona scelta dei parametri, insieme ad una non troppo evidente alterazione dei grani della struttura (Vedi foto 1). Successivamente sono state eseguite prove di durezza nella zona interessata dalla saldatura. Per le nostre prove abbiamo usato un microdurometro Leintz Miniload con un carico di 100gr.

In figura 1 sono riportati gli andamenti medi relativi a più prove effettuate lungo il cordone di saldatura. In particolare, il picco che si può notare nella parte esterna della Z.T.A. è forse imputabile ad un effetto di rinvenimento sul metallo base temprato dovuto al "trattamento termico" subito da tale zona. Si può notare comunque un apprezzabile aumento di durezza sul cordone di saldatura.

Per le prove di trazione quasi-statica si sono utilizzati provini a norma ASTM ricavati dallo stesso profilato di quelli cilindrici, con il vantaggio della sicurezza di costanza del materiale, ma con lo svantaggio di essere leggermente curvi. E' stato comunque considerato trascurabile l'effetto della curvatura, in quanto il tratto utile è risultato corrispondente ad un quindicesimo della circonferenza del profilato. Alla prova di trazione sono stati sottoposti tre provini. I risultati fornitici dalla macchina di trazione

sono stati acquisiti in maniera automatica su file garantendo così una maggior sicurezza nella precisione dei valori.

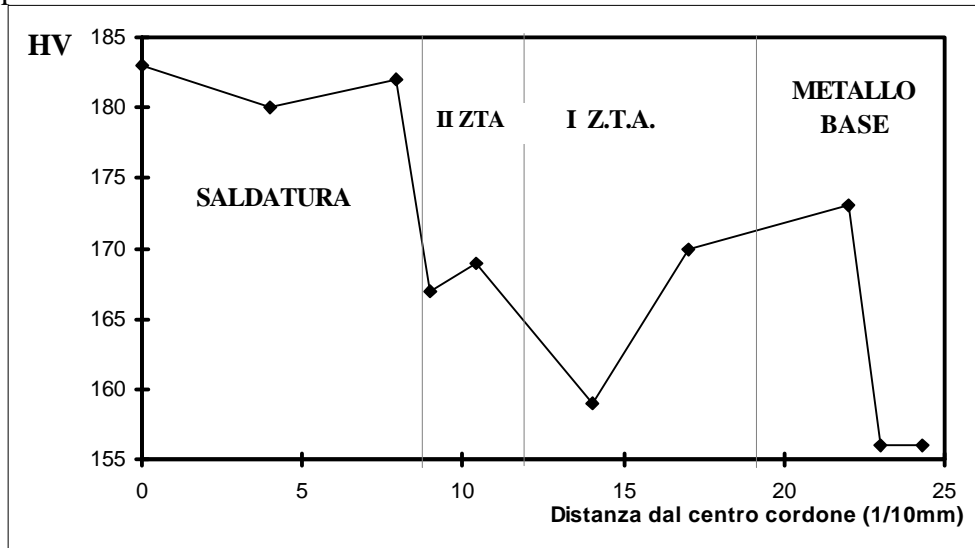


Figura 1: Andamento dei valori HV lungo la ZTA

Dopo una breve rielaborazione, è stata ricavata la curva sforzo-deformazione di tipo ingegneristico illustrata in figura.

I principali risultati che si ricavano sono:

- modulo elastico:  $E= 2250 \text{ Kg/mm}^2$
- sforzo di snervamento:  $\sigma_v= 42.33 \text{ Kg/mm}^2$ .

