



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
a.a 2023/2024
Sessione di Laurea Ottobre 2024

ANALISI NUMERICA FEM DI IMPATTI SU CARENATURE FERROVIARIE IN METALLO E IN COMPOSITO

Relatore

Enrico Cestino

Relatore Esterno

Paolo Piana (FEV Italia)

Tesista

Romano Valerio

Matricola S302656

Indice

1	Introduzione e classificazione degli impatti	5
1.1	Introduzione ed interesse scientifico degli impatti nel settore aerospaziale . .	5
1.2	Classificazione degli impatti	7
1.2.1	Impatti boundary controlled	7
1.2.2	Impatti wave controlled	7
1.3	Tipologie di impatto	9
1.4	Impatti a bassa velocità e danneggiamento indotto nei laminati in composito	9
1.5	Impatti ad alta velocità	13
1.5.1	Impatti ad alta velocità nei metalli	13
1.5.2	Impatti ad alta velocità e danneggiamento nei laminati in composito	14
1.6	Impatti ballistici e ad ipervelocità	14
1.7	Propagazione delle onde nei materiali	16
2	Definizione analitica degli impatti strutturali	19
2.1	Modello completo	19
2.2	Modello massa-molla	20
2.3	Modello con bilancio energetico	21
2.4	Metodo di Olsson	22
2.4.1	Legge di contatto di Hertz	22
2.4.2	L'equazione differenziale ad un parametro di Olsson	23
2.4.3	Implementazione del metodo analitico tramite Matlab	25
3	Influenza dello strain rate negli impatti ad alta velocità	27
3.1	Effetti dello strain rate sui metalli	27
3.2	Effetti dello strain rate sui compositi	29
3.3	Caratterizzazione di componenti in condizioni di strain rate elevati	30
4	Il fenomeno del ballast flight su treni ad alta velocità	32
4.1	Introduzione del ballast flight	32
4.2	Principali fattori di influenza del ballast flight	33
4.3	Introduzione alla norma NF F07-101	36

5	Test sperimentale di impatto su carenatura	38
5.1	Test da impatto con cannone a gas	38
5.2	Test sperimentale secondo norma NF F07-101	39
5.3	Setup sperimentale nel laboratorio di Production Group	40
5.4	Esecuzione della prova	44
5.5	Risultati dei test	45
6	Modellazione FEM della carenatura	56
6.1	Solutore agli elementi finiti esplicito Altair Radioss	56
6.1.1	Breve introduzione al software Radioss	56
6.1.2	Funzioni del software e nozioni teoriche di interesse	58
6.2	Modellazione piastre e proiettili	66
6.3	Modellazione del provino in alluminio	73
6.3.1	Definizione di proprietà, materiali e contatti del test con provino in alluminio	73
6.3.2	Risultati numerici del test con provino in alluminio	82
6.4	Modellazione numerica del test con provino in composito	84
6.4.1	Setup del modello in composito	84
6.4.2	Risultati dei test numerici con provini in composito	90
7	Riproduzione del modello analitico di Olsson	101
7.1	Implementazione del modello e possibili limiti applicativi	101
7.2	Risultati del modello	102
7.2.1	Modello metallico	102
7.2.2	Modello in composito	103
8	Confronto risultati	105
8.1	Confronto tra prova sperimentale e numerica su provino in alluminio	105
8.2	Confronto tra prova sperimentale e numerica su provini in composito	107
8.3	Confronti tra forze di contatto numeriche e metodo analitico	111
9	Conclusioni e sviluppi futuri	112

Abstract

L'obiettivo di questa tesi, realizzata in collaborazione con Fev Italia e con Production Group è quello di correlare numericamente, tramite modello agli elementi finiti, l'impatto di un proiettile ad alta velocità su una carenatura ferroviaria.

Per effettuare ciò, verranno analizzati i risultati di una campagna di test sperimentali le cui informazioni verranno utilizzate per correlare numericamente i risultati tramite un modello FEM ed utilizzando il software agli elementi finiti esplicito RADIOSS. Il test sperimentale che verrà effettuato ha lo scopo di simulare l'impatto di detriti e i loro effetti su una carenatura ferroviaria durante la sua vita utile di servizio.

Il riferimento sperimentale consiste in una serie di impatti a diverse velocità in cui il proiettile viene sparato tramite un cannone ad aria compressa al fine di verificare l'integrità del provino a determinati livelli energetici, i quali sono definiti da una norma specifica. La verifica consiste in una valutazione del danno tramite ispezione visiva e dei parametri di sparo, ovvero velocità del proiettile ed energia cinetica necessari per la successiva correlazione con il modello FEM.

Per il modello FEM sono stati realizzati un provino in alluminio ed un provino in composito con lamine in fibra di carbonio e di vetro, costituiti da una piastra rinforzata con degli elementi di supporto aggiuntivi, incastrata ai lati ed inclinata di circa 60 gradi rispetto all'orizzontale. Sia i proiettili che i provini sono modellati con elementi 2D, i primi sono poi considerati dei corpi rigidi mentre i pannelli target sono associati rispettivamente alla lega di alluminio simulata tramite il modello Johnson-Cook nel provino metallico mentre nel provino in materiale composito è applicato un modello Tsai-Wu modificato (formulazione CRASURV), che permette di associare al materiale un comportamento elastoplastico e di considerare gli effetti dovuti alla velocità di deformazione (non considerati in questo lavoro di tesi) tipici della rottura di questi materiali nei fenomeni ad alta velocità.

Il lavoro di tesi ha anche investigato i possibili metodi analitici che potessero essere impiegati al fine di ottenere una stima della forza di contatto generata. Si è investigato il metodo di Olsson, adatto per stimare forze di contatto e tempo di contatto per impatti su laminati a bassi rapporti di massa impattore/corpo impattato. Questo metodo analitico è stato implementato in uno script MATLAB al fine di poterne studiare l'applicazione per lo scenario investigato.

Una volta sviluppati i modelli numerici e quelli analitici, i risultati tra questi e il setup sperimentale sono stati comparati per verificarne la correlazione. Si conclude il tutto con una breve panoramica su futuri sviluppi riguardanti questo argomento.

Capitolo 1

Introduzione e classificazione degli impatti

1.1 Introduzione ed interesse scientifico degli impatti nel settore aerospaziale

Gli impatti sono un particolare caso di dinamica delle strutture in cui si tiene conto dell'azione esterna di un impattore che, colpendo la struttura, ne provoca una reazione estremamente dipendente dal tipo di materiale, dalla forma del corpo impattante e del corpo impattato, dall'energia cinetica, dalla massa e dalla velocità dell'oggetto.

Si tratta quindi di eventi altamente complessi e difficili da rappresentare matematicamente: ogni piccola variazione dei singoli contributi che definiscono l'impatto porta ad effetti finali sulla struttura completamente diversi per ogni caso.

L'impatto è un fenomeno di elevata importanza nel settore aerospaziale e dei trasporti. Per esempio, in campo aeronautico, sono riconducibili a casi d'impatto i fenomeni come bird strike (impatti con tra velivolo e volatili) ed hail strike (ovvero impatto con pezzi di ghiaccio derivanti dall'umidità atmosferica), nonchè la caduta di utensili in fase di manutenzione.

In campo spaziale, invece, sono molto frequenti casi di impatto con detriti spaziali e meteoriti.

La presenza di questi fenomeni rende quindi indispensabile l'introduzione di una caratterizzazione dinamica dei componenti in fase di progettazione, sia con lo scopo di tenere conto della capacità della struttura di sopravvivere all'impatto, sia di quantificare il possibile danneggiamento a cui essa viene sottoposta, specialmente se il materiale utilizzato per la struttura è un materiale composito.

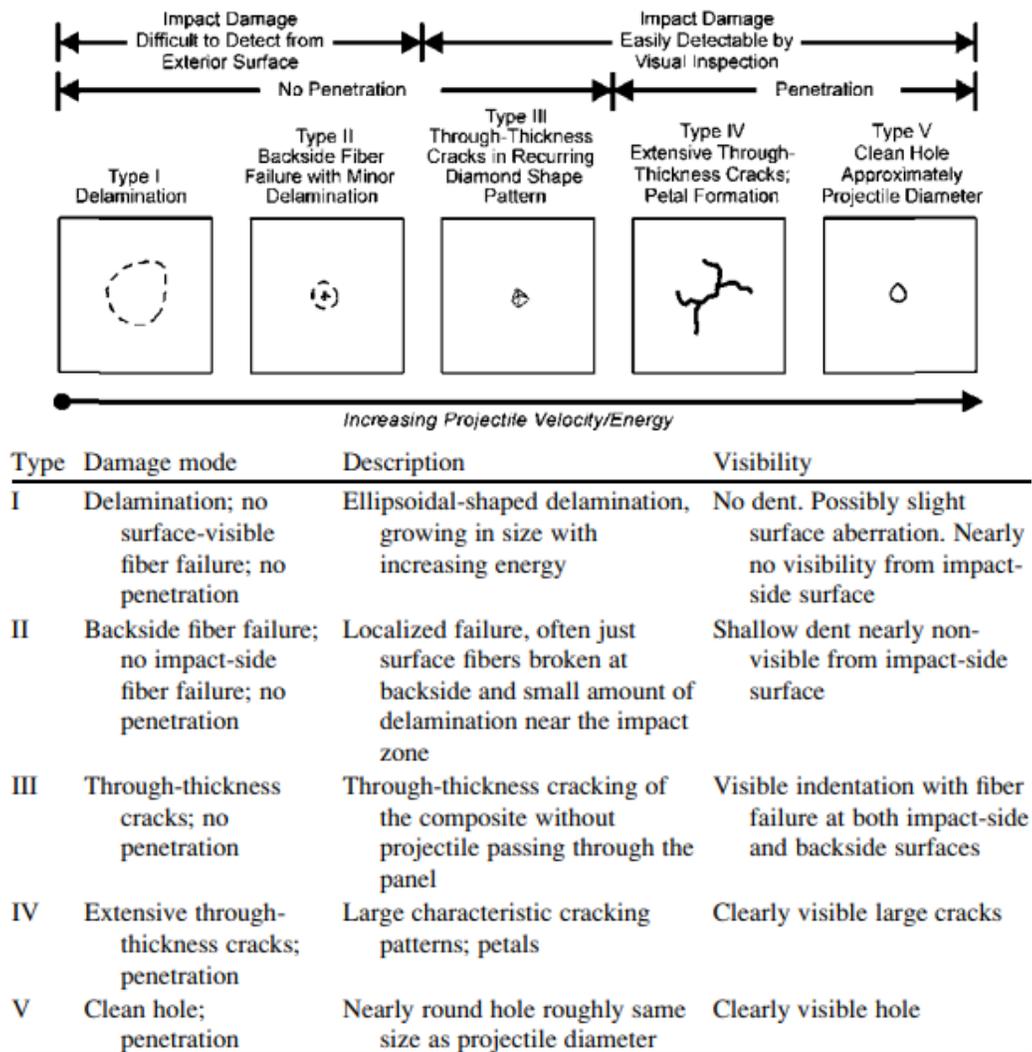


Figura 1.1: Classificazione degli hail strikes (impatti con ghiaccio) su strutture aeronautiche in composito [1]

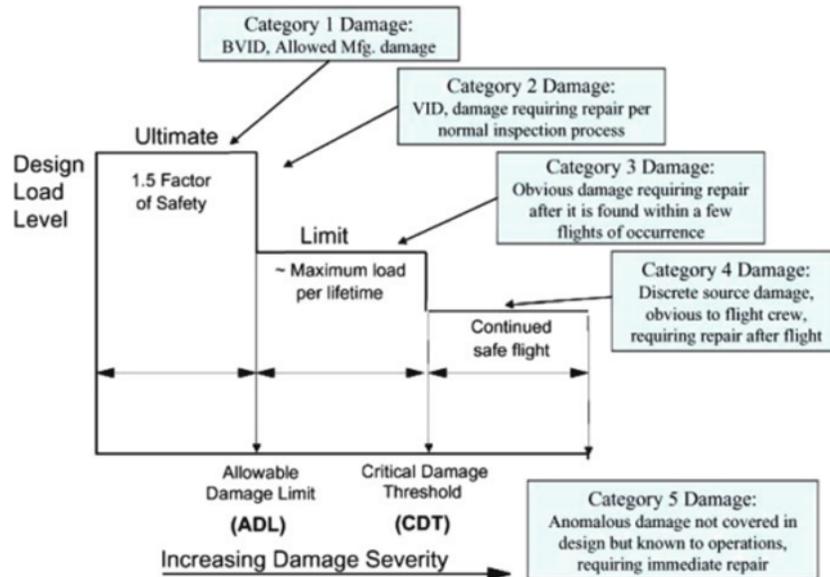


Figura 1.2: Criteri di valutazione del danno su velivoli secondo norme FAA [2]

1.2 Classificazione degli impatti

Gli impatti possono essere classificati principalmente in due modi : impatti boundary controlled ed impatti wave-controlled [3].

1.2.1 Impatti boundary controlled

Gli impatti boundary controlled vedono principalmente un corpo impattante avente massa paragonabile a quelle della struttura impattata e una propagazione delle onde generate dall'impatto nel materiale tale da raggiungere i limiti della struttura e rimbalzare indietro, ottenendo quindi una forte dipendenza del fenomeno dalle condizioni al contorno della struttura. L'approccio seguito in questo tipo di impatti è uno quasi-statico ed è generalmente associato ad impatti a basse velocità e con masse coinvolte importanti.

1.2.2 Impatti wave controlled

Gli impatti wave-controlled, invece, vedono masse dell'impattore molto ridotte rispetto al corpo impattato: si ottiene così una risposta della struttura molto rapida e localizzata

nel punto di impatto; le onde generate non hanno il tempo di raggiungere i bordi della struttura, ottenendo quindi una risposta sostanzialmente indipendente dalle condizioni al contorno.

Molto spesso questi tipi di impatti avvengono ad alte velocità, dove la sollecitazione causata dall'impatto si propaga molto più rapidamente rispetto alle onde caratteristiche del materiale.

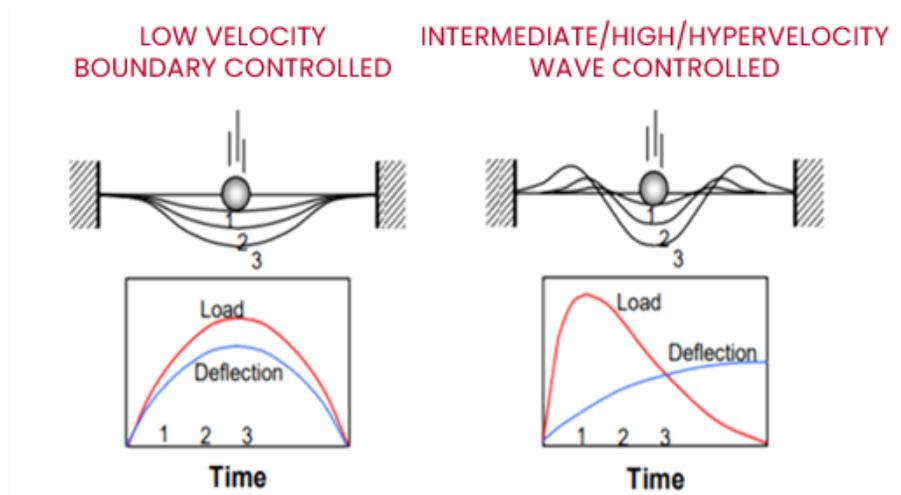


Figura 1.3: Schematizzazione impatto wave controlled e impatto boundary controlled [4]

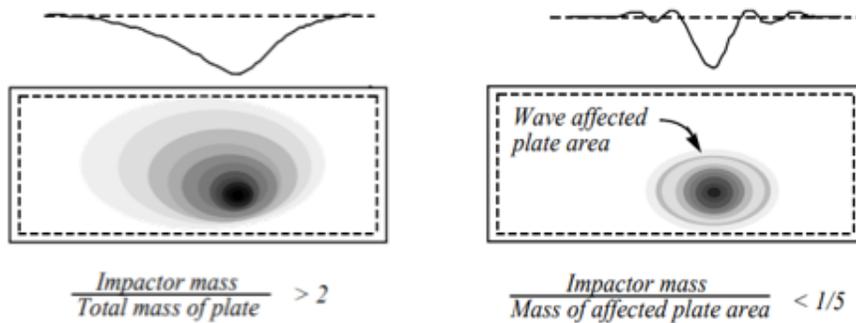


Figura 1.4: Rapporti di masse caratteristici per impatti wave controlled ed impatti boundary controlled [5]

1.3 Tipologie di impatto

Per quanto riguarda le tipologie di impatto, si possono avere impatti a basse velocità ed impatti ad alta velocità, dove quest'ultima tipologia presenta più sottocasi definiti all'aumentare della velocità di impatto (velocità intermedia, alta velocità, impatti balistici ed impatti ad ipervelocità).

Inoltre, il tipo di materiale soggetto a impatto modifica in maniera sostanziale gli effetti del fenomeno e la sua trattazione.

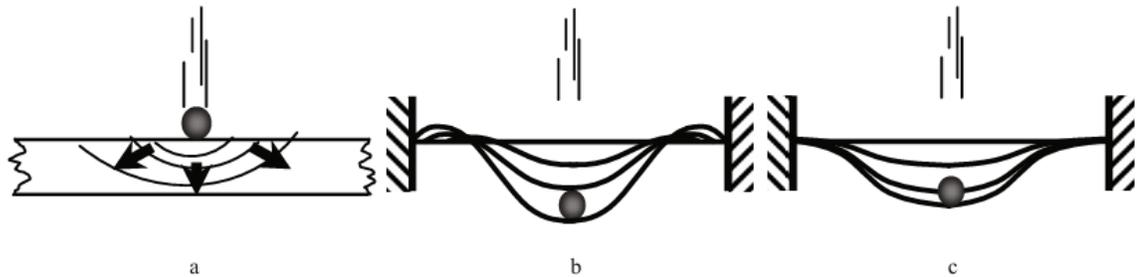


Figura 1.5: comportamento della struttura ad a) impatto balistico b) impatto a velocità intermedia c) impatto a bassa velocità [6]

1.4 Impatti a bassa velocità e danneggiamento indotto nei laminati in composito

Focalizzandosi unicamente sugli impatti su laminati in composito, un impatto a bassa velocità vede come requisito fondamentale una di queste condizioni [7]:

- $M_i/M_p \leq 0.2$ (secondo Olsson)
- $V \leq 0.01 Km/s$ (secondo Cantwell e Morton)
- $V \leq 0.1 Km/s$ (secondo Abrate)

Dove V ed M_i sono rispettivamente velocità e massa del corpo impattante ed M_p è la massa del corpo impattato. In queste condizioni di massa e velocità, le onde flessionali e di taglio generate nel materiale sono molto più veloci di quelle generate dall'impatto, portando ad una valutazione del fenomeno con approccio quasistatico.

Alcuni casi di carico tipici di questo tipo di impatti possono essere le cadute di utensili durante montaggio o testing della struttura.

Forma di provino e corpo impattato possono modificare anche in maniera importante gli

effetti del fenomeno, in particolare sull'innesco del danneggiamento.

Per esempio, corpi impattanti aventi punta sferica oppure conica possono produrre aree di impatto e effetti nel danneggiamento molto differenti, a parità di energia cinetica e velocità.

Svariate proprietà del composito influiscono sugli effetti di questo tipo di impatto. In particolare, prendendo riferimento da [7] e [8]:

- Il modulo E_2 influisce principalmente sulla rigidità di contatto e l'area di impatto.
- Il rapporto dei moduli E_1/E_2 tra due lamine sovrapposte definisce l'intensità delle forze interlaminari derivate da impatto e quindi la facilità della delaminazione. Lamine orientate consecutivamente nello stesso modo riducono il rischio di delaminazione.
- Le proprietà meccaniche della matrice sono molto importanti negli impatti a basse velocità ed energie. A velocità più elevate, le proprietà delle fibre e della sequenza di laminazione, poco influenti a basse velocità, diventano anch'esse importanti.
- Un laminato con fibre intrecciate o configurazioni particolari vede in genere migliori proprietà ad impatto rispetto a laminati unidirezionali poiché presentano migliori caratteristiche lungo lo spessore. Inoltre, la presenza di imperfezioni durante la produzione del laminato può influire negativamente, oltre che alle proprietà meccaniche classiche, anche sulle sue proprietà ad impatto.
- Allungamento a rottura massimo di fibra o matrice elevati migliorano le proprietà ad impatto: fibre meno rigide ma capaci di deformarsi in maniera maggiore risultano essere più efficaci in questo tipo di impatti. Il diametro delle fibre inoltre determina la quantità di energia assorbita durante l'impatto: maggiore il diametro, migliore la rigidità ma minore l'energia assorbibile.
- Il carico massimo nella zona di impatto dipende dalla sequenza di laminazione. Inoltre, laminati più rigidi vedono tempi di contatto più bassi rispetto a laminati meno rigidi, a parità di configurazione.

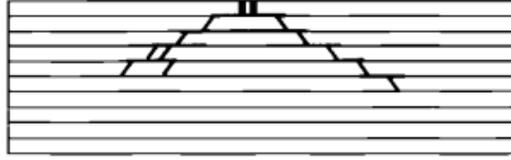


Figura 1.6: Propagazione cricche nella matrice in laminato spesso [8]

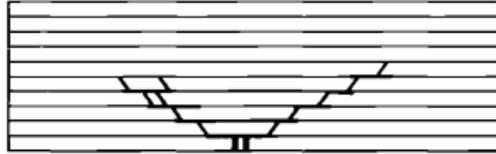


Figura 1.7: Propagazione cricche nella matrice in laminato sottile [8]

Il principale modo di rottura per impatti a bassa velocità vede delaminazioni e cricche principalmente localizzate nelle matrici. In particolare, le delaminazioni hanno una forma simile a quella illustrata in figura 1.8.

Da notare che le delaminazioni seguono la direzione della lamina direttamente sottostante a quella considerata, e che si ottengono solo se gli orientamenti delle due lamine considerate sono differenti.

La tendenza alla delaminazione nel laminato composito a queste velocità può essere definita dal cosiddetto 'stiffness mismatch', ovvero per via di differenze di rigidità tra le lamine che possono per esempio essere causate, a parità di materiale, da un diverso orientamento tra le due lamine [9].

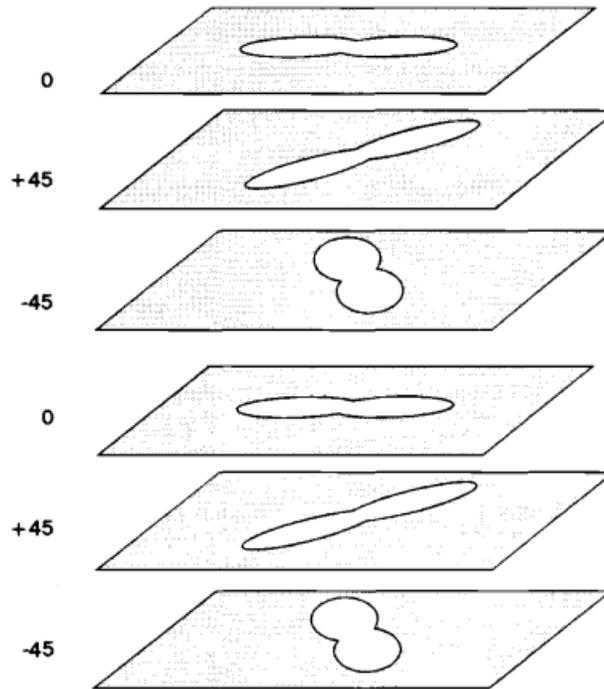


Figura 1.8: delaminazioni da impatto nei compositi [8]

La presenza o meno della delaminazione può essere definita tramite una serie di fattori fortemente dipendenti da materiale, corpo impattante, sequenza di laminazione.

Per un valore sufficiente di forza generata o di energia di impatto, le cricche nella matrice, di per sé poco rilevanti, causano la delaminazione del composito e la relativa riduzione o perdita delle proprietà meccaniche.

Le cricche possono essere suddivise in cricche causate da superamento dello stress in direzione 1 o 2 del laminato o cricche causate da taglio .

L'origine delle cricche e la loro propagazione invece dipende principalmente dallo spessore del laminato e dipende principalmente dalla propagazione delle onde nel laminato: per laminati abbastanza spessi si ha propagazione principalmente dall'alto verso il basso delle cricche , mentre per laminati sottili il fenomeno è inverso.

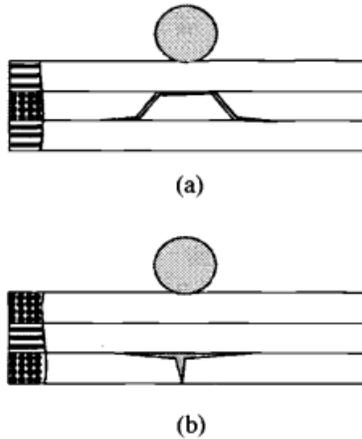


Figura 1.9: cricca da stress in direzione 1 o 2 (a) e cricca da taglio (b) [8]

1.5 Impatti ad alta velocità

Negli impatti ad alta velocità, la dinamica dell'impatto diventa radicalmente diversa rispetto a quella negli impatti a bassa velocità. Fattori poco influenti nei casi a bassa velocità, come per esempio la sequenza di laminazione nei compositi, diventano estremamente più importanti. Inoltre, aumentano le dipendenze da fattori come temperatura e ratei di deformazione e gli andamenti delle proprietà principali di materiali e strutture diventano più difficili da riprodurre poichè diventano sempre meno lineari.

Per via degli effetti molto differenti in base al tipo di materiale, è utile effettuare una diversificazione degli impatti ad alta velocità su metalli e quelli sui compositi.

1.5.1 Impatti ad alta velocità nei metalli

Riportando quanto descritto in [10], quando strutture metalliche vedono impatti ad alta velocità, si hanno andamenti di stress e deformazioni in particolare nella regione plastica più complessi e più difficili da prevedere: questi sono dovuti a fenomeni micromeccanici in cui le elevate velocità di deformazione portano a comportamenti dei singoli grani e delle loro interazioni diverse rispetto ai casi statici.

La struttura metallica può andare incontro tra gli altri a fenomeni di spallamento, plugging ed adiabatic shearing che possono causare failure del materiale o modificarne localmente le proprietà in maniera irreversibile. Il comportamento del materiale dipende principalmente dalle sue proprietà (modulo elastico, allungamento a rottura e plastic strain) e da velocità e intensità dell'impatto.

Il meccanismo di rottura 'fragile' accade quando, in determinate condizioni di temperatura, strain rate e campo di stress triassiale. Se le condizioni lo permettono, la regione plastica del materiale viene inibita ed il metallo subisce una rottura simile a quella di materiali ceramici o compositi. Se invece il materiale ha subito deformazione plastica importante, si avrà rottura duttile o 'shear fracture'.

Si possono avere entrambi i comportamenti all'interno dello stesso materiale, infatti vi possono essere delle temperature precise oltre la quale si passa da un comportamento all'altro (transizione da fragile a duttile). I fenomeni dipendono inoltre dalla microstruttura e dalla rigidità del materiale: materiali con struttura BCC vedranno transizione duttile e variazione importante nella tensione di snervamento variando temperatura e strain rate, mentre metalli con altre strutture saranno molto meno influenzati da queste variabili.

1.5.2 Impatti ad alta velocità e danneggiamento nei laminati in composito

Per quanto riguarda i compositi, il loro comportamento ad alte velocità è molto diverso da quello a basse velocità:

All'aumentare della velocità, si passa da un modo di rottura del composito dominato da rottura della matrice ad uno dominato da debonding interlaminare, per arrivare infine ad uno dominato da rottura della fibra e perforazione della lamina.

Diversamente dai metalli, in cui l'energia dell'impatto veniva assorbita principalmente tramite plasticizzazione del materiale, i compositi dissipano energia tramite la rottura di matrice e, in maniera principale alle alte velocità, fibre. Maggiore la tenacità e la resilienza delle fibre, maggiore l'assorbimento energetico in fase di impatto. Altri meccanismi di assorbimento dell'energia in condizioni di alta velocità, molti dei quali analoghi ai corrispettivi metallici, possono essere:

- shear plugging
- spallamenti
- debonding fibre
- dissipazione di energia per attrito tra laminato e corpo impattante

1.6 Impatti ballistici e ad ipervelocità

Gli ultimi tipi di impatti qui classificati sono quelli ballistici e quelli ad ipervelocità: di seguito ne verrà fornito solo un piccolo cenno, poichè sono tipologie di impatto limitate a ristretti campi applicativi e poco pertinenti al lavoro di tesi in seguito descritto e sviluppato. Tuttavia, una breve introduzione a questi due tipi di impatti è utile per concludere la classificazione dei tipi principali di impatti sulle strutture.

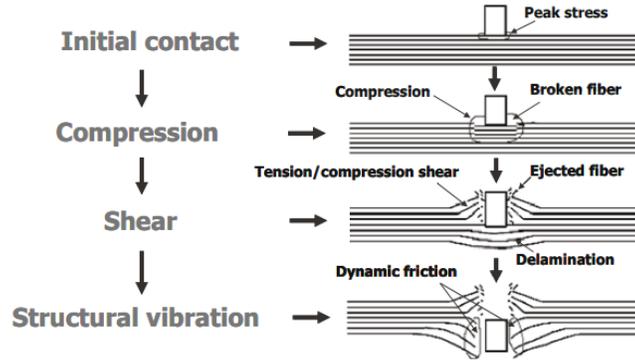


Figura 1.10: Sequenza di perforazione di una lamina in composito durante impatto ad alta velocità [11]

Impatti ballistici

Se le velocità sono sufficientemente elevate, si passa da un campo ad alta velocità ad un caso più specifico detto ballistic. In questo caso, le elevate velocità portano a quasi certa perforazione del materiale da parte del corpo impattato. Questo tipo di impatto si focalizza principalmente su esplosioni e impatti con proiettili ad elevate velocità. Come descritto in [12] per materiali metallici, ma applicabile in maniera del tutto analoga anche ai materiali compositi, il passaggio tra le due tipologie si può definire, per dato materiale e caratteristiche strutturali, tramite una velocità minima oltre la quale si ha completa perforazione del materiale: questa viene indicata come velocità ballistica V_B . Viene valutata principalmente a partire dalla velocità residua del proiettile dopo l'impatto.

Un'altra velocità di riferimento, detta V_{50} , viene invece presa come riferimento per la caratterizzazione del laminato ed è definita in maniera analoga alla V_B , con perforazione del laminato che avviene però nel 50% dei casi e non in tutti i casi. Impatti oltre questa velocità indicata vedono l'influenza determinante di failure dovute a meccanismi simili a quelle di rottura a fatica, con l'introduzione quindi delle tenacità a frattura del materiale. Una piccola introduzione a questo tipo di impatti è anche presente in [8]

Impatti ad ipervelocità

Se le velocità continuano ad aumentare, si arriva ai cosiddetti impatti ad ipervelocità. Sono quasi esclusivamente diffusi in ambito spaziale, per esempio nella valutazione di impatti con detriti spaziali e meteoriti.

Si parla di impatto ad ipervelocità quando la velocità del proiettile è superiore a quella della velocità di propagazione del suono all'interno del materiale. Sono impatti che vedono quindi velocità dell'ordine di decine di km al secondo e che vedono completa rottura e fusione del proiettile al momento dell'urto. Il fenomeno vede quindi la formazione di

crateri di dimensioni proporzionali al diametro del proiettile e danneggiamenti sia interni che esterni consistenti sul corpo impattato. [13]



Figura 1.11: Shielding di un velivolo spaziale dopo impatto ad iper velocità [13]

1.7 Propagazione delle onde nei materiali

La distribuzione e la variazione di stress e deformazioni all'interno di una struttura o un corpo deformabile dipende dalla propagazione del disturbo o sollecitazione sotto forma di onde. Queste onde si propagano nella struttura con velocità che dipendono principalmente da modulo elastico e densità del materiale, disturbando l'equilibrio meccanico presente prima della sollecitazione.

I tipi di onde che si propagano nel materiale sono suddivisibili in tre categorie: onde elastiche, onde plastiche e onde d'urto. Di seguito, viene riportata una breve introduzione a questi tipi di onde, prendendo come riferimento quanto descritto da [14].

Onde elastiche

Le onde elastiche si ottengono quando gli stress generati sono inferiori a quelli di snervamento del materiale. Queste onde possono essere di vari tipi, in base a come e dove si propagano. I tipi principali di onde elastiche che interessano le strutture sono:

- **Onde longitudinali**

Nelle onde longitudinali, la velocità delle particelle in movimento del corpo è parallela alla direzione di percorrenza dell'onda. Queste onde hanno velocità di propagazione pari a $c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Queste onde possono essere di tensione o di compressione, in base

alla direzione delle velocità delle particelle e di propagazione dell'onda (compressione nella stessa direzione, tensione in verso opposto). Sono anche dette 'Onde P' o onde irrotazionali. Modificano il volume del corpo attraversato.

- **Onde trasversali**

Nelle onde trasversali, la velocità delle particelle è perpendicolare a quella di propagazione dell'onda. Causano variazioni nella forma del corpo in cui si propagano, mantenendone però invariato il volume. Hanno velocità di propagazione pari a $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$. Sono anche dette 'onde S' o onde distorsionali.

- **Onde superficiali o onde di Rayleigh**

Sono serie di onde che si propagano avanti e indietro in tutte le direzioni in maniera ellittica lungo la superficie del corpo. Il nome deriva dalla loro caratteristica bassa penetrazione superficiale, infatti perdono rapidamente energia e velocità attraverso lo spessore del corpo.

- **Onde flessionali** Sono onde responsabili della propagazione delle componenti di stress e deformazione flessionali in travi e piastre. La loro velocità di propagazione è ricavabile risolvendo la caratteristica equazione dinamica del modello.

Onde plastiche

Le onde plastiche si ottengono quando il disturbo provoca stress e deformazioni oltre i limiti elastici del materiale: si ottiene quindi un'onda che si propaga inizialmente a velocità diverse rispetto alla controparte elastica e con valore non costante ma dipendente da tensione o deformazione. Il valore della velocità quindi può aumentare o diminuire all'aumentare della sollecitazione del materiale o della struttura. La velocità di propagazione è esprimibile come:

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\epsilon}} \quad (1.1)$$

Onde d'urto

Prendendo questa volta in considerazione quanto descritto in [15] (si invita a consultare questo testo per ottenere informazioni più dettagliate in particolare sugli sviluppi analitici non inseriti poichè superflui ai fini di questa tesi) al di là della regione elastica, si ottengono, come descritto in precedenza per le onde plastiche, onde a velocità non più costante ma dipendente da una serie di fattori come stress, deformazione, densità e pressione. Se le condizioni permettono quindi alla velocità dell'onda di aumentare a sufficienza, si ottiene un'onda con fronte ripido che porta a discontinuità nel materiale, in particolare tra materiale in cui si sta propagando la sollecitazione ed il materiale ancora indisturbato, causando un'onda d'urto. La condizione di formazione di quest'onda risulta essere $c_p > c_l$. L'onda

d'urto causa discontinuità di stress, densità, velocità ed energia interna e si propaga secondo una sua velocità caratteristica. Per poterne descrivere le caratteristiche per un dato materiale, è possibile ricavare curve sperimentali sulla base di due delle componenti costitutive dell'equazione caratteristica dell'onda, ottenibili tramite appositi test sperimentali (per esempio curve P-U, dove p è la pressione e U è la velocità dell'onda d'urto generata).

Capitolo 2

Definizione analitica degli impatti strutturali

La modellazione del problema di impatto come un contatto tra due solidi, seppur teoricamente valida, non è sufficiente poichè non tiene conto di eventuali deformazioni e danneggiamenti che occorrono nella struttura.

Per questo motivo, formulazioni variazionali e processi numerici sono molto spesso indispensabili per ottenere riscontri significativi con la realtà in questo tipo di eventi.

Soluzioni esatte, seppur disponibili, sono estremamente limitate nelle condizioni e nei casi di applicazione. Per questo motivo, sono state sviluppate in letteratura un grande numero di formulazioni analitiche che, al costo di precisione nel risultato o informazioni, permettono di ottenere risultati significativi in maniera più semplice e rapida. Di seguito sono riportati alcuni approcci analitici con modelli semplificativi riportati in [8][16] e in [4] [5]. Va sottolineato che i modelli matematici qui riportati sono solo alcuni tra i più semplici tra quelli disponibili in letteratura e che la scelta principale di un modello rispetto ad un altro dipende principalmente dalle caratteristiche fisiche del caso da analizzare e dalle condizioni al contorno presenti.

2.1 Modello completo

La risoluzione di un problema dinamico di impatto in forma generale vede la presenza di due set di equazioni fondamentali, ovvero l'equazione dinamica caratteristica della struttura e il contributo del proiettile, così definiti:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2.1)$$

All'interno di questo sistema vanno risolte quindi $N+1$ equazioni differenziali, di cui N relative al modello matematico della struttura implementato ed una relativa al moto del

proiettile. La risoluzione richiede ovviamente metodi di approssimazione e processi iterativi che devono portare ad una convergenza tra legge di contatto implementata ed equazioni del moto: si ottiene così una formulazione dispendiosa dal punto di vista computazionale, che permette però di ottenere soluzioni del problema di impatto accurate. L'accuratezza dipende anche dal modello strutturale utilizzato e dal numero di gradi di libertà che esso considera, nonché dalla quantità di informazioni che si desidera ottenere riguardo al fenomeno.