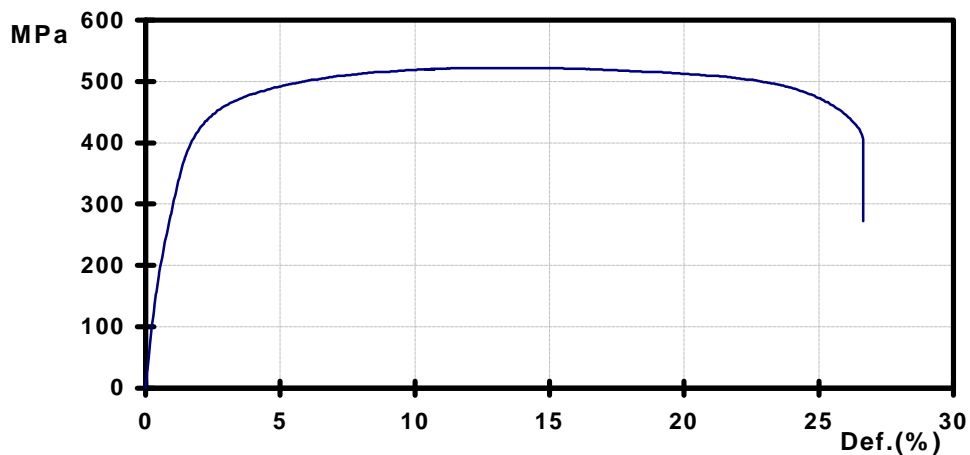


Figura 2: Curva sforzo-deformazione sperimentale

Alcune prove di compressione quasi-statica sono state effettuate prima di eseguire quelle di impatto; lo scopo è quello di avere un termine di paragone fra il comportamento statico e quello dinamico dei provini cilindrici.

Tale prova è stata eseguita con una macchina Trebel-Werk. I risultati sono riportati in figura.

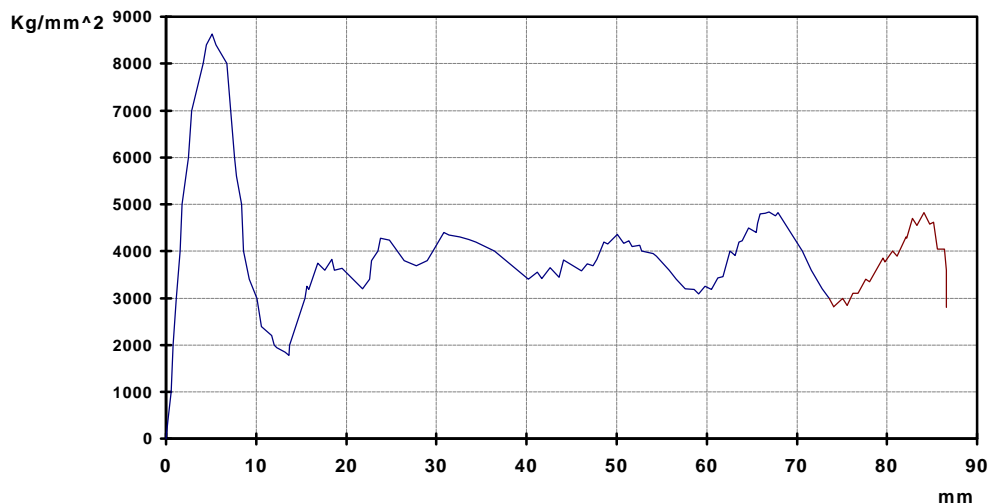


Figura 3: Curva forza-spostamento della prova di compressione quasi-statica

I dati più importanti rilevati sono:

- forza massima = 8680 Kg
- forza media = 3520 Kg
- crush stress = 46 Kg/mm<sup>2</sup>

Si può osservare che ogni picco di forza corrisponde alla formazione di una piega sulla superficie del cilindro. La deformazione è del tipo misto con una piega assialsimmetrica seguita da altre tre a diamante.

## PROVA DINAMICA

In questo caso con il termine prova dinamica si vuole fare riferimento a prove di impatto normale di cilindri in parete sottile (crash). Tali esperimenti sono stati eseguiti presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano. Per eseguire la prova è stata impiegata una macchina verticale a massa cadente. Si tratta di una macchina a caduta in cui un carrello di massa variabile, compresa tra i 50 ed i 300Kg, viene accelerato dalla forza di gravità e va ad impattare il pezzo su di un'area di prova delle dimensioni massime di 300x300mm. E' adatta per effettuare prove di assorbimento di energia e di penetrazione su piccoli componenti strutturali. L'altezza massima di sgancio della massa battente è di 6.5 m.; la velocità d'impatto, di conseguenza, risulta limitata a valori inferiori ai 10.5 m/s. All'interno dell'elemento mobile sono posti due accelerometri che vengono usati per la rilevazione delle accelerazioni in direzione verticale. La macchina è dotata di un proprio sistema di acquisizione, collegato normalmente a due accelerometri, come già detto, e di un trasduttore di spostamento, encoder, che sono installati sul carrello. Ecco allora che la velocità d'impatto non è calcolata in base all'altezza di sgancio in quanto, a causa degli attriti, questo non sarebbe un metodo troppo preciso, bensì viene misurata attraverso l'utilizzo dell'encoder incrementale stesso. Un grosso vantaggio nell'uso di questa macchina risiede nel fatto che, essendo impiegata ormai da molti anni, possiede un grado di affidabilità dei risultati molto elevato. Non esiste quindi alcun problema particolare di messa a punto e di controllo della stessa.