2.2 Modello massa-molla

Il modello massa-molla è definito dalle seguenti equazioni del moto ottenute dalla valutazione tramite diagramma di corpo libero e di seguito riportato come descritto in [8]:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + P &= 0 \\ m\ddot{(x_2)} + K_{bs}x_2 + K_mx_2^3 - P &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

dove K_{bs} rappresenta la rigidità lineare della struttura, M la massa del proiettile, m la massa della struttura e P è la forza di contatto che dipende dall'indentazione, ovvero la distanza relativa tra il proiettile e l'estremità superiore del corpo impattato. In assenza di nonlinearità geometriche e indentazione trascurabile, il sistema è esprimibile tramite un'unica condizione [8] :

$$M\ddot{x} + K_{bs}x = 0 \quad (2.3)$$

Che ha soluzione del tipo:

$$x = A\sin\omega t + B\cos\omega t \quad (2.4)$$

dove

$$\omega^2 = \frac{K_{bs}}{M}$$

L'equazione ha condizioni al contorno [8]:

$$x_1\ddot{(0)} = V \quad x_1(0) = 0 = x_2(0) = 0 \quad (2.5)$$

e porta ad ottenere:

$$x = \frac{V}{\omega}\sin\omega t \quad (2.6)$$

Si ottengono così informazioni su tempo di contatto e forza di contatto pari a [8]:

$$\begin{aligned} P &= K_{bs}x = V(K_{bs}M)^{\frac{1}{2}}\sin\omega t \\ T_c &= \pi(M/K_{bs})^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Si può notare che il modello vede forza di contatto proporzionale alla velocità di impatto V e alla rigidità della struttura.

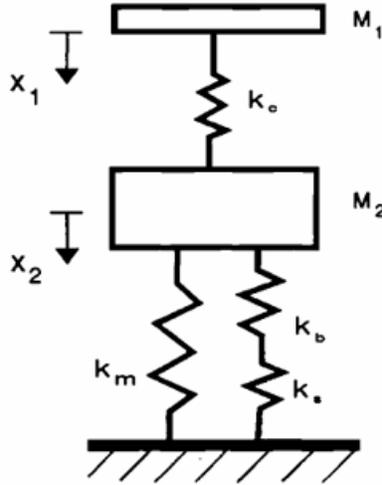


Figura 2.1: modello massa-molla [8]

2.3 Modello con bilancio energetico

Un'alternativa molto utilizzata è quella del bilancio energetico, in cui si valuta il bilancio energetico tra l'energia del proiettile e quella utilizzata per deformare la struttura secondo un approccio quasistatico.

Il bilancio energetico è il seguente:

$$\frac{1}{2}MV^2 = E_b + E_s + E_m + E_c \quad (2.8)$$

dove:

- E_b è l'energia derivata dalla deformazione a flessione
- E_s è l'energia derivata dalla deformazione a taglio
- E_m è l'energia derivata dalla deformazione membranale
- E_c è l'energia conservata nella zona di contatto durante l'indentazione

Introducendo le rigidezze lineari a flessione e taglio e membranali e supponendo una legge di contatto tipo Hertz, si ottiene la seguente equazione risolutiva:

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}K_{bs}W_{max}^2 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{K_m}{K_{bs}} W_{max}^2 + \frac{4}{5} \left(\frac{K_{bs}W_{max}}{n} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(1 + \frac{K_m}{K_{bs}} W_{max}^2 \right)^{\frac{5}{3}} \right] \quad (2.9)$$

Dove W_{\max} è lo spostamento massimo della struttura durante l'impatto. Semplificando il tutto trascurando deformazioni locali ed effetti membranali, si ottiene come forza di contatto:

$$F = \left(\frac{5^{3/5}}{4}\right) (M^3 V^6 n^2)^{1/5} \quad (2.10)$$

Considerando invece il bilancio durante un istante generico, separando le variabili e considerando il tempo di contatto come il doppio del tempo necessario a raggiungere la massima indentazione si ottiene l'effettiva durata del contatto:

$$T_c = 3.2145 (M^2 V^{-1} n^{-2})^{1/5} \quad (2.11)$$

2.4 Metodo di Olsson

Questo metodo è utilizzabile principalmente su materiali compositi e consiste in un'unica equazione differenziale ordinaria che permette di ricavare un parametro δ adimensionale da cui è possibile stimare forza di contatto, indentazione e tempo di contatto. Il modello si basa su una legge di contatto tipo Hertz.

2.4.1 Legge di contatto di Hertz

Prendendo come riferimento [8], secondo Hertz, l'indentazione è data da:

$$\delta = w_2 - w_1 \quad (2.12)$$

con forza di contatto F e rigidezza K_c pari a:

$$\begin{aligned} F &= k_c \delta^{3/2} \\ k_c &= \frac{4}{3} E_c \sqrt{R} \end{aligned} \quad (2.13)$$

dove E_c dipende dai moduli elastici di corpo impattato e corpo impattante:

$$1/E_c = 1/E'_1 + 1/E'_2 \quad (2.14)$$

e porta ad ottenere pressione di contatto pari a :

$$p(r) = \frac{3F}{2\pi c^2} \sqrt{1 - r^2/c^2}, \quad 0 \leq r \leq c \quad (2.15)$$

dove:

$$c = \sqrt{R\delta} \quad (2.16)$$

2.4.2 L'equazione differenziale ad un parametro di Olsson

Come descritto da [3], Il modello viene ricavato a partire dalla risposta dinamica di una piastra ortotropica definita tramite modello di Kirchhoff. Questa è esprimibile tramite integrazione nel tempo della sommatoria delle risposte modali [3]:

$$w_1(x, y, t) = \int_0^t F(t) \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{W_{jk}(x, y) W_{jk}(x_0, y_0)}{m\omega_{jk}} \sin[\omega_{jk}(t - \tau)] d\tau \quad (2.17)$$

le autofunzioni normalizzate della piastra sono [3]

$$W_{jk} = \frac{2}{\sqrt{ab}} \cos \frac{j\pi x}{a} \cos \frac{k\pi y}{b} \quad (2.18)$$

Per questo modello, solo le autofunzioni e gli autovalori dispari saranno considerati.

Le onde si propagano con fronti d'onda ellittici: questo porta a supporre $j=k$ da cui [3]

$$a/b = C_{F_x}/C_{F_y} = (D_{11}/D_{22})^{\frac{1}{4}} \quad (2.19)$$

Nel punto di impatto [3]

$$W_{jk}(x_0, y_0) = W_{jk}(0, 0) = 2/\sqrt{ab} \quad (2.20)$$

sostituendo in (2.17) e considerando che la sommatoria è solo riferita per onde con indici dispari

$$w_1(0, 0, t) = \frac{1}{m} \int_0^t F(t) \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{ab\omega_{jk}} \sin[\omega_{jk}(t - \tau)] djdkd\tau [3] \quad (2.21)$$

A partire dalle frequenze W_{jk} della piastra ortotropa [3]

$$w_{jk} = \pi^2 \sqrt{\frac{D_{11}}{m} \left(\frac{j}{a}\right)^4 + \frac{2}{m}(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{j}{a}\right)^2 \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \frac{D_{22}}{m} \left(\frac{k}{b}\right)^4} \quad (2.22)$$

introducendo

$$A = (D_{12} + 2D_{66})/\sqrt{D_{11}D_{22}} \quad (2.23)$$

si ottiene [3]

$$ab\omega_{jk} = 2\pi^2 \sqrt{D^*/m} jk \quad (2.24)$$

dove $D^* = [(A + 1)/2]\sqrt{D_{11}D_{22}}$ sostituendo (2.24) in (2.21) si ottiene :

$$w_1(0, 0, t) = \frac{1}{m} \int_0^t F(t) \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sin \frac{[\beta(t - \tau)jk]}{2\pi^2 \sqrt{D^*/m} jk} djdkd\tau [3] \quad (2.25)$$

con $\beta = 2\pi^2\sqrt{D^*/m/ab}$.

Gli spostamenti w_1 e w_2 di (2.12) sono quindi:

$$\begin{aligned} w_1(0,0,t) &= \frac{1}{8\sqrt{mD^*}} \int_0^t F(\tau) d\tau \\ w_2(t) &= V_0 t - \frac{1}{M} \int_0^t \int_0^\tau F(\tau') d\tau' d\tau [3] \end{aligned} \quad (2.26)$$

con condizioni al contorno $w_2(0) = 0$ e $\dot{w}_2(0) = 0$

Integrando due volte (2.12) si ottiene la seguente equazione differenziale [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{1}{8\sqrt{mD^*}} * \frac{3}{2} K_c \delta^{\frac{1}{2}} \frac{d\delta}{dt} + \frac{K_c}{M} \delta^{\frac{3}{2}} &= 0 \\ \delta(0) &= 0 \\ \delta(0)'' &= V_0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Questa equazione può essere espressa secondo I parametri adimensionali $\bar{\delta}$, \bar{t} e λ [3]

$$\begin{aligned} \frac{d^2\bar{\delta}}{d\bar{t}^2} + \lambda * \frac{3}{2} \bar{\delta}^{\frac{1}{2}} \frac{d\bar{\delta}}{d\bar{t}} + \bar{\delta}^{\frac{3}{2}} &= 0 \\ \bar{\delta}(0) &= 0 \\ \bar{\delta}(0)'' &= 1 \end{aligned} \quad (2.28)$$

con [3]

$$\begin{aligned} T &= [M/(k_c \sqrt{V_0})]^{\frac{2}{5}} \\ \lambda &= \left(\frac{4}{3} E_c\right)^{\frac{2}{5}} R^{\frac{1}{5}} V_0^{\frac{1}{5}} M^{\frac{3}{5}} / (8\sqrt{mD^*}) \end{aligned} \quad (2.29)$$

La risoluzione dell'equazione differenziale porta ad ottenere il parametro $\bar{\delta}(t)$, e varia al variare del parametro λ che dipende da raggio di impatto, rigidità di contatto, massa e velocità del proiettile.

I parametri di forza, pressione di contatto, impulso e spostamento della piastra sono così ottenibili [3]

:

$$\begin{aligned}
F &= \left[\left(\frac{4}{3} \right)^{\frac{2}{5}} (E_c)^{\frac{2}{5}} R^{\frac{1}{5}} (MV_0^2)^{\frac{3}{5}} \right] \bar{\delta}^{\frac{3}{2}} \\
p_0 &= \left[24^{\frac{1}{5}} R^{-\frac{3}{5}} E_c^{\frac{4}{5}} (MV_0^2)^{\frac{1}{5}} \right] \bar{\delta}^{\frac{1}{2}} \\
I &= \int_0^t F(\tau) d\tau = MV_0 * \int_0^{\bar{\tau}} \bar{\delta}^{\frac{3}{2}}(\bar{\tau}) d\bar{\tau} \\
w_1(0, 0, t) &= \frac{MV_0}{8\sqrt{mD^*}} \int_0^{\bar{\tau}} \bar{\delta}^{\frac{3}{2}}(\bar{\tau}) d\bar{\tau}
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Si possono ricavare anche curvatura centrale e stress flessionali [3]

:

$$\begin{aligned}
k_x(0, 0, t) &= \frac{\partial^2 w_1(0, 0, t)}{\partial^2 x} = \frac{F}{8\pi\sqrt{D_{11}D^*}} \left[\ln \left(\frac{RV_0 \bar{\delta}}{4 \bar{t} \sqrt{m}} \sqrt{\frac{m}{D^*}} \right) - 0.4228 \right] \\
\epsilon_x(0, 0, z, t) &= z k_x(0, 0, t) \\
\epsilon_y(0, 0, z, t) &= z k_y(0, 0, t)
\end{aligned} \tag{2.31}$$

2.4.3 Implementazione del metodo analitico tramite Matlab

Il modello appena descritto è stato sviluppato come codice Matlab e utilizzato per l'analisi dei provini delle carenatura in metallo ed in composito descritti in seguito. Il codice Matlab così realizzato effettua i seguenti calcoli:

- calcolo delle matrici di rigidezza del laminato
- calcolo dei parametri dell'equazione in base alle caratteristiche del problema
- risoluzione dell'equazione differenziale tramite ODE
- rappresentazione grafica di forza di contatto, indentazione e tempo di contatto

Per verificarne la correttezza, sono stati analizzati due casi studio affrontati dall'autore in [3] e [4], ottenendo i seguenti risultati:

Piastra	Proiettile
Materiale: T300/934 <u>graphite/epoxy</u>	Materiale: acciaio
Dimensioni: 200x200mm	Forma e massa: Sfera di 12 mm di diametro dal peso di 8.5 g
Condizioni di vincolo: Supportata su 4 lati	Velocità: 3m/s

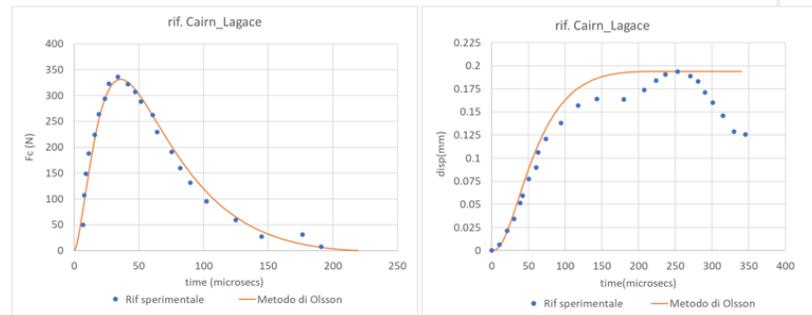


Figura 2.2: Test del modello di Olsson, prova esperimento Cairn-Lagace

Piastra	Proiettile
Materiale: <u>Hexcel</u> HTA/6376C	Materiale: alluminio
Dimensioni: 127x127mm 6.2 mm di spessore	Forma e massa: <u>Impattore</u> a punta sferica di 11 mm di raggio dal peso di 10.2g
Condizioni di vincolo: Incastrata su 4 lati	Velocità: 27.6 m/s

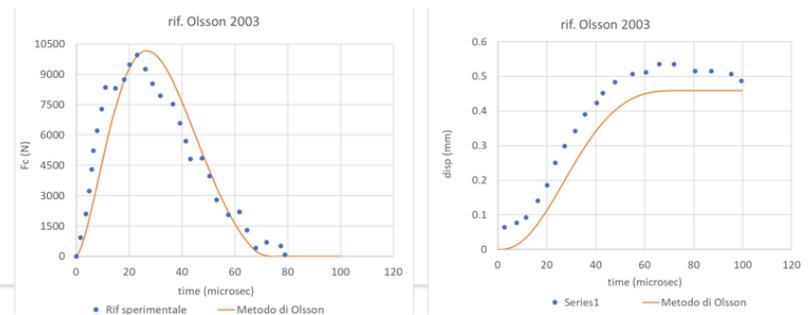


Figura 2.3: Test del modello di Olsson, prova esperimento Olsson

Sulla base di questi risultati, il modello è stato implementato correttamente ed è quindi pronto per essere utilizzato anche nei test sperimentali sulle carenature descritti in seguito.

Capitolo 3

Influenza dello strain rate negli impatti ad alta velocità

Un altro fattore estremamente importante nelle analisi dinamiche di impatti ad alta velocità risiede nell'influenza dello strain rate sulle caratteristiche meccaniche del materiale. Un gran numero di fenomeni a cui le strutture sono sottoposte vedono dei valori di strain rate elevati i cui effetti non sono trascurabili.

Come definito per esempio in [14], lo strain rate è espresso come:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{dL/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3.1)$$

Dove L_0 è la lunghezza iniziale dell'elemento analizzato o del provino di materiale valutato e V è la velocità di deformazione.

Per valori abbastanza elevati di strain rate, si osserva una variazione importante delle proprietà meccaniche dei materiali: ognuna di queste proprietà (stress, strain, moduli) diventa una proprietà in funzione anche dello strain rate in esame.

Per esempio, in queste condizioni, si ha che:

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, t) \quad (3.2)$$

Inoltre, σ e le altre caratteristiche meccaniche possono anche variare in base ad altri fattori come la storia di deformazione o di carico del materiale.

3.1 Effetti dello strain rate sui metalli

Per quanto riguarda i metalli, l'influenza dello strain rate vede principalmente un incremento dei valori di deformazione a rottura e di tensione di snervamento e di rottura che possono anche essere abbastanza importanti.

Questa influenza è stata caratterizzata negli anni in maniera abbastanza fedele per i metalli tramite leggi sperimentali come per esempio quella di Johnson-Cook (descritta nel capitolo 3) con ottimi riscontri nelle caratterizzazioni numeriche.

Lo strain rate causa inoltre anche modifiche nel materiale dal punto di vista microscopico.