Nelle nostre prove sono stati impiegati due tipi di provini cilindrici le cui dimensioni risultano essere:

tipo 1	tipo 2
diametro: 50.8mm	diametro: 63.6mm
spessore: 1.2mm	spessore: 0.9mm
altezza: 170mm	altezza: 170mm

Nel corso delle prove si è evidenziato il fatto che i provini del tipo 2 non appartengono alla stessa produzione del tipo 1 in quanto si sono riscontrati risultati numerici, a volte, non paragonabili, spiegabili solo con l'utilizzo di un diverso tipo di materiale. Affinché i risultati acquisiti dalla macchina e le deformazioni impresse dalla massa battente sul provino non siano affette da errori, è stata fondamentale la preparazione dei pezzi in officina: dopo aver eseguito il taglio a 170mm, si è provveduto a fresare le estremità in modo da ottenere le due superfici di estremità parallele e piate.

### PROCEDURA DELLA PROVA DINAMICA

Le prove di compressione dinamica sono state effettuate nella seguente configurazione:

Peso massa battente: 110.7 Kg e 151.4 Kg

Distanza di sgancio: 0.20 m, 1.85 m, 3.30 m, 5.15 m

Velocità nominali di caduta: 2 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s

Frequenza di campionamento: 10 Khz

Frequenza di filtraggio: 1 Khz

L'acquisizione dei dati delle prove viene effettuata tramite una serie di programmi creati appositamente per questo tipo di prova dal personale del Politecnico.

Le prove di crash sono state eseguite su 39 provini da cui si sono ottenuti 35 risultati utili. L'esito negativo delle 4 prove "fallite" è da imputare ad errori di procedura da parte dell'operatore ed a tentativi di ricerca della giusta massa battente.

Una più precisa distribuzione delle prove secondo i diversi parametri risulta dalla tabella 2 di seguito riportata:

	2m/s	6m/s	8m/s	10m/s	
M = 110.7Kg	3	5	4	5	dia.50.8mm
M = 151.4Kg	N.E.	4	N.E.	4	dia.50.8mm
M = 110.7Kg	N.E.	3	4	3	dia.63.6mm

\*N.E.= non eseguite

Tabella 2: Distribuzione delle prove dinamiche

I risultati utili sono stati 25, su un totale di 29 prove con provini aventi diametro di 50.8mm, e di 10 su un totale di 11 prove con provini di diametro pari a 63.6mm. Le deformazioni sono state tutte di tipo non simmetrico con pieghe di tipo a diamante .

### RISULTATI DELLA PROVA DI CRASH

Il risultato più evidente, dal punto di vista qualitativo, è dato dal tipo di deformata, specialmente se confrontata con i risultati delle prove precedentemente svolte su provini tubolari in Alluminio presso il Politecnico. I provini in Titanio hanno mostrato il formarsi di pieghe non assialsimmetriche di tipo a diamante ovvero lo svilupparsi di più pieghe triangolari sovrapposte in due configurazioni alternate. E' interessante notare la differente deformata che si ottiene usando provini in Alluminio: deformate assialsimmetriche del tipo a concertina. Questi differenti modi di deformarsi del materiale possono anche attribuirsi alla preparazione dei provini stessi. Se infatti il taglio delle due "facce" del tubo non è ortogonale all'asse di simmetria del cilindro, di sicuro avremmo una deformata di tipo a diamante. Se invece la preparazione in officina è stata ben effettuata, le differenti deformate sono da attribuire solo alle diverse caratteristiche del materiale e ad eventuali imperfezioni geometriche o a difetti presenti nel materiale. Nel nostro caso la presenza della saldatura, seppur eseguita in maniera corretta, rappresenta un'imperfezione e per questo motivo si ha la presenza di pieghe del tipo a diamante; inoltre, l'osservazione dei 39 provini non ha portato a nessuna correlazione tra la presenza di fratture e la prossimità al cordone di saldatura, rimanendo questo integro o fratturandosi in analoghe circostanze Studi effettuati (Kindervater), hanno messo in evidenza anche delle relazioni tra i parametri geometrici (diametro, spessore), il tipo di deformata ed i valori di energia assorbiti.