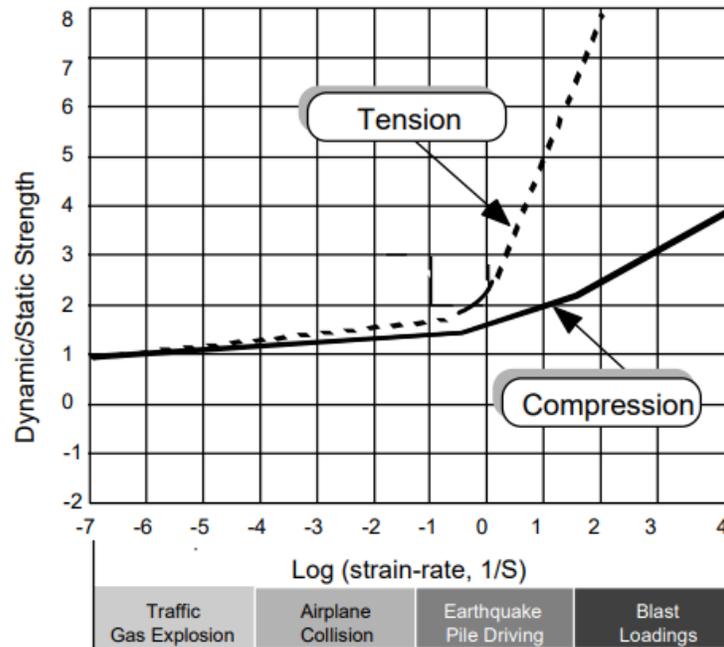


Figura 3.1: Variazione tipica di trazione e compressione al variare dello strain rate nei metalli [17]

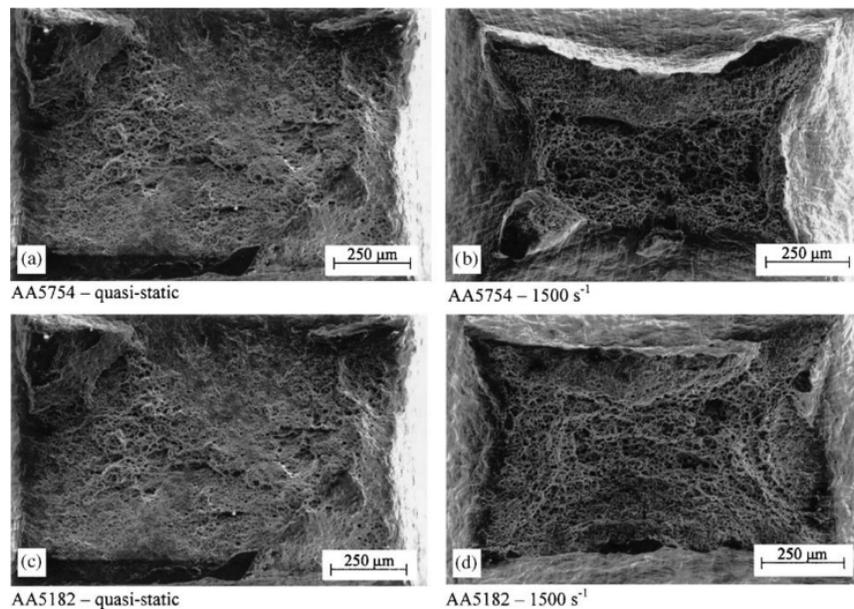


Figura 3.2: Effetti dello strain rate sulla microstruttura di due leghe di alluminio [18]

3.2 Effetti dello strain rate sui compositi

Per quanto riguarda i compositi, il comportamento è estremamente più complesso: l'effetto dello strain rate verrà percepito in maniera diversa su fibra e resina, ed il tipo di fibra e resina utilizzato e la loro interazione comportano effetti completamente diversi tra un caso e l'altro.

Anche il metodo di produzione ed il tipo di laminato modificano la dipendenza del componente da questo parametro: per esempio una variazione di orientamento anche di una sola lamina può influenzare la dipendenza del componente da questa variabile e modificare in maniera importante la sensibilità del composito all'impatto.

Tutti questi effetti si localizzano prevalentemente a livello micromeccanico: l'elevata velocità di attuazione della deformazione causa una risposta differente da parte dei singoli componenti del materiale, modificando tensioni, rigidità e modo di rottura del materiale. [8]

Diversamente dai metalli, caratterizzazioni univoche dei materiali compositi tramite formule analitiche sono pressochè impossibili. Le interazioni matrici-fibra e le propagazioni delle rotture nella matrice presenti in queste strutture in genere non sono descrivibili se non utilizzando modelli probabilistici e sono specifiche per tipo di composito e processo di produzione. [17]

Per i motivi sopra descritti, caratterizzare un laminato in composito al variare dello strain rate è molto difficile, soprattutto per via della estrema variabilità delle caratteristiche meccaniche principali rispetto a questo parametro. Questa variabilità risulta essere di gran lunga superiore rispetto a quella osservata nei metalli.

3.3 Caratterizzazione di componenti in condizioni di strain rate elevati

Principalmente, in assenza di modelli analitici, per valutare le proprietà del materiale ad elevati strain rate si vanno ad effettuare test sperimentali per valutare l'influenza di questo fattore e ricavare dei coefficienti da inserire in relazioni esponenziali o logaritmiche per descrivere il comportamento del materiale. (per esempio, è possibile riferirsi a leggi non introdotte all'interno di questa tesi come quella di Cooper-Simmonds o leggi esponenziali).

Molto spesso, in queste condizioni, risultati riportati da studi sugli stessi materiali possono essere in contrasto tra loro, soprattutto nei compositi. Per esempio, uno dei vari riassunti disponibili sullo scattering dei risultati relativi a laminati in composito è mostrato in figura 3.3.

Per valutare questi effetti, vanno effettuati test dinamici specifici in base all'entità dello strain rate agente sul componente. I test valgono sia per metalli che per compositi.

I più utilizzati sono:

- Punch test e test uniassiali a strain rate bassi.
- Charpy, Izod a strain rate da bassi ad intermedi (per valutare principalmente l'energia di impatto che il componente può assorbire).
- Hopkinson Bar e Drop weight per strain rate da intermedi ad elevati
- Flying plate per strain rate elevati

Una panoramica dei test utilizzati al variare dello strain rate è illustrata in figura 3.4:

Reinforcing material	Configuration	Direction	Range of property change factor		
			For strength	For Young's modulus	For ultimate strain
Glass	Unidirectional	Longitudinal	1.27–2.00	1.40–4.26	0.56–2.66
		Transverse	1.94	0.84	0.59–0.84
		Thickness	1.08	2.40	4.12
	Plain weave	Warp/fill	1.40–1.92	1.39–3.30	0.61–2.21
		Thickness	1.16–1.35	–	1.36–1.57
		–	–	–	–
Carbon	Unidirectional	Longitudinal	0.87–1.93	1.01–5.80	0.57–1.74
		Transverse	1.14–2.70	1.37–1.58	0.81–1.17
		Thickness	0.81–1.74	1.10	0.46–0.63
	Plain weave	Warp/fill	1.80–2.50	4.24–4.90	0.38–1.83
		Thickness	–	–	–
		Warp	1.33–2.40	3.90–4.63	0.27–0.51
Satin weave	Fill	1.46–2.43	3.90–5.62	0.23–0.54	
	Thickness	–	–	–	

Figura 3.3: Range indicativo di variazione delle proprietà meccaniche di compositi in fibre di carbonio e vetro [19]

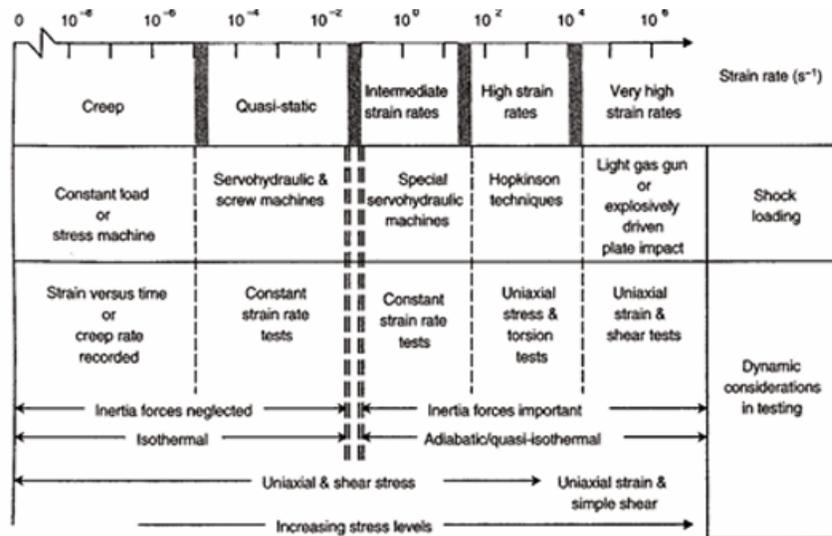


Figura 3.4: Tipi di test al variare degli strain rate [11]

Capitolo 4

Il fenomeno del ballast flight su treni ad alta velocità

4.1 Introduzione del ballast flight

Ogni singolo componente di un apparato ferroviario prodotto e messo in servizio deve rispettare una serie di normative specifiche: in Europa, questo compito è effettuato da specifiche norme EN ISO, CEN/TS e CEN/TR; tra queste, le EN 12663 (*structural requirements of vehicle bodies*) e la EN 15227 (*crashworthiness requirements*) richiamano le specifiche strutturali del mezzo su rotaie e vanno a definire principalmente i vincoli strutturali in situazioni statiche e dinamiche e il comportamento della struttura in presenza di impatti con altri mezzi o componenti dell'apparato ferroviario.

Tuttavia, una componente strutturale importante che si verifica a velocità elevate che è quella relativa agli urti dovuti al ballast (il ballast è il letto di pietre collocato in prossimità delle rotaie e parzialmente sulla superficie di esse che ha lo scopo di drenare il terreno e distribuire il carico sostenuto dalle rotaie), al momento risulta ancora poco o per nulla regolata.[20]

Questo fenomeno viene denominato 'ballast flight': esso è rilevabile quasi esclusivamente in presenza di linee percorse da treni ad alta velocità e si verifica esclusivamente a partire da velocità abbastanza elevate: dipende principalmente dal flusso aerodinamico generato dal passaggio del treno; quando questo flusso è particolarmente intenso, quest'ultimo causa l'accelerazione dei componenti del ballast presenti sul suolo. Quando questa accelerazione supera quella gravitazionale, si ottiene uno stato detto di 'assenza di peso' da parte di queste piccole pietre (ovvero le forze di reazione e di conseguenza le accelerazioni generate sui detriti sono tali da vincere l'accelerazione gravitazionale agente sui detriti), le quali a questo punto vengono portate via dal flusso d'aria diventando veri e propri proiettili che impattano la superficie del treno causando danni anche ingenti in tempi relativamente brevi. Maggiore la velocità, maggiore la probabilità che questo accada e maggiore il numero

di elementi del ballast sollevati dal terreno e la loro massa.

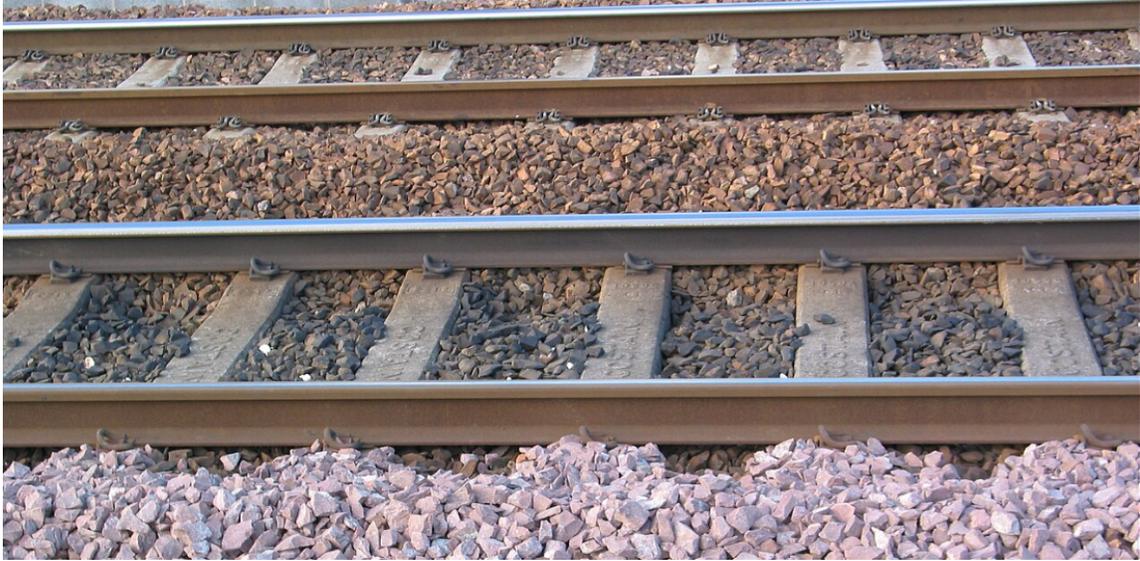


Figura 4.1: Tipico binario ferroviario con ballast in evidenza

Va anche sottolineato che la sola influenza del flusso aerodinamico non è in genere sufficiente all'innesco del fenomeno: l'altra componente influente è quella dovuta alle vibrazioni generate a terra dovute al passaggio del treno (principalmente vista come diffusione di onde superficiali, in particolare onde di Rayleigh) che facilitano l'immissione delle pietre nel flusso).

4.2 Principali fattori di influenza del ballast flight

Le cause principali attribuibili a questo fenomeno sono:

- **Caratteristiche aerodinamiche del treno:** la velocità del treno è la caratteristica più importante per l'innesco del fenomeno, tuttavia anche fattori come forma e profilo della struttura e degli accessori collegati ad essa possono ridurre turbolenza del flusso e migliorare il comportamento del treno o mitigarne gli effetti
- **Risposta di struttura e tracciato a carichi e sollecitazioni:** come già descritto in precedenza, il ballast flight è innescato tramite fenomeni di carico dinamici associati al passaggio a velocità elevata del treno; l'entità di questa risposta è regolata

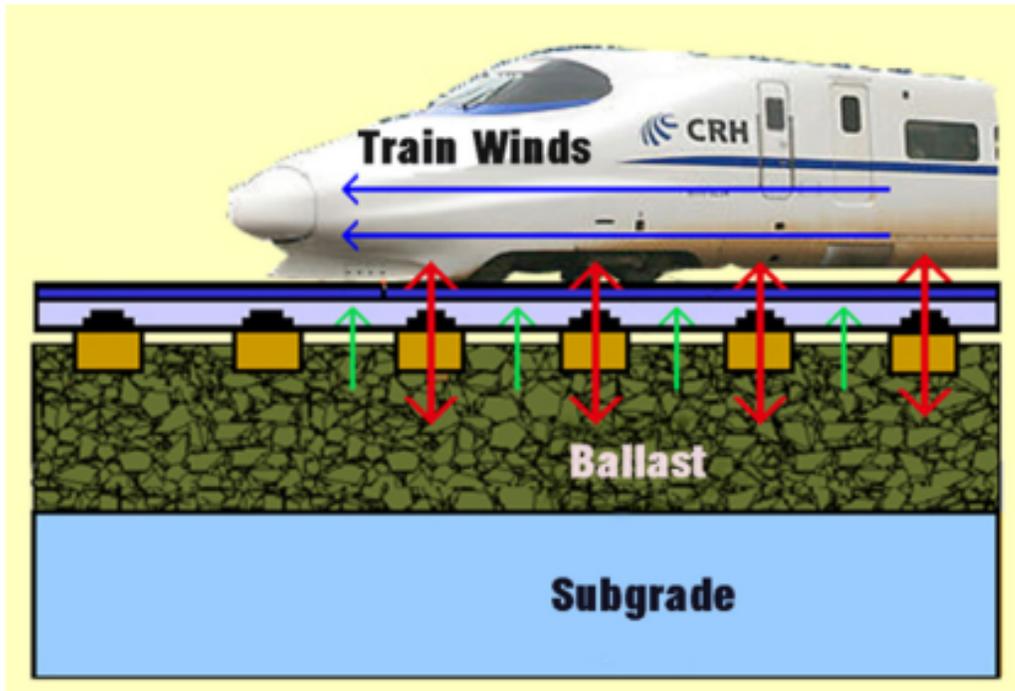


Figura 4.2: Innesco del ballast flight [21]

anche dal tipo di ballast impiegato e da come questi impattano la superficie del treno e rimbalzano nuovamente sul letto di pietre: in particolare l'angolo con i quali questi detriti possono rimbalzare e impattare nuovamente a terra può anche innescare reazioni a catena che causano l'impatto di nuovi detriti sulla struttura del treno. La gravità del fenomeno può anche dipendere da massa dei detriti, distanza tra i vari tracciati, eventuale presenza di elementi di mitigazione collegati sulle rotaie e le condizioni di manutenzione delle stesse

- **Fattori contribuenti dovuti al suolo:** questi effetti dipendono principalmente dalle condizioni e dal materiale presente al di sotto del letto di pietre e influiscono sulla propagazione di onde e dalla possibilità di fenomeni di risonanza che portano all'iniziazione del processo.
- **Condizioni atmosferiche:** le condizioni ambientali possono influire in maniera significativa: per esempio, venti di intensità elevata possono facilitare il sollevamento di piccoli detriti, la presenza di pioggia può lubrificare la parte esterna dei detriti e facilitare il processo riducendo la resistenza aerodinamica dei singoli frammenti; ancora, frammenti di ghiaccio o neve ad elevate velocità possono contribuire ad innescare il

fenomeno oppure aggravandolo diventando essi stessi dei proiettili che impattano la struttura.

Un riassunto delle cause e della loro importanza in termini di rischio è riassunta in figura 4.3.

Deve comunque essere messo in evidenza come il fenomeno, dall'iniziazione alla quantificazione del danno causato, sia ancora non perfettamente chiaro o perfettamente quantificato: l'approccio generale è quello di identificare quali siano i fattori scatenanti a livello di infrastruttura e di cercare di apporre modifiche strutturali (per esempio modificare altezza del ballast o del profilo strutturale dei treni) e di introdurre fattori di sicurezza da applicare a infrastrutture e struttura del treno affinché si abbiano sia probabilità di accadimento basse o contenute del fenomeno, sia confidenza che la struttura sia capace di sostenere questi impatti senza danni importanti al mezzo.

Questi fattori vengono ricavati, come per altri fenomeni, tramite appositi approcci statistici e campagne di test.

Il danno da ballast flight si esprime quindi sotto forma di deformazioni locali analoghe a quelle da impatto sulla struttura. Per via delle velocità elevate, queste possono anche perforare la carenatura e causare danni alle strutture sottostanti, compromettendo il funzionamento della parte danneggiata (per esempio, i detriti potrebbero perforare e danneggiare circuiti o gearbox collocate sotto la carenatura).

Dal punto di vista delle contromisure al fenomeno, parte di queste sono state descritte sopra. Una delle più importanti riguarda la modifica del ballast, sia dal tipo di detrito utilizzato, sia dagli accorgimenti possibili per evitarne il volo, per esempio utilizzando appositi elementi bloccanti in prossimità dei binari.

Un'altra contromisura ugualmente importante è la caratterizzazione strutturale: in questo caso, si va a valutare sperimentalmente e a garantire che il componente strutturale riesca a resistere a questi impatti senza subire danni troppo importanti.

Risk Factors	Qualitative Risk Rating
<i>Train Aerodynamics</i>	
Operating speed	High
Train design	High
Underfloor carbody design	Medium
Intercar gap	Medium
Truck/bogie design	Low
Tunnel operation	Medium
<i>Track Response</i>	
Dynamic load	High
Angle of impact hitting ballast crib	Medium
Truck/bogie design amplifying vibration	Low
Ballast particle mass and shape	Medium
Distance between tracks	Medium
Track maintenance standard and frequency	High
Tie/sleeper type	Medium
Tie/sleeper aerodynamics design	Medium
<i>Ground Effect Conditions</i>	
Sub-ballast quality	Low
Subgrade quality	Low
Sub-ballast layer response	Medium
Seismicity	Low
<i>Atmospheric or Weather Conditions</i>	
High wind	High
Heavy rain	Low
Snow accumulation	Medium
Other weather related factors	Low

Figura 4.3: principali fattori scatenanti del ballast flight e relativa importanza in termini di fattore di rischio [21]

4.3 Introduzione alla norma NF F07-101

Come descritto in precedenza, il fenomeno del ballast flight è poco regolamentato dal punto di vista normativo. Tuttavia, esistono alcune norme che forniscono linee guida sulla caratterizzazione delle strutture ferroviarie soggette a questo fenomeno. Una di queste norme è la AFNOR NF F07-101.

La norma definisce un setup standard per lo svolgimento delle prove di caratterizzazione

della struttura per questo tipo di impatti ed è applicabile a tutte le componenti strutturali interessate dai detriti del ballast proiettati. Lo scopo della norma è proprio quello di ricreare, tramite il proiettile, il comportamento e gli effetti del detrito sulla struttura e di valutare la resistenza della struttura all'impatto soprattutto dal punto di vista energetico. Una volta effettuato il test e stabilito il livello energetico attribuibile alla struttura, si va a garantire che il componente non subisce danni tali da comprometterne il corretto funzionamento durante la sua vita operativa per tutti gli impatti con energia cinetica pari o inferiore a quella classe energetica.[22]

Capitolo 5

Test sperimentale di impatto su carenatura

5.1 Test da impatto con cannone a gas

Poichè di interesse per la campagna di test effettuati, può essere utile fornire una breve descrizione dell'apparato sperimentale che verrà utilizzato. In generale, un cannone a gas è costituito da una serie di elementi distinti, ovvero una canna, un meccanismo di sparo, il gas necessario per il lancio e strumenti di controllo per sparo e lancio, in maniera tale che avvenga in sicurezza e con pressione il più possibile uniforme. In base al tipo di esperimento, può inoltre variare il tipo di strumentazione a supporto ed il tipo di proiettile utilizzato. Un'altra componente fondamentale è rappresentata dalla curva pressione/velocità del cannone: essa risulta fondamentale per ottenere la velocità richiesta in base alla pressione in ingresso del gas. I range di velocità di utilizzo vanno da alcune decine a centinaia di m/s.



Figura 5.1: Tipici proiettili utilizzati con cannone a gas [23]

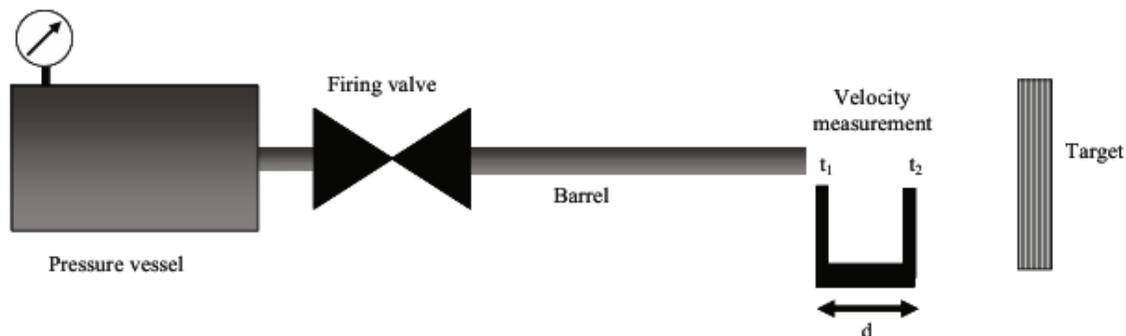


Figura 5.2: Schema di lancio con cannone a gas [23]

5.2 Test sperimentale secondo norma NF F07-101

La norma definisce un setup standard per lo svolgimento delle prove di caratterizzazione della struttura ed è applicabile a tutte le componenti strutturali interessate dai detriti del ballast proiettati. Di seguito sono riportati alcuni accorgimenti stabiliti dalla norma e che sono stati implementati, in maniera leggermente modificata, nella caratterizzazione sperimentale della carenatura in esame.

- **setup della prova**

La prova di caratterizzazione secondo norma prevede l'utilizzo di un proiettile in acciaio sparato da un cannone, in maniera tale che esso venga guidato nella direzione corretta verso un provino rappresentativo del componente strutturale in esame. Il provino non deve avere forme particolari, ma solo un vincolo di lunghezza e larghezza minima. La prova così articolata permette di riprodurre in maniera fedele lo stesso tipo di danno causato dai detriti del ballast. La prova deve essere ripetuta più volte per ogni configurazione; queste configurazioni vanno testate con lanci preliminari per garantire il corretto svolgimento della prova.

- **Strumento di rilevazione e condizioni operative**

Il rilevamento della velocità viene effettuato tramite dispositivi posti tra cannone e provino, lungo il tragitto percorso dal proiettile prima dell'impatto. La corretta rilevazione della velocità permette di ricavare l'energia cinetica e quindi la classe energetica dell'impatto. Anche i valori di temperatura sono normati, con il lancio che deve avvenire a determinate condizioni ambientali.

- **proiettile**

Il proiettile ha una forma standard, definita dalla normativa (varianti di questa utilizzate per la carenatura in esame sono rappresentate in seguito), ed un peso stabilito.

Il provino può inoltre essere inclinato fino ad un certo angolo limite(angolo di tiro) per simulare impatti obliqui.

- **valutazione del danno**

La determinazione della classe energetica del materiale viene confermata tramite ispezione visiva. Secondo norma, si valuta visivamente l'indentazione e il danneggiamento causato dal proiettile, per verificare la presenza di danni permanenti che compromettono il funzionamento della struttura. Si misura in particolare la profondità dell'indentazione causata dal proiettile e le dimensioni dell'impronta generata. Se il provino presenta rivestimenti per esempio sotto forma di vernici o gelcoat, va osservato sia il danneggiamento del rivestimento, sia il danneggiamento del provino rimuovendo il rivestimento dopo l'impatto.

5.3 Setup sperimentale nel laboratorio di Production Group

Il setup sperimentale della carenatura e la rilevazione dei dati è stato realizzato da 'Production Group'.

Il test sperimentale segue la norma citata in precedenza, introducendo però alcune modifiche sul proiettile che saranno descritte in seguito.



Figura 5.3: lanciatore pneumatico e camera con provino

La carenatura ha la forma di una piastra con due rinforzi collocati sulla superficie posteriore ed è stata incastrata tramite l'utilizzo di appositi blocchi e di un telo protettivo. Inoltre, è inclinata di 60 gradi rispetto all'orizzontale, determinando quindi impatti obliqui tra il proiettile e la piastra (di conseguenza si ottiene un angolo di tiro di 30 gradi circa). Sono state testate due tipologie differenti di provini: un provino in alluminio di dimensioni 700x1000mm e spesso 1.5mm ed uno in composito, in fibra di vetro e carbonio, delle

stesse dimensioni del provino in alluminio ma spesso 3 mm. Il provino in alluminio è stato testato principalmente per creare un riferimento di penetrabilità per la prova, per poter poi caratterizzare il provino in composito. Le rappresentazioni tecniche dei provini sono visualizzabili in Figura 6.11

. Inoltre, i materiali del composito e le laminazioni sono definite in figura 6.12,6.13, ed in 6.35

. Tra i materiali che compongono il laminato in composito, va sottolineata la presenza del gelcoat, ovvero uno strato di materiale resistente a corrosione ma poco influente dal punto di vista strutturale che ha lo scopo principale di proteggere il composito da agenti degradanti esterni. I proiettili sono realizzati in lega di alluminio e sono di due forme differenti: in particolare, uno dei due proiettili è una variante alleggerita ma con la stessa forma di quelli utilizzati per precedenti prove con setup simili, mentre l'altro presenta una forma conforme a quella definita dalla normativa utilizzata per la validazione del test.

Come dichiarato da Production Group, entrambi i proiettili hanno una massa di 140 grammi circa.

Per la rilevazione della velocità è stato utilizzata una coppia di rilevatori associati ad un sistema di fili: il proiettile, rompendo i fili posti ad una certa distanza tra loro, permette una valutazione della velocità a partire dal tempo intercorso tra la rottura dei due fili. Un rilevatore laser, seppur disponibile, non è stato utilizzato poiché il sistema in uso è risultato sufficientemente affidabile.

La norma di riferimento utilizzata è la *'NF F 07-101: 2002 – Essai de choc par simulation de projection de ballast'*. Nella norma vengono riportate le linee guida sullo svolgimento della prova e le classi energetiche di riferimento, cioè l'energia cinetica del proiettile, che vengono riassunte in Figura 5.7.

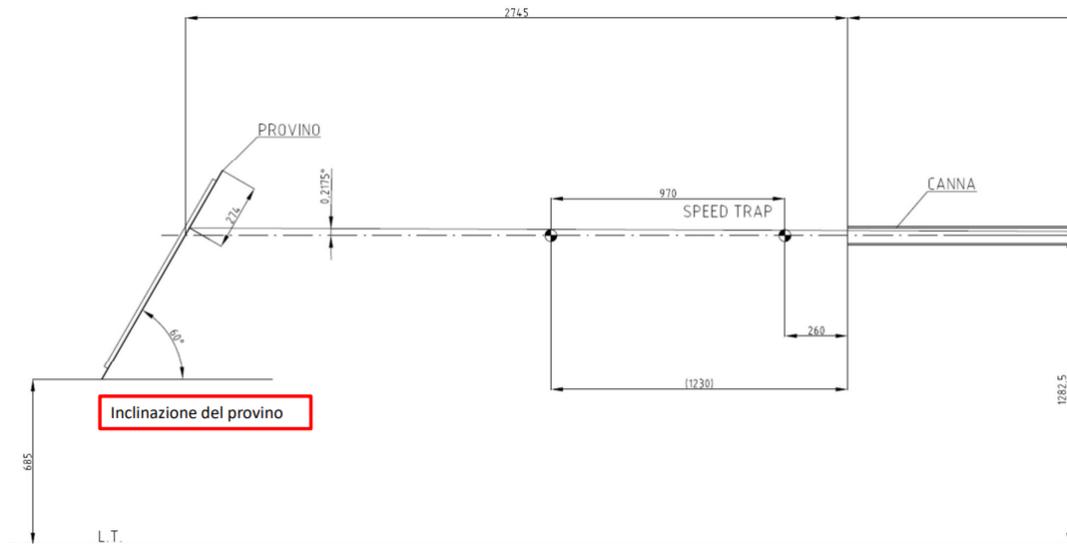


Figura 5.4: Inclinazione provino e zona di impatto



Figura 5.5: Particolare provino in camera di prova



Figura 5.6: Proiettili utilizzati

Classe	Energia (J)
K1	12
K2	15
K3	25
K4	35
K5	60
K6	95
K7	115
K8	170
K9	210
K10	240
K11	285

Figura 5.7: livelli energetici definiti dalla norma (ricavati da [22] e forniti da Production Group

I proiettili vengono sparati ad alta velocità tramite un cannone ad aria compressa: in base alla pressione con cui viene impostato lo sparo, è possibile variare e stimare la velocità.

5.4 Esecuzione della prova

Lo scopo di questi lanci è quello di valutare la risposta della carenatura all’impatto di questi proiettili alle varie velocità misurate, con il fine di valutare visivamente gli effetti sulla carenatura e verificare che non ci siano danni compromettenti sul provino.

In totale, sono stati effettuati 11 lanci: i primi 5 lanci, effettuati con un proiettile diverso ma conforme a quello normato e sparato tramite l’ausilio di un sabot, non sono stati presi in considerazione poichè sono principalmente serviti a calibrare correttamente i dispositivi di rilevazione della velocità, a garantire errore minimo riguardante la zona di impatto e a stabilire la forma del proiettile ideale per il tipo di cannone implementato.

I lanci sono stati effettuati a velocità progressivamente più basse, questo perchè il livello energetico dei primi lanci era superiore a quello necessario secondo normativa. Una volta raggiunto il livello energetico K10, ovvero quello minimo richiesto definito da Production Group per la validazione della carenatura, il livello di pressione e di velocità è stato stabilizzato, come accaduto negli ultimi 3 lanci degli 11 complessivi.

Per la valutazione dei danni e per la correlazione con il modello numerico, è stata rilevata la deformazione del provino metallico, mentre per il provino in composito ci si è limitati ad una verifica esterna di perforazioni e delaminazioni superficiali del provino dopo l’impatto.

Va specificato che, seppur l’impostazione generale della prova segua la norma [22], sono state apportate alcune modifiche, in particolare sul proiettile: il peso dei proiettili è superiore a quello definito dalla norma, inoltre la forma in particolare del proiettile cilindrico è diversa da quella normata. Infine, i proiettili sono realizzati in alluminio e non in acciaio.

5.5 Risultati dei test

Sono di seguito riportati i risultati significativi dei test sperimentali:

Lancio	P_{set} (bar)	P_{rea} (bar)	V (m/s)	$V_{attesa(min)}$ (m/s)	$V_{attesa(max)}$ (m/s)	Δ (m/s)	K (J)	Classe	Proiettile	Provino
6	2	2.091	110.97	82	104	-6.97	862	> <i>Max</i>	Tipo 1	Composito
7	1	1.063	85.18	58	90	4.83	508	> <i>Max</i>	Tipo 1	Composito
8	0.7	0.69	80.3	56	70	-10.3	451	> <i>Max</i>	Tipo 1	Composito
9	0.25	0.273	59.4	28	38	-21.4	247	K10	Tipo 1	Composito
10	0.25	0.264	56	28	38	-18	219	K9	Tipo 2	Composito
11	0.25	0.254	58.5	28	38	-20.5	240	K10	Tipo2	Alluminio

Tabella 5.1: Risultati dei test sperimentali

Tra i vari valori di velocità riportati in tabella, in particolare le velocità attese sono ricavate sulla base di una curva pressione in ingresso/velocità in uscita a disposizione dell'azienda. Poichè la curva è ricavata sulla base di test effettuati a velocità più elevate di quelle utilizzate in questi test, questa ha evidenziato un notevole divario tra le velocità attese analitiche e quelle effettive misurate. Ognuno dei vari lanci ha prodotto effetti differenti sul provino dopo l'impatto. Di seguito sono descritti gli effetti di ogni singolo lancio numerato nella tabella sopra riportata. Le immagini di proiettili e provini utilizzati dopo l'impatto e qui riportati sono state fornite da Production Group.

- **Lancio 6:** il provino è stato completamente attraversato dal proiettile, con un'area danneggiata circa pari al diametro del proiettile. La rottura delle fibre inoltre si è propagata anche in direzione verticale lungo le fibre per gran parte del provino, e in direzione orizzontale fino in prossimità dei rinforzi

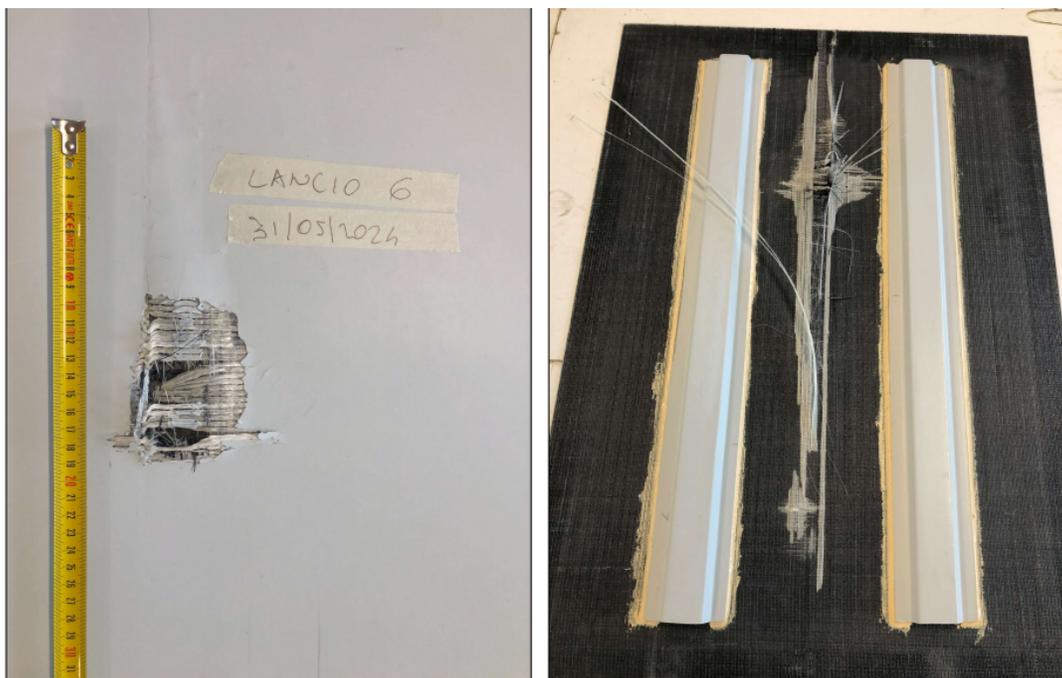


Figura 5.8: Provino in composito dopo lancio 6

- **Lancio 7:** Il lancio 7, diversamente dal 6, non ha causato perforazione del provino. Si nota failure totale del gelcoat sulla parte frontale della piastra e una delaminazione diffusa, di dimensioni in entrambe le direzioni simili a quelle della rottura nel lancio 6 nella parte posteriore del provino.



Figura 5.9: Provino in composito dopo lancio 7

- **Lancio 8:** Nel lancio 8, in cui la velocità del proiettile è di 5 m/s più bassa rispetto al lancio 7, si possono osservare dinamiche molto simili a quelle del lancio precedente, ma con effetti molto più contenuti: il gelcoat risulta rotto solo nell'area impattata corrispondente alla punta del proiettile, e la delaminazione è estremamente contenuta rispetto a prima.