Inoltre non è da trascurare il rilevante effetto dovuto all'incrudimento del materiale, da imputare ai trattamenti termici subiti.

#### ***Analisi quantitativa:***

i dati più importanti ottenuti ci vengono forniti dalla curva forza-spostamento. Da essa sono ricavabili quasi tutti i parametri caratteristici dell'impatto. La forza a cui si fa riferimento è quella misurata sulla massa battente o sull'estremità dell'elemento che subisce l'urto, che è la medesima. Lo spostamento è chiaramente quello dell'estremità dell'elemento. Analizzando la curva forza-spostamento, qualitativamente simile a quella ottenuta nel caso quasi-statico e precedentemente riportata, è facile individuare una serie di picchi; tali picchi hanno un ben determinato riscontro sul provino corrispondente. Il primo picco è corrispondente alla forza nei primi istanti d'impatto, mentre i successivi corrispondono alla formazione di una piega sulla superficie del cilindro. Esiste quindi una chiara relazione tra i punti della curva e la deformazione del cilindro. Si è inoltre osservata una più netta formazione delle pieghe nei cilindri del tipo 2 (spessore 0.9mm; diametro 63.6mm), che trova anche riscontro nella corrispondente curva forza-spostamento, più accentuata e meno "frastagliata". Sofferamoci adesso su un dato molto importante: l'Energia Specifica di Assorbimento, [KJ/Kg], parametro che definisce la capacità del materiale di assorbire energia. Il grafico di seguito riportato, mette a confronto i valori di assorbimento dei vari materiali. Si è trovato che il Titanio si colloca nella fascia più elevata dei materiali, quella dei compositi, nettamente al di sopra degli altri materiali metallici. Analizzando invece la variazione dell'Energia Specifica Assorbita (figura 5) della forza massima e media in funzione della velocità, osserviamo che non vi è una dipendenza dalla velocità di impatto. Il grosso scostamento dei dati nelle due geometrie è dovuto, come già accennato, a differenti caratteristiche del materiale: probabilmente i provini tipo 2 non appartengono alla produzione Aero Strip come invece ci è stato dichiarato.

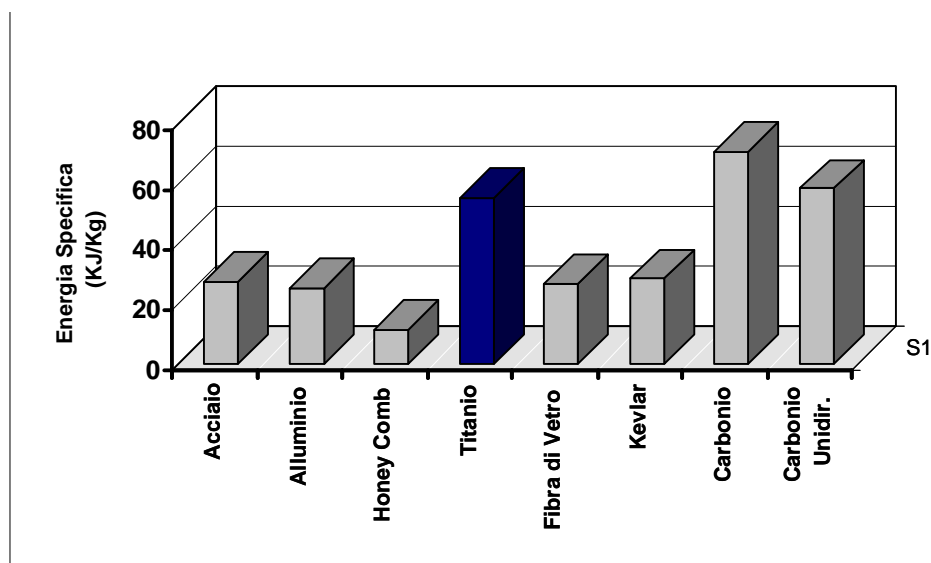


Figura 4: Confronto dell'Energia Specifica Assorbita dei materiali

Altro parametro molto importante è il Load Uniformity Ratio, definito come il rapporto tra la forza massima e la media agenti nell'impatto.

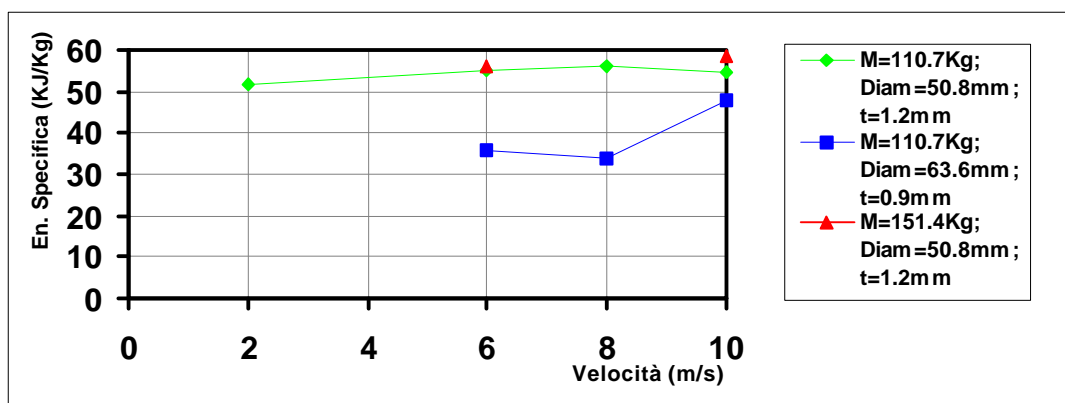


Figura 5: Energia Specifica - Velocità

Alti valori di L.U.R. corrispondono ad elevati gradienti di decelerazioni e sono quindi da evitare per l'incolumità dei passeggeri. Un'ulteriore considerazione è dedicata al confronto con i risultati della prova statica; si può osservare (figura 3) che l'andamento della curva è praticamente lo stesso del caso dinamico (figura 7, curva a tratto) a parità di deformate. Variano molto poco i valori sia della forza massima, che ha subito un incremento del 3%, che di quella media, che è aumentata del 5%. Queste piccole differenze si ritiene che possano essere attribuite al fenomeno dell'incrudimento dinamico del materiale. Per confermare questa teoria, tuttavia, sarebbe necessario un numero maggiore di prove in modo da escludere la possibilità che si tratti solo di una dispersione dei risultati. statica del materiale, mentre il confronto è stato effettuato con le prove di compressione dinamica.



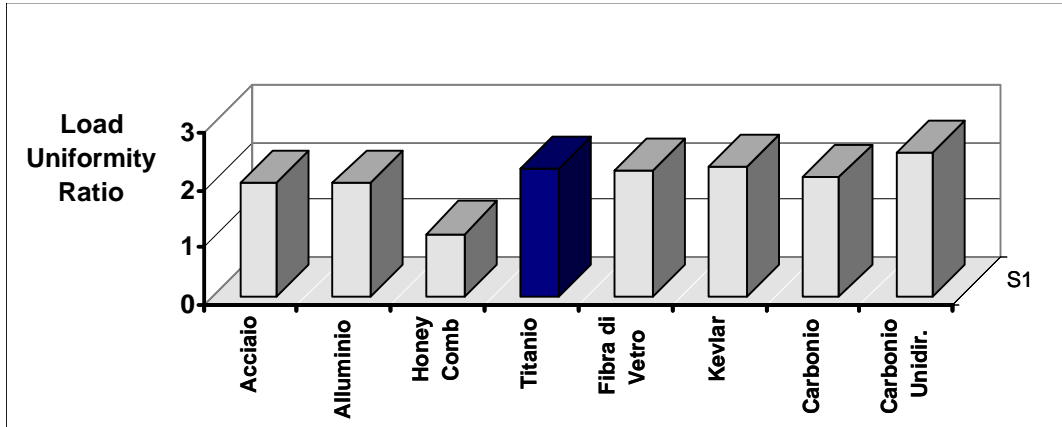


Figura 6: Rapporto tra forza massima e media nella prova di impatto

Il buon accordo di tale confronto (sovrapposizione dei primi tre picchi della curva) ci permette quindi di affermare che le proprietà del TI 50A sono scarsamente influenzate dalla velocità di deformazione, dato confermatoci anche dalle prove descritte in precedenza; inoltre la sovrapposizione del primo picco è indice di una corretta caratterizzazione del materiale. La non perfetta sovrapposizione dei picchi successivi è dovuta ad una mesh non del tutto adeguata che non è riuscita a rappresentare con ottima approssimazione la collocazione spaziale delle pieghe successive alla prima.