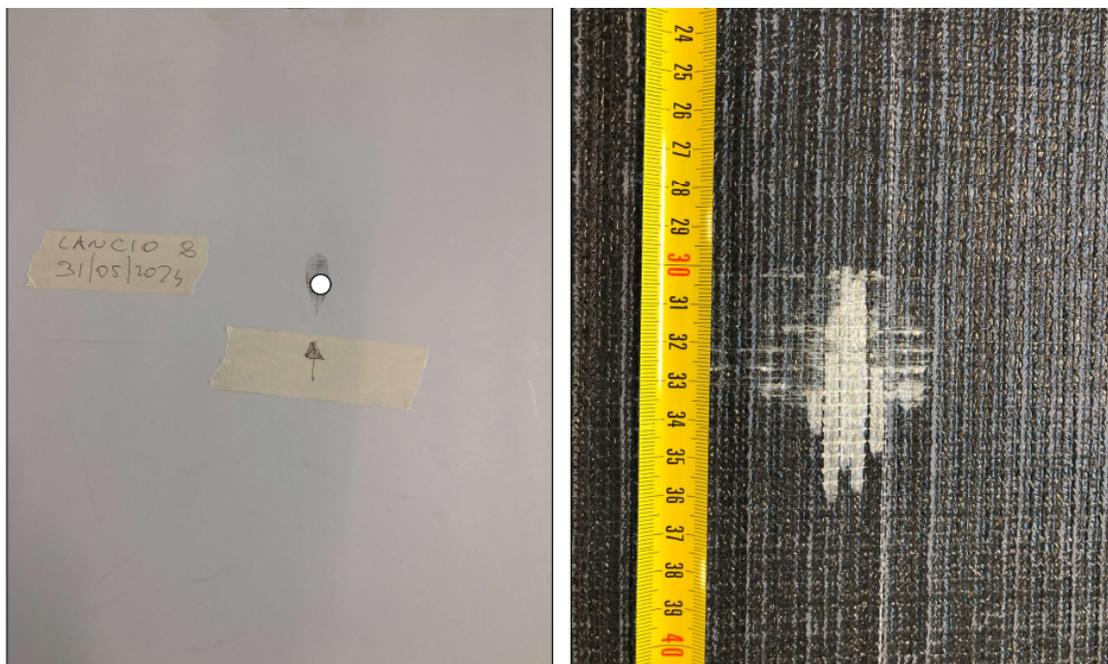


Figura 5.10: Provino in composito dopo lancio 8

- **Lancio 9:** Il lancio 9 ha effetti molto simili al lancio 8, ovvero rottura parziale del gel-coat e delaminazione nella faccia posteriore del composito di dimensioni comparabili.



Figura 5.11: Lancio 9: faccia frontale

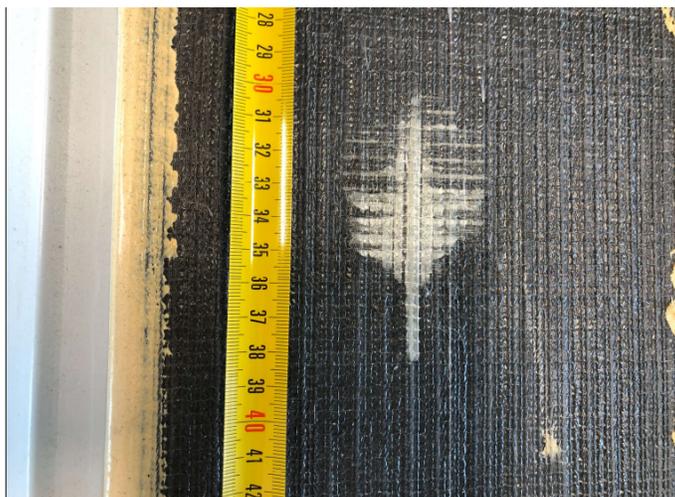


Figura 5.12: Lancio 9: faccia posteriore

- **Lancio 10:** Il lancio 10 vede l'utilizzo del proiettile 2 rispetto al proiettile 1. Nonostante velocità comparabili ai lanci 8 e 9, gli effetti sul provino sono molto simili al lancio 7, con rottura diffusa del gelcoat e delaminazioni estese sulla facciata posteriore.

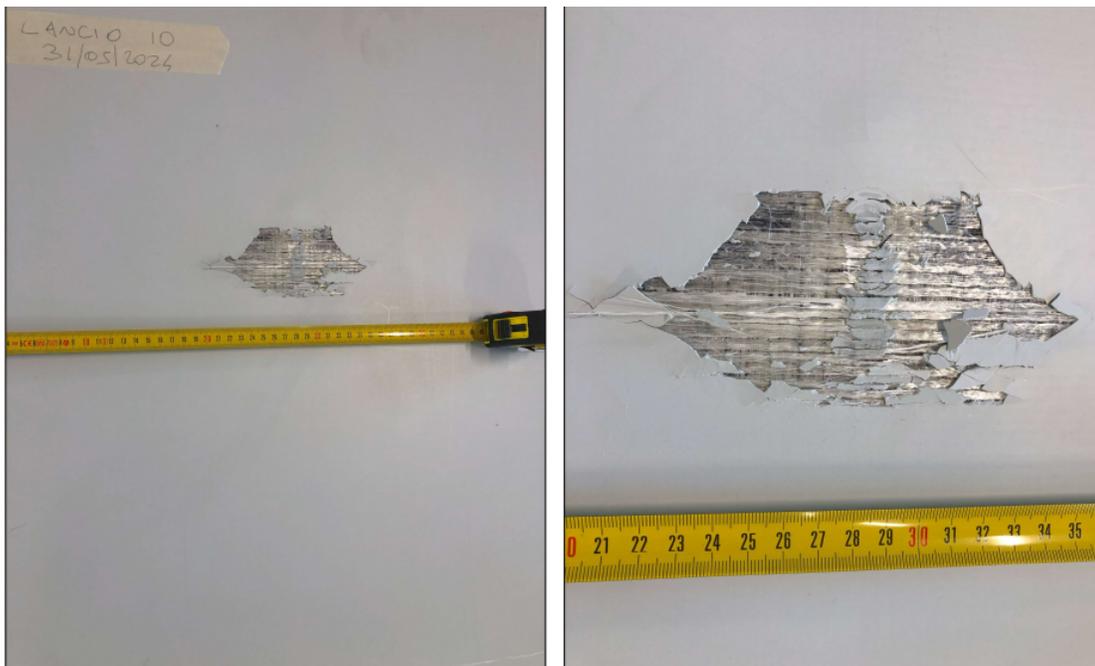


Figura 5.13: Lancio 10: faccia frontale



Figura 5.14: Lancio 10: faccia posteriore

- **Lancio 11:** Il lancio 11 è stato effettuato con il proiettile 2 sul provino in alluminio. Il proiettile non perfora la carenatura, ma riesce a causare deformazione estesa nella zona di impatto corrispondente alla punta e rottura parziale della piastra. Per questo lancio in particolare è stata misurata l'indentazione causata dal proiettile dopo l'impatto.

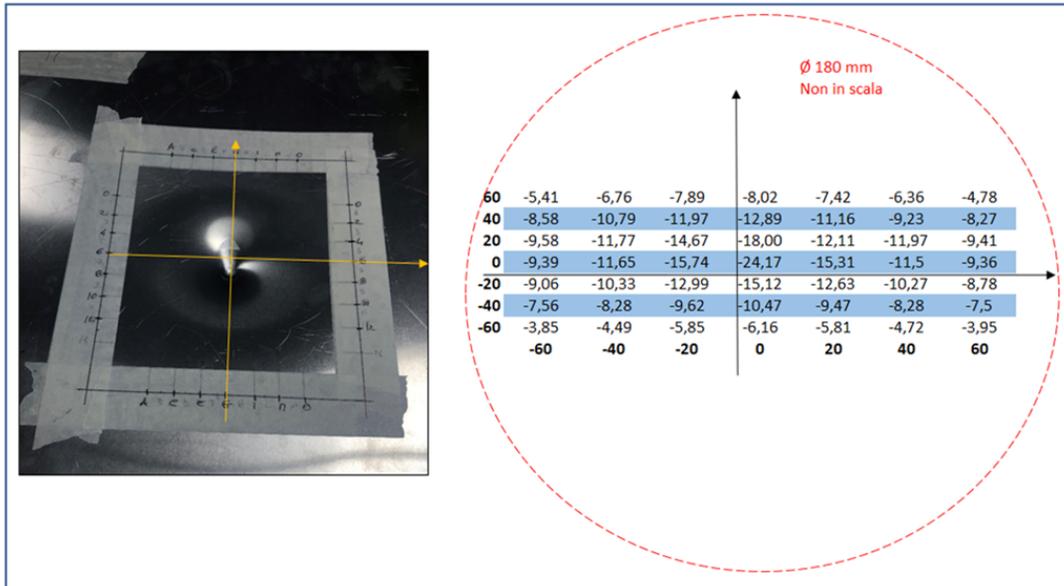


Figura 5.15: Lancio 11: Misure dell'indentazione presente dopo l'impatto

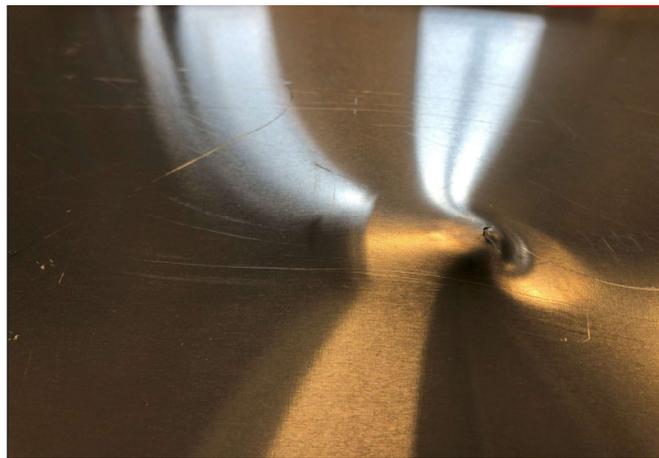


Figura 5.16: Lancio 11: faccia posteriore

Per quanto riguarda invece i proiettili, si possono notare delle plasticizzazioni locali o delle abrasioni del materiale nei vari lanci.



Figura 5.17: Proiettile dopo lancio 6



Figura 5.18: Proiettile dopo lancio 7



Figura 5.19: Proiettile dopo lancio 8



Figura 5.20: Proiettile dopo lancio 9



Figura 5.21: Proiettile dopo lancio 10



Figura 5.22: Proiettile dopo lancio 11

Capitolo 6

Modellazione FEM della carenatura

6.1 Solutore agli elementi finiti esplicito Altair Radioss

6.1.1 Breve introduzione al software Radioss

Per la modellazione della carenatura e la valutazione dell'impatto numerica, è stato utilizzato il software RADIOSS, nella versione 2022.

Prendendo come riferimento quanto detto in [24], RADIOSS è un solutore dinamico esplicito agli elementi finiti.

Un solutore esplicito è particolarmente adatto alla simulazione di fenomeni dinamici poiché diversamente da uno implicito riesce a descrivere in maniera più accurata fenomeni come grandi deformazioni strutturali causate in pochi istanti di tempo o variazioni di masse, energia, momenti e propagazioni di onde. Analizzando gli stessi fenomeni con un software implicito, si arriverebbe invece nella maggior parte dei casi a divergenza del calcolo e ad errori.

Nel metodo agli elementi finiti esplicito, il solutore va a risolvere un'equazione dinamica strutturale del tipo:

$$[M] \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} \right\} + c \left\{ \frac{du}{dt} \right\} + K \{U\} = \{F_{ext}(t)\} \quad (6.1)$$

In cui M è matrice delle masse, C matrice degli smorzamenti, K matrice di rigidità, F sono le forze esterne agenti ed u sono gli spostamenti. Il software andrà quindi a risolvere l'equazione descritta sopra e a ricavare valori derivati da essa come deformazioni plastiche, stress ed energie. Queste ultime componenti saranno molto importanti per le valutazioni numeriche sviluppate in seguito.

Explicit	Implicit
(-) Conditional stability	(+) Always stable
(-) Small Δt (μs)	(+) Large Δt (ms)
(+) Precision	(+) Precision
(+) $[M]^{-1}$ (diagonal matrix)	(-) $([M]+\alpha[K])^{-1}$ (non diagonal)
(+) Low memory (10 MW)	(-) High memory (6000 MW)
(+) Dynamic and Shock problems	(+) Dynamic and Static problems
(+) « Element-by-Element » method <ul style="list-style-type: none"> • Local treatment 	(-) Global resolution <ul style="list-style-type: none"> • Need of convergence at each step
(+) High Robustness <ul style="list-style-type: none"> • High and Coupled nonlinearities 	(-) Low Robustness <ul style="list-style-type: none"> • Null pivots, Divergence, ...
(+) Relatively low cost <ul style="list-style-type: none"> • « Low » CPU, « Low » Memory 	(-) Too expensive <ul style="list-style-type: none"> • High CPU, High Memory

Figura 6.1: Vantaggi e svantaggi di software agli elementi finiti impliciti ed espliciti [24]

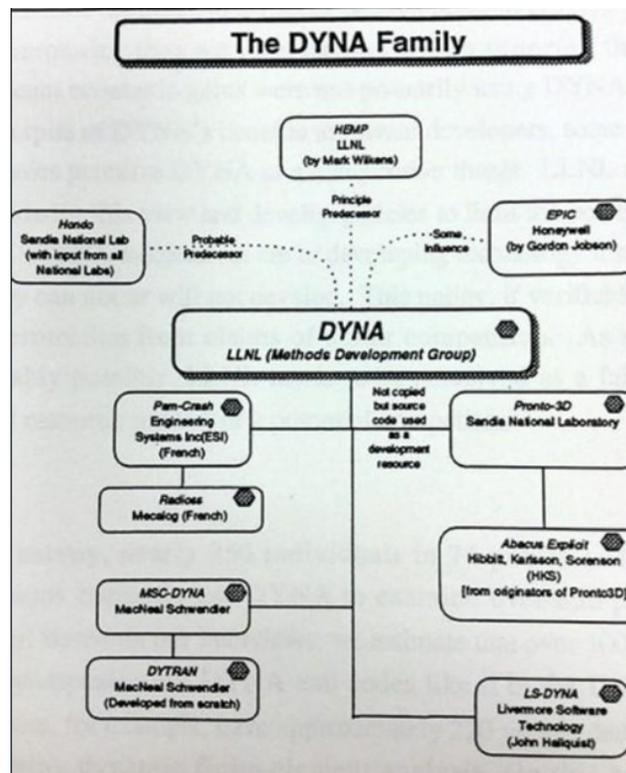


Figura 6.2: Origine e ramificazione dei vari software espliciti [25]

6.1.2 Funzioni del software e nozioni teoriche di interesse

Per una migliore comprensione della procedura utilizzata in seguito per la modellazione numerica dei provini, può risultare di interesse fornire alcuni brevi cenni teorici sulle funzioni principali del software che saranno utilizzate all'interno della simulazione.

Input file, engine file e output del software

Per poter effettuare il calcolo strutturale, il software necessita di due file distinti, ovvero l'input file e l'engine file.

L'input file contiene le caratteristiche principali del problema strutturale, quindi le indicazioni sulle parti, sugli elementi, sui nodi, sulle proprietà della struttura e dei materiali di cui sono composte. Comprende anche informazioni su alcune grandezze come velocità e condizioni al contorno. Al suo interno, ogni componente ha un ID preciso, ed ogni voce selezionata va compilata in maniera strutturata come indicato nella relativa sezione nella user guide. L'input file è sempre riconoscibile, a parte per casistiche più complesse, dal suffisso 0000.rad. Un esempio di scrittura nell'input file è fornito in figura 6.3

```
# Ishell Ismstr Ish3n Idrill Ipinch P_Thick_Fail
# 24 0 0 0 0 0.0
# Hm Hf Hr Dm Dn
# 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# N Thick Ashear Ithick Iplas
# 5 1.5 0.0 1 0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
##HWCOLOR properties 10 17
/PROP/SHELL/10
prop_saldaura
# Ishell Ismstr Ish3n Idrill Ipinch P_Thick_Fail
# 24 0 0 0 0 0.0
# Hm Hf Hr Dm Dn
# 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
# N Thick Ashear Ithick Iplas
# 5 1.5 0.0 0 0
#---1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|---10---|
##HMGROUP 7 7
/INTER/TYPE2/7
#Title
TIE_piastra_telo_inf
# grnod_id surf_id Ignore Spotflag Level Isearch Idel2 dsearch
# 20 4 0 28 0 0 0 0.0
# Stfac Visc Istf
# 0.0 0.0 0
/GRNOD/NODE/20
#title
nodi_telo_inf
# item_ID1 item_ID2 item_ID3 item_ID4 item_ID5 item_ID6 item_ID7 item_ID8 item_ID9 item_ID10
611873 611874 611875 611876 611877 611878 611879 611880 611881 611882
611883 611884 611885 611886 611887 611888 611889 611890 611891 611892
611893 611894 611895 611896 611897 611898 611899 611900 611901 611902
611903 611904 611905 611906 611907 611908 611909 611910 611911 611912
611913 611914 611915 611916 611917 611918 611919 611920 611921 611922
611923 611924 611925 611926 611927 611928 611929 611930 611931 611932
```

Figura 6.3: Particolare della struttura di un input file

L'engine file contiene invece le informazioni relative al calcolo, per esempio tempo di simulazione, versione del software ed output richiesti. In base alle informazioni contenute in questo file, quindi, è possibile ottenere in uscita per esempio file di animazione, file h3d (i file con risultati e animazioni in forma compressa che vengono poi elaborati tramite il software Hyperview) o file T01 (contengono risultati sotto forma di set numerici che possono essere prelevati e trasformati in curve tramite software appositi. I risultati che contengono devono essere definiti e richiesti nell'input file). Un esempio di engine file è rappresentato in figura 6.4.

```

1 /RUN/prova_proiettile_metallo_deformabile/1/
2 3.000000000000000
3 /STOP
4 0.000000000000000 0.000000000000000 0.000000000000000 1 1 0
5 /MON/ON
6 /PRINT/-500/55
7 /VERS/2022
8 /DT/NODA/CST/0
9 0.670000000000000 3.00000000000000E-05 0.000000000000000
10 /TFILE/0
11 1.00000000000000E-05
12 /ANIM/DT
13 0.000000000000000 0.050000000000000
14 /ANIM/ELEM/EPSP
15 /ANIM/ELEM/VONM
16 /ANIM/NODA/DMA5
17 /ANIM/SHELL/TENS/STRESS/UPPER
18 /ANIM/SHELL/TENS/STRESS/LOWER
19 /ANIM/SHELL/EPSP/UPPER
20 /ANIM/SHELL/EPSP/LOWER
21 /ANIM/SHELL/FLDZ/MEMB
22 /ANIM/SHELL/FLDZ/UPPER
23 /ANIM/SHELL/FLDZ/LOWER
24 /ANIM/SHELL/DAMA/ALL
25 /ANIM/VECT/VEL
26 /H3D/DT
27 0.000000000000000 0.050000000000000
28 /H3D/ELEM/EPSP
29 /H3D/COMPRESS
30 0.000000000000000
31 /H3D/NODA/DMA5
32 /H3D/NODA/MASS
33 /H3D/NODA/CONT
34 /H3D/NODA/CONT2
35 /H3D/NODA/PCONT
36 /H3D/NODA/VEL
37 /H3D/SHELL/EPSP/DT-LOWER

```

Figura 6.4: Particolare della struttura di un engine file

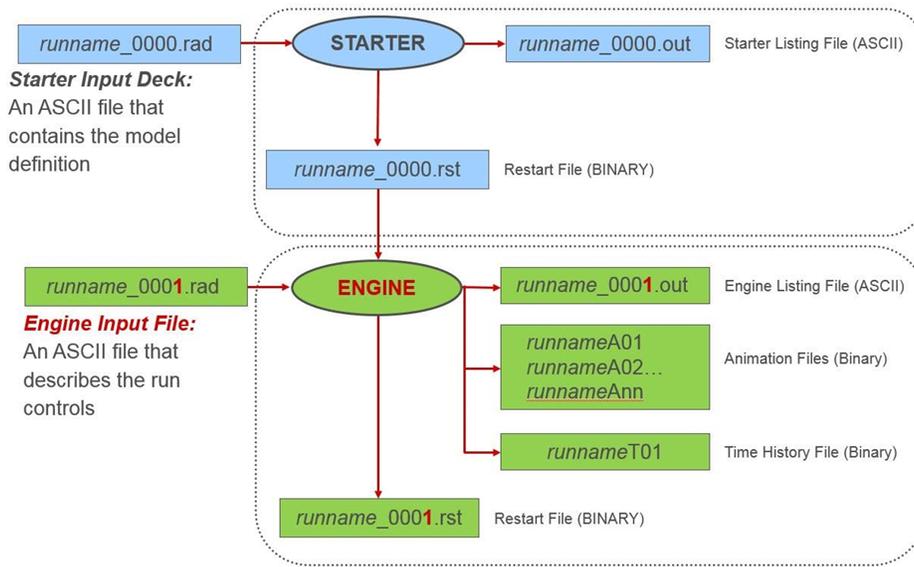


Figura 6.5: Schema riassuntivo su file input ed output in Radioss [24]

Una volta impostati engine file ed input file, il software andrà a creare un file di restart utilizzando il file 0000. Il restart, interfacciandosi direttamente all'engine file, permetterà al software di effettuare il calcolo richiesto e di fornire in output i risultati.

Definizione del time step

Utilizzando analisi esplicite, quindi a stabilità condizionata dall'intervallo temporale, diventa fondamentale il concetto di time step. Il software deve tenere conto di due time step fondamentali, il time step dell'elemento ed il time step nodale, definiti rispettivamente come [24]:

$$\Delta t_e = \frac{l}{c} = \frac{l}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (6.2)$$

$$\Delta t_n = \sqrt{\frac{2m}{K}} \quad (6.3)$$

dove l è la lunghezza dell'elemento, c è la velocità di propagazione del suono nel materiale, E è il modulo elastico, m è la massa nodale e k la rigidezza nodale equivalente.

Poichè le onde che si propagano nel materiale devono essere valutate da parte del software un elemento per volta, i fattori principali che influenzano la stabilità del calcolo sono quindi la lunghezza minima dell'elemento e la velocità di propagazione del suono nel materiale.

Quindi, inserire nel calcolo elementi troppo piccoli o rigidità troppo elevate possono portare a time step troppo ridotti che potrebbero impedire il proseguimento del calcolo.

Definizione degli elementi 2D in Radioss

Soffermandosi unicamente agli elementi 2D, ovvero quelli che saranno di maggiore interesse nello sviluppo del modello numerico, le opzioni disponibili sono illustrate in figura 6.6. Gli elementi utilizzati in queste analisi vedono differenze rispetto a quelli utilizzati in analisi 2D statiche, principalmente dal punto di vista dei punti di integrazione e dalle grandezze in gioco considerate. La scelta tra uno di questi elementi dipende da materiale, risorse computazionali e caso di applicazione.

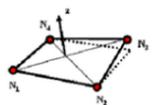
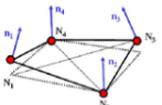
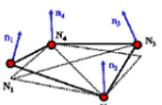
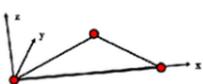
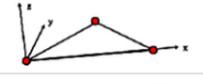
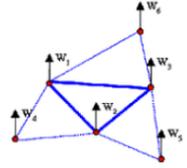
Mesh	Element Name	Number of Integration Points	Hourglass Formulation	Comments
	BT (Classic Q4)	1	Four types based on penalty method	Constant normal vector Hourglass formulations types 3 and 4 are much better than type 1 - used by default
	QEPH	1	Physical stabilization	Normal vectors at nodes No hourglass energy in output
	QBAT	2x2	Fully-integrated element	Normal vectors at nodes No hourglass energy
	C0	1	---	Flat facet element No hourglass energy
	DKT18	3	---	Kirchhoff shell (thin shell only) Higher t/L, lower the time step
	S3N6	1	---	Kirchhoff shell (thin shell only) No rotational DOF Rotation of the sides is determined with the help of vertical displacements in neighbors

Figura 6.6: Opzioni per shell 2D disponibili in Radioss [26]

Valutazione delle energie nel software

Nelle analisi strutturali dinamiche risulta spesso fondamentale ottenere informazioni riguardanti le energie coinvolte nel fenomeno. Le tipologie di energie principali calcolate dal

software sono:

- energia totale
- energia interna
- energia cinetica
- energia di contatto
- energia traslazionale
- energia rotazionale
- hourglass energy

Tra le energie sopra citate, può essere utile soffermarsi sulla hourglass energy.

L'hourglass energy prende il nome dal fenomeno che vede deformazioni innaturali negli elementi durante la simulazione. Si ottiene principalmente in elementi con insufficienti punti di integrazione e porta questi elementi ad assumere una tipica forma simile ad una clessidra. Queste deformazioni causeranno sia assenze di stress, sia produzioni di energia che non sono presenti nel caso reale, introducendo errori significativi nei risultati ottenuti. [24]

Come prima verifica sulla validità del modello, la somma totale delle energie fornite in output deve sempre essere uguale a quella totale. La presenza di errori energetici durante il calcolo può essere visualizzata dalla voce `err%` nel file `.o` o nel file `0001.out` del software al termine del calcolo, ed è valutata in questo modo [27]:

$$\%error = 100 \left(\frac{E_k + E_k^r + E_i}{E_{k,1} + E_{k,1}^r + E_{i,1} + E_{wk} - E_{wk,1}} - 1 \right) \quad (6.4)$$

Dove E_k è energia cinetica traslazionale, E_k^r è energia cinetica rotazionale, E_i è l'energia interna ed E_{wk} è il contributo delle forze esterne. La formula valuta quindi le energie nei due istanti correnti di calcolo e quantifica l'errore in percentuale.

Se gli errori energetici sono positivi, si avrà creazione di energia, se la quantità presente in `err` è negativa, si avrà perdita di energia. L'errore positivo dipende sempre da errori in fase di costruzione del modello, mentre errori negativi anche elevati possono dipendere da contatti o altri fenomeni i cui contributi energetici non sono inclusi nella valutazione del software.

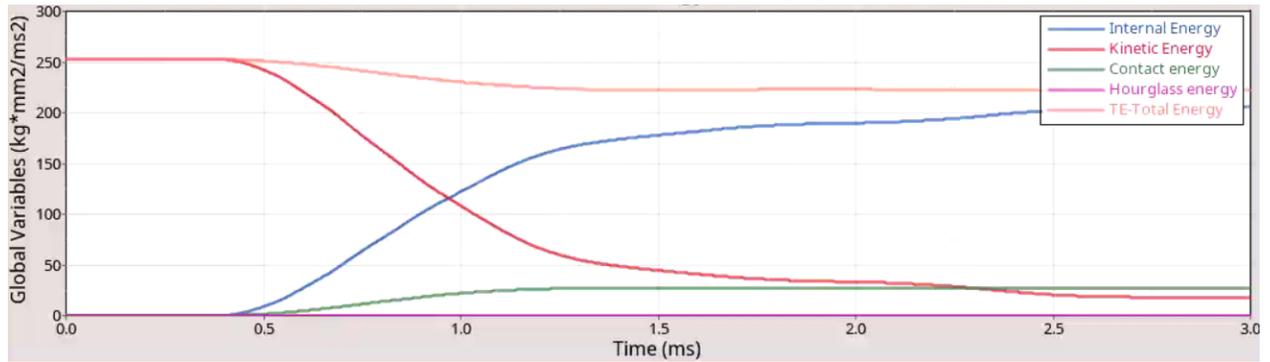


Figura 6.7: Tipico output energetico in Radioss

Definizione dei contatti

Senza la definizione di opportune leggi di contatto tra i corpi coinvolti nell'analisi, può accadere che alcune componenti non partecipino correttamente all'interno della simulazione, oppure si può avere che i corpi si attraversino l'un l'altro senza ottenere alcun tipo di interazione. Risulta quindi fondamentale definire opportunamente il tipo di contatto e gli elementi, nodi, superfici o volumi coinvolti per riprodurre accuratamente il fenomeno da analizzare.

Il software utilizza due approcci matematici differenti per la definizione dei contatti [28]:

- **Formulazione penalty**
Una volta definiti nodi primari e secondari, il software valuta la distanza tra i due durante il calcolo e verifica la presenza o meno di penetrazione: se questa è presente, il software aggiunge una spring con rigidità che si aggiunge a quella degli elementi e va a modificare eventualmente il time step dell'elemento. Questa spring rappresenta una forza di reazione che tende a spingere via il nodo secondario. La spring viene rimossa quando i nodi sono a distanza sufficiente tra loro. Si tratta della formulazione più semplice da utilizzare e più utilizzata nelle simulazioni.
- **Metodo dei moltiplicatori lagrangiani**
Formulazione puramente matematica che non necessita di spring. Aumenta però i tempi di calcolo e la formulazione non è compatibile con l'inserimento dell'attrito.

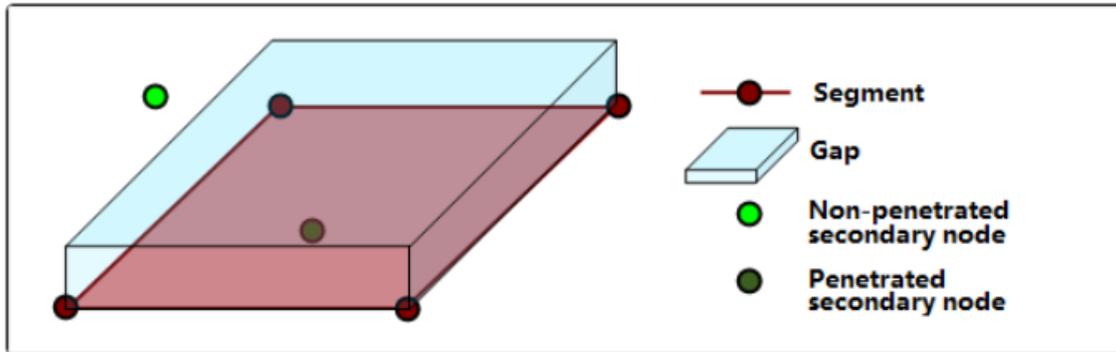


Figura 6.8: Valutazione penetrazione tra nodi con penalty formulation [28]

All'interno del software, esistono vari tipi di leggi di contatto differenti: di seguito vengono descritti i tipi principali di interfaccia che saranno utilizzati nella modellazione numerica del test sperimentale.

- INTER/TYPE7

Il contatto TYPE 7 è un contatto di utilizzo generale che va a valutare l'interazione tra nodi secondari ed una superficie principale (con relativi nodi). Si vanno quindi a definire nodi master e nodi slave. Il compito principale dell'interfaccia è quello di valutare il gap tra i nodi dei corpi in contatto per poi poter procedere con la formulazione selezionata tra quelle descritte in precedenza. Il gap in questo caso è di forma cilindrica per una migliore gestione di contatto ed energie [29].

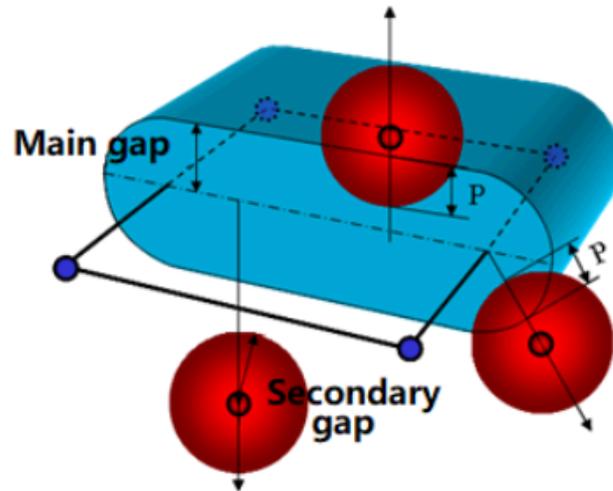


Figura 6.9: Valutazione gap nell'interfaccia TYPE7 [29]

- INTER/TYPE19

Il contatto TYPE19 è l'unione tra un contatto edge to edge (TYPE11) e due contatti TYPE7 simmetrici. Permette quindi di ottenere una gestione del contatto analoga al TYPE7 ma che comprende anche il contatto edge to edge (ovvero contatti tra segmenti e bordi degli elementi). Si ottiene quindi un tipo di interfaccia più completa ma più importante dal punto di vista computazionale rispetto ad una singola TYPE7.

- INTER/TYPE2

L'interfaccia TYPE2 non viene gestita dal software come una legge di contatto, ma come un vincolo cinematico: essa consiste infatti in una connessione rigida tra nodi ed una superficie principale di riferimento. Permette quindi di vincolare elementi distanti o non collegati tra loro [30].

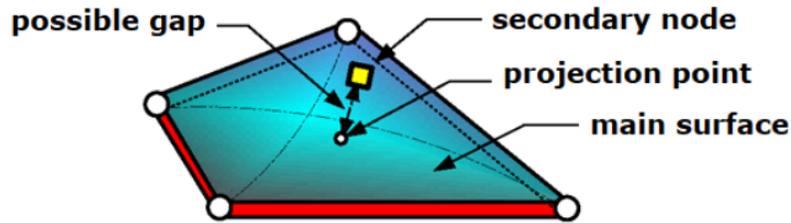


Figura 6.10: Particolare dell'interfaccia TYPE2 [30]

6.2 Modellazione piastre e proiettili

Modellazione provino e mesh

Il primo passo per la realizzazione del modello è stato quello di creare la piastra ed i rinforzi in Hypermesh: la rappresentazione tecnica dei provini e la laminazione del composito sono indicate in Figura [6.11],[6.12], [6.13]. Le rappresentazioni tecniche sono state fornite da Production Group.

Modellazione dei proiettili

A partire dagli schemi mostrati in figura 6.14, i proiettili sono stati realizzati direttamente utilizzando Hypermesh. In particolare, il proiettile tipo 2 'e realizzato prendendo come riferimento la norma NF F07-101, con alcune variazioni. Una volta realizzate le superfici, i proiettili sono stati modellati utilizzando elementi shell quad 2D, impostandone gli spessori come indicato nelle rappresentazioni in figura 6.16 ed utilizzando come riferimento la linea di mezzeria del proiettile per definire le superfici in cui è stata poi effettuata la mesh.

Una volta realizzati, i proiettili sono stati opportunamente posizionati in prossimità della piastra come da test sperimentale.

L'alluminio di cui è composto il proiettile viene in questo caso inserito come materiale elastico (MAT/LAW1) e non come materiale elasto-plastico come nel caso della piastra, poichè il suo comportamento a deformazione non è di elevato interesse nella trattazione e porterebbe quindi solo a più difficoltà dal punto di vista computazionale e di inserimento delle proprietà del materiale.

Una volta posizionati, i proiettili sono stati impostati come corpi rigidi, ovvero è stato impedito agli elementi del proiettile di subire deformazioni. Questa considerazione deriva dal fatto che i proiettili dopo l'impatto non risultano danneggiati in maniera tale da considerare la loro deformazione influente dal punto di vista dell'impatto (per esempio dal punto di vista energetico o del comportamento della piastra in prossimità della punta del proiettile). Per rendere il proiettile rigido, è stato utilizzato il comando 1D rigid e tutti i nodi del proiettile sono stati selezionati. Il software va quindi a calcolare e creare un nodo a cui tutti

questi nodi vengono collegati. Questo porta alla creazione di un set di nodi che comprende i nodi del proiettile ed un nuovo componente che rappresenta il rigido nel file di input. La formulazione rigida comporta due vantaggi: il primo è quello di dover impostare la velocità iniziale del proiettile solo nel nodo master, ovvero quello creato dal software, mentre il secondo è quello di ridurre i tempi di calcolo in maniera considerevole poichè il proiettile non subisce deformazioni.

Modellazione piastra e rinforzi

Piastra e rinforzi sono stati riprodotti anch'essi su Hypermesh seguendo lo schema dei provini in figura 6.11. Come per i proiettili, è stata impostata una mesh quad 2D più una minima percentuale di elementi 2D tria in alcuni dei bordi dei rinforzi, con i corretti valori di spessore.

Una volta realizzata la mesh, la piastra ed i rinforzi sono stati ruotati opportunamente per riprodurre il posizionamento descritto nel setup sperimentale. Nel provino metallico, come descritto in figura 6.11, sono presenti delle saldature tra piastra e rinforzi. Queste sono state riprodotte inserendo appositamente un unico elemento 2D lungo lo spessore laddove presenti.

La piastra è stata infine incastrata impostando le opportune condizioni al contorno, selezionando i nodi degli elementi presenti lungo tutti i bordi del provino.