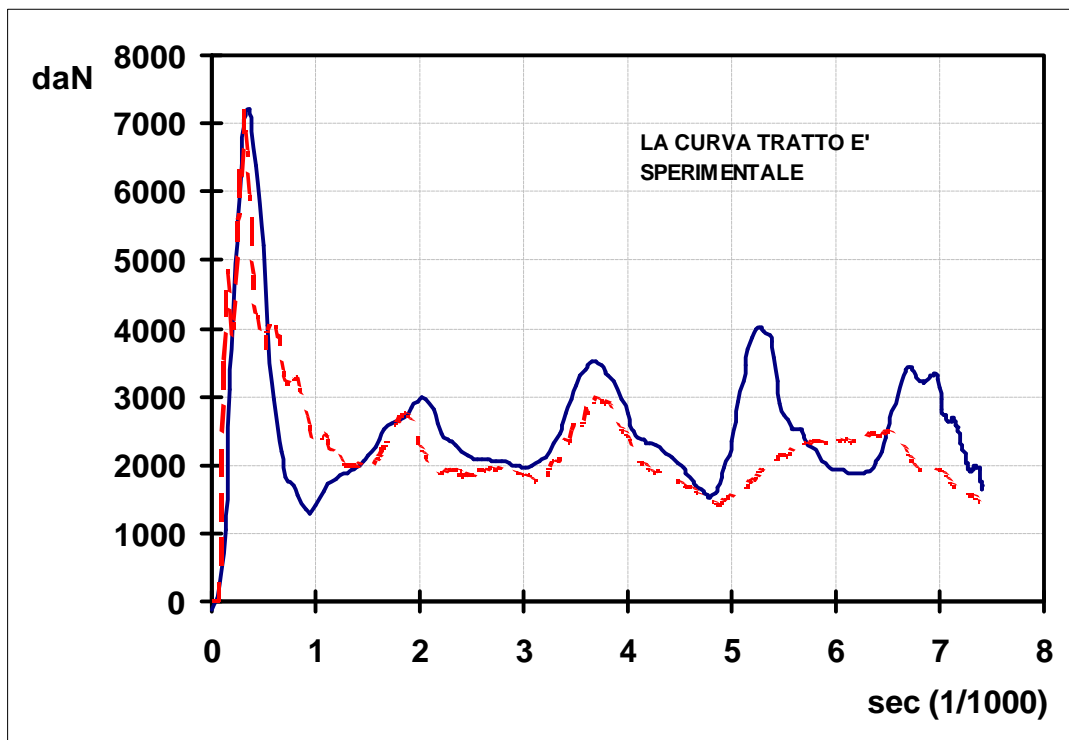


Figura 7: Confronto tra la curva sperimentale e numerica

## CONCLUSIONI

Partiamo dall'analisi delle prove di caratterizzazione del materiale. I risultati della analisi della composizione chimica ci fanno vedere che il materiale testato è ampiamente entro le norme ASTM. L'esame metallografico ha messo in evidenza una struttura del metallo

non troppo alterata dalle lavorazioni subite e dalla saldatura ed inoltre la zona termicamente alterata dal processo di saldatura ha una estensione limitata indice di una scelta adeguata dei parametri che regolano tale processo. Riprova dell'elevata qualità della saldatura ci è stata anche confermata dai risultati delle prove di durezza lungo la sezione del cordone di saldatura; tali prove hanno anche confermato i risultati, in termini di resistenza a rottura della prova di trazione quasi-statica successivamente effettuata. Più che soddisfacente è anche il risultato dell'elaborazione numerica; ci si può rendere immediatamente conto dei risultati conseguiti confrontando le immagini dell'elaborazione numerica con le fotografie eseguite sui provini proposte nelle pagine finali di questo lavoro (foto 2 e figura 8). Interessante è anche il confronto della curva forza-spostamento sperimentale e numerica tra cui è possibile evidenziare la corretta caratterizzazione eseguita e la scarsa dipendenza dalla velocità di deformazione nel materiale. Importanti risultati si sono anche ottenuti nei valori dell'Energia Assorbita dal TI 50A nell'impatto e nel L.U.R. ottenendo valori paragonabili con i materiali compositi, materiali aventi il miglior comportamento nelle prove di impatto.

### **BIBLIOGRAFIA**

C.D.Lundin, C.Y.P.Qiao - "Tubing welding cracking test" - 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on heat-resistant materials, Tennessee, 1995.

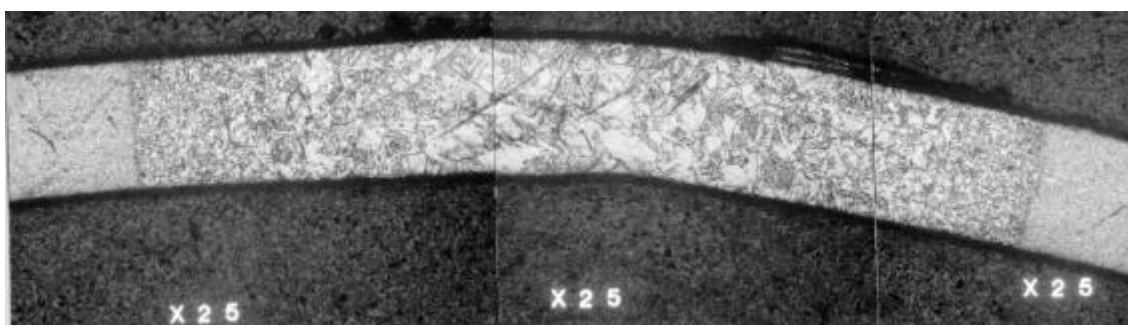
AA.VV. - "Gas tungsten arc welding: it's built to handle titanium" - Welding Journal, Nov. 1991.

V.Giavotto - "Crash simulation models and interaction with experiments" - AGARD REPORT N° 737.

G.A.O.Davies - "Crashworthiness: analytical prediction" - AGARD REPORT N° 737, Imperial College of Sc. and Tecn., London.

J.A.Zuchas, T.Nicholas, H.F.Swift - "Impact dynamics" - J. Wiles & sons, N.Y. 1982.

Mendelson - "Plasticity: theory and application" - Mc Graw Hill, 1983.



*Foto 1: Macrografia della saldatura*



Foto 2: Provino tipo 1: Velocità 10 m/s, Massa 110.7 Kg

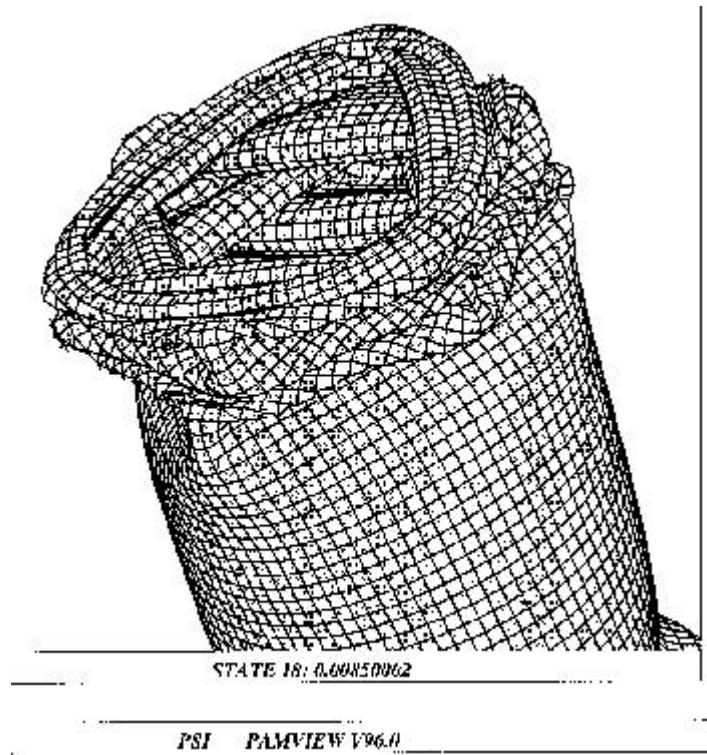


Figura 8: Simulazione numerica