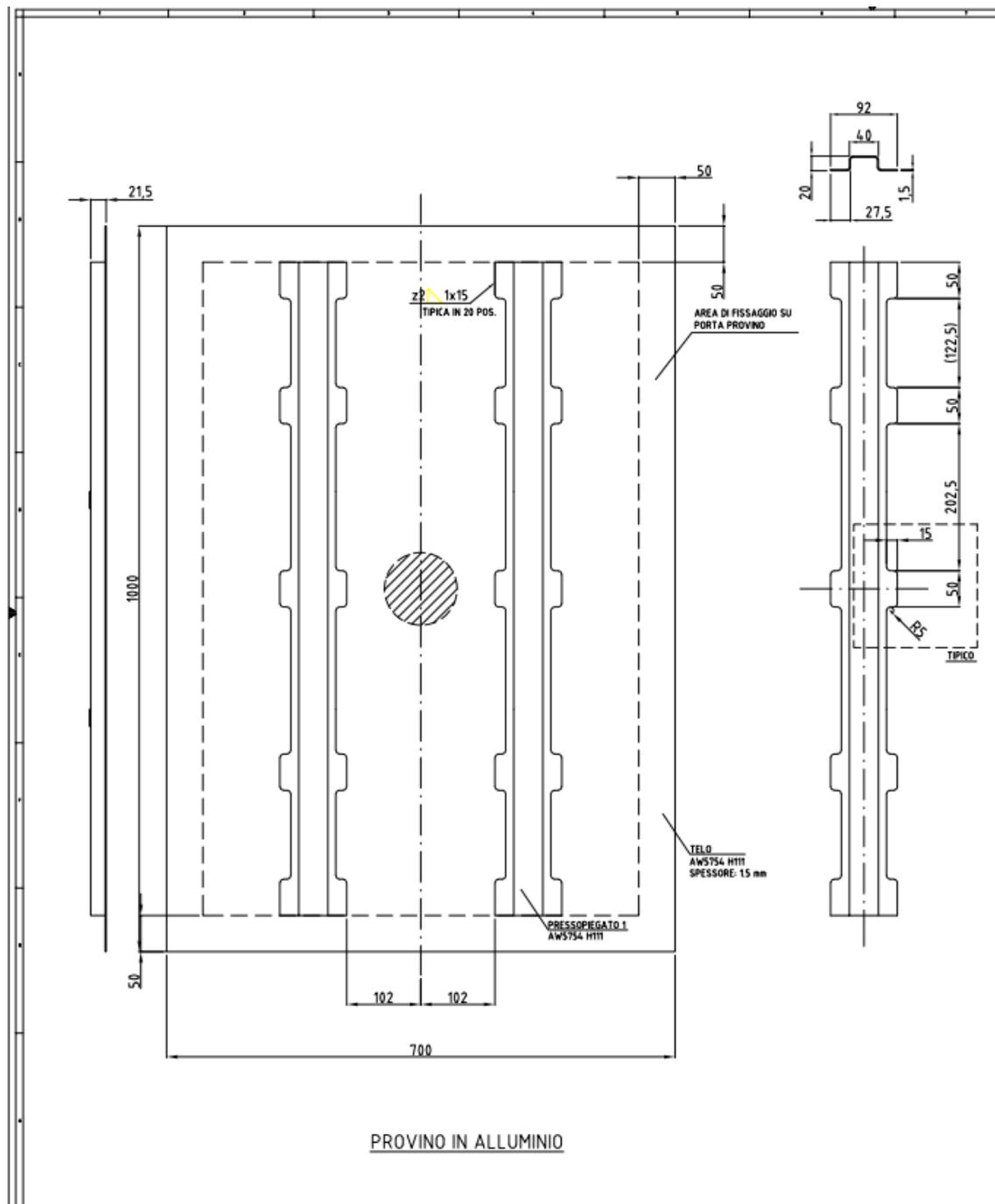


Figura 6.11: Rappresentazione provino in metallo

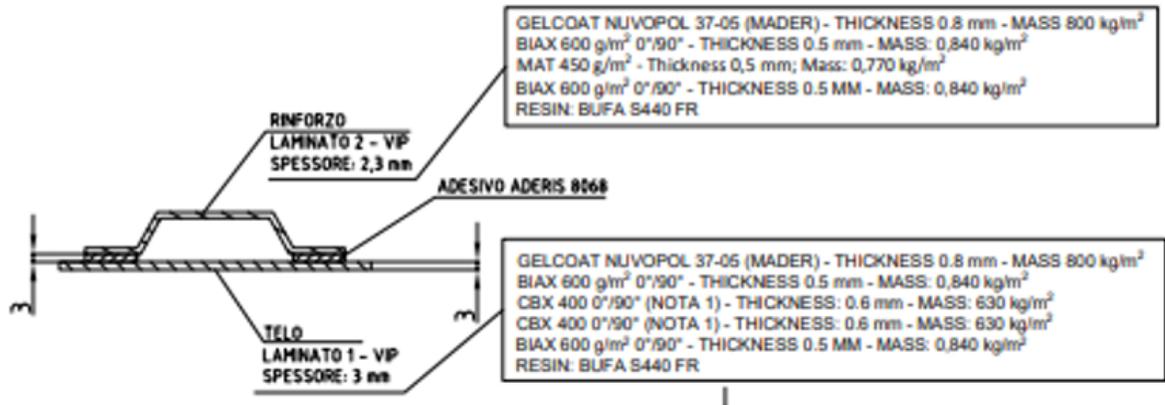


Figura 6.13: Particolare laminazione provino in composito

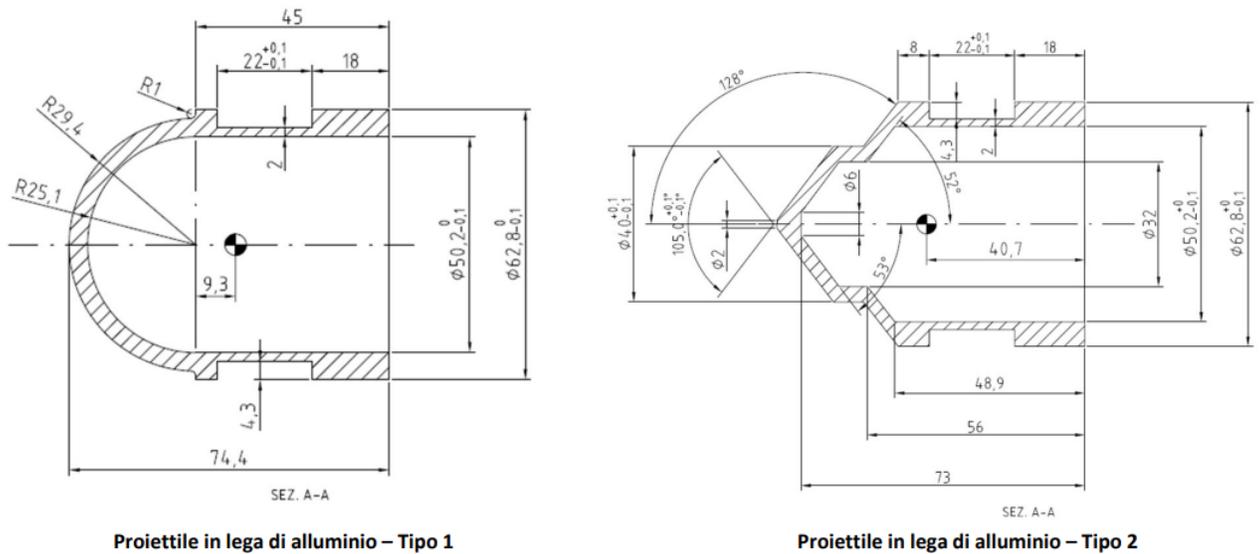


Figura 6.14: Schema dei proiettili

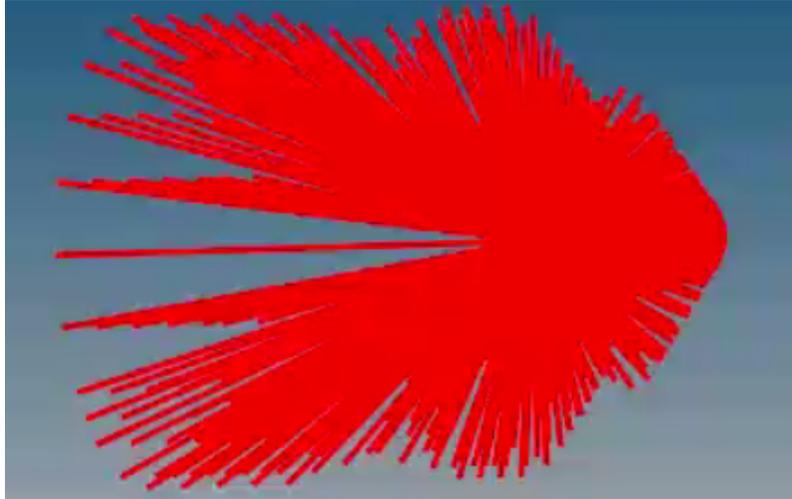


Figura 6.15: Corpo rigido con nodi del proiettile

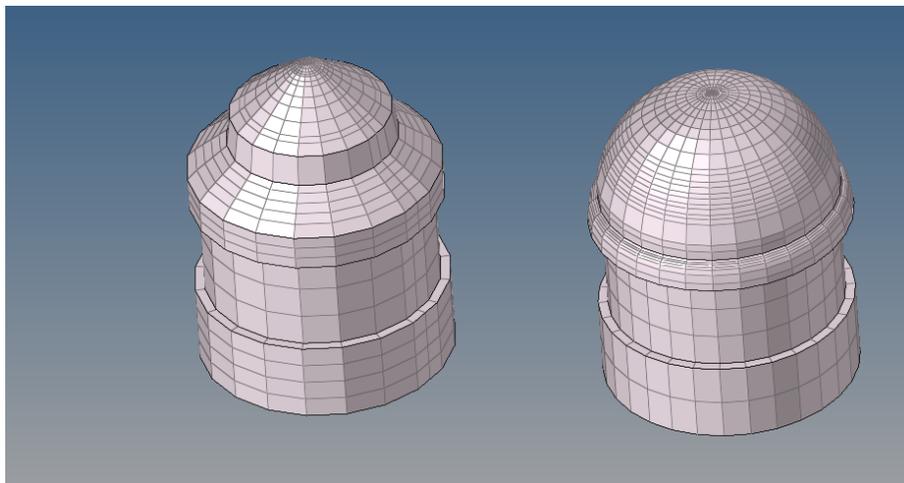


Figura 6.16: Proiettili modellati con mesh 2D

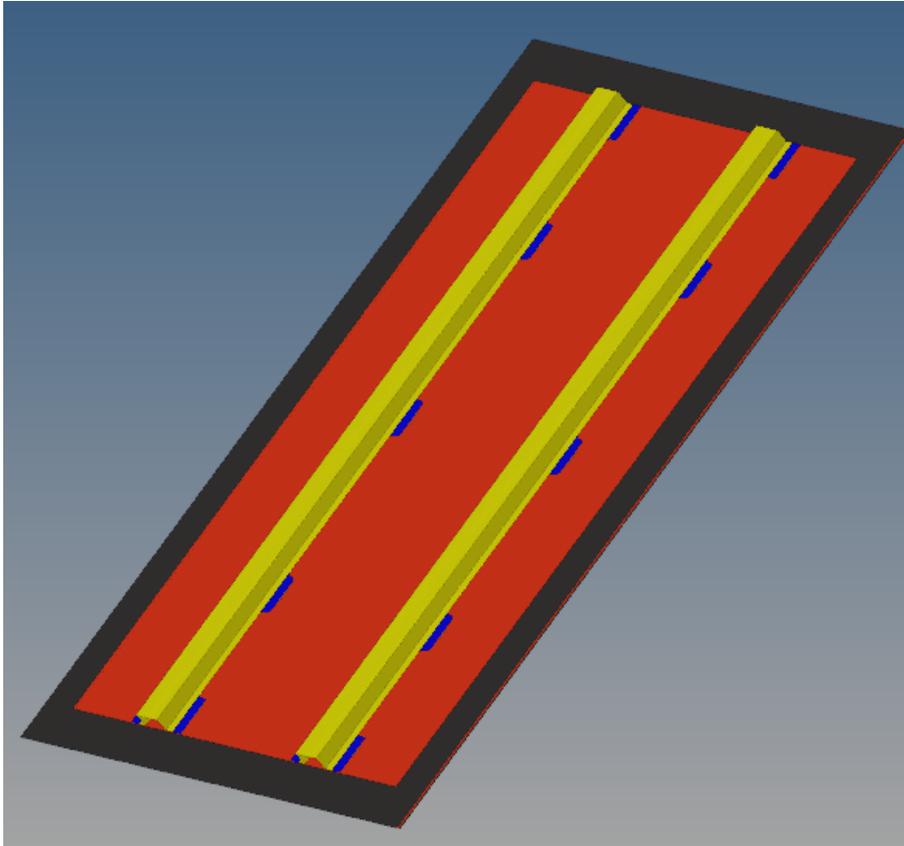


Figura 6.17: Modello piastra FEM, vista posteriore

6.3 Modellazione del provino in alluminio

6.3.1 Definizione di proprietà, materiali e contatti del test con provino in alluminio

Una volta definite le superfici di piastra e rinforzi, la proprietà P1 SHELL con opzione QEPH è stata utilizzata per definire gli elementi 2D della mesh: si tratta di un'opzione che permette di ottenere risultati con errori minimi dal punto di vista energetico e che porta a risultati pressochè identici a quelli di un elemento fully integrated, riducendo inoltre i tempi di calcolo richiesti.

Anche proiettili e rinforzi sono stati realizzati con gli stessi elementi 2D.

La piastra in alluminio è realizzata in lega di alluminio AL5754 H11: l'implementazione del materiale è stata effettuata utilizzando il modello elasto-plastico di Johnson-Cook (implementato tramite MAT/LAW2 in Radioss) [31, 32]. Il modello segue un approccio sperimentale basato sulla definizione di una serie di parametri ricavati a partire dalle curve tensione-deformazione di materiali metallici e viene di seguito riportato.

Modello elasto-plastico di Johnson-Cook

Il modello di Johnson-Cook è definito dalla seguente equazione:

$$\sigma = (A + B\epsilon_p)(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})(1 - T^{*m}) \quad (6.5)$$

Dove i termine nella prima parentesi contengono i coefficienti A e B e rappresenta il contributo dato dallo strain hardening, ovvero il fenomeno di irrigidimento del materiale all'aumentare della deformazione, mentre i termini nella seconda parentesi definiscono il contributo fornito dallo strain rate e quello nella terza parentesi racchiude gli effetti della temperatura, con $T^* = \frac{T-298}{T_{melt}-298}$.

Il modello vede inoltre definita una legge di failure del materiale, espressa da:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2(\exp D_3\sigma^*)](1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}))(1 + D_5 T^*) \quad (6.6)$$

In cui l'allungamento a rottura vede contributi descritti dai coefficienti D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 :

- D_1, D_2, D_3 definiscono i contributi della triassialità delle tensioni
- D_4 definisce il contributo dello strain rate

- D_5 definisce il contributo della temperatura

In assenza di curve caratteristiche del materiale utilizzato per il provino ma conoscendo il tipo di alluminio di cui è composto il provino, i parametri del modello sono stati inseriti utilizzando valori disponibili in letteratura e sono indicati in figura 6.18 e in figura 6.19 . Entrambi i modelli sono stati implementati per verificare se ci fossero differenze sostanziali tra i due e per stabilire quale fosse il più adatto alla simulazione numerica.

Parameter	AA 2024-T351	AA 5754-H11	AA 6082-T6
Elasticity			
E (GPa)	70	68	70
ν (-)	0.3	0.3	0.3
Thermoviscoplastic behavior			
A (MPa)	352	28.13	201.55
B (MPa)	440	278.67	250.87
n (-)	0.42	0.183	0.206
$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)	3.3×10^{-4}	0.1	0.001
C (-)	0.0083	0.00439	0.00977
m (-)	1.7	2.527	1.31
Other physical constants			
ρ (kg/m ³)	2700	2700	2700
β (-)	0.9	0.9	0.9
C_p (J/kg K)	900	900	900
T_0 (K)	293	293	293
T_m (K)	775	873	855

Figura 6.18: Tabella coefficienti johnson-cook Al5754 modello 1 [33]

	A	B	n	C	m
AA5754					
Estimate	67.456	471.242	0.424	0.003	2.519

Figura 6.19: Tabella coefficienti johnson-cook Al5754 modello 2 [18]

Si è scelto di non introdurre la failure tramite l'opzione apposita definita dal modello Johnson-Cook descritto in precedenza, ma di definire la rottura mediante deformazione plastica limite inserendo un valore adeguato di ϵ_{pmax} nella $MAT/LAW2$, in particolare perchè non sono disponibili valori riguardanti i parametri del failure model o le curve del materiale specifico in queste condizioni specifiche di prova (la curva del materiale è stata ricercata e ottenuta da articoli scientifici e non da test specifici sul materiale) . Il valore

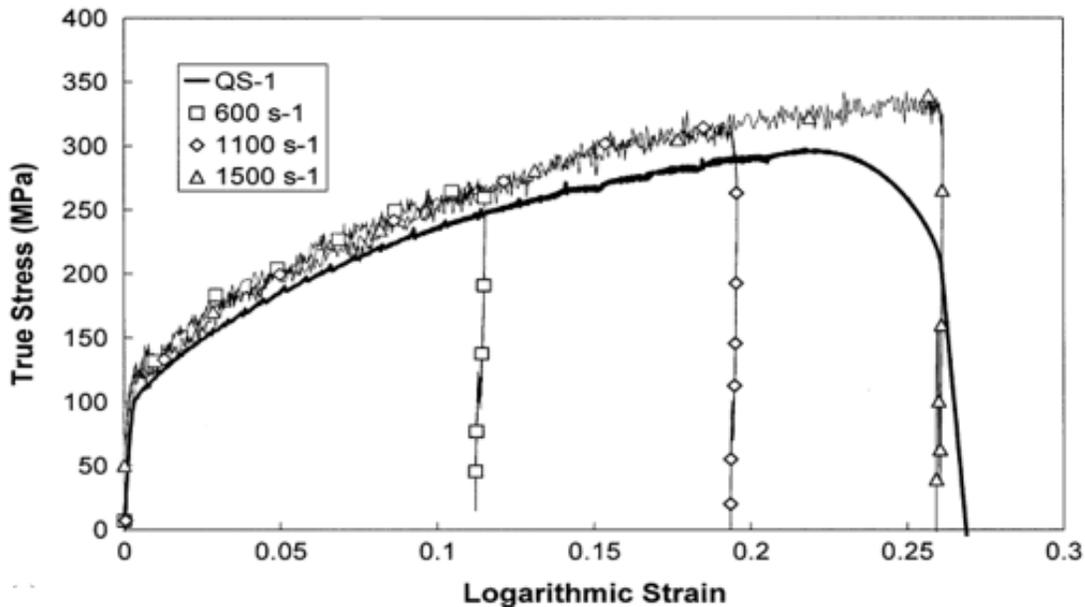


Figura 6.20: Curva riferimento Al5754 modello 2 [18]

di deformazione plastica, ovvero la deformazione permanente subita dal materiale dopo il valore di deformazione di snervamento massimo utilizzato, è molto elevato (0.58 in questo caso), superiore rispetto al valore di rottura statico (0.20 circa per il materiale utilizzato). Questo si giustifica principalmente per due motivi:

- **Valutazione dinamica del metallo ed influenza dello strain rate** Osservando casi dinamici di metalli in letteratura, si vede come le proprietà di una grande varietà di metalli come allumini e acciai e relative leghe metalliche vedano un incremento molto importante di carico di rottura e di allungamento a rottura in situazioni in cui la dinamica del fenomeno di sollecitazione del materiale non è trascurabile. Questo fenomeno è tanto più importante tanto più rapida è la sollecitazione ed è difficile ricavare analiticamente valori corretti delle caratteristiche meccaniche in queste condizioni. Questo è dovuto ad una grande serie di fattori (triassalità degli stress, strain rate, temperatura, ecc) coinvolti. Per questo motivo, in molte valutazioni numeriche fortemente dinamiche, si tende in alcuni casi a modificare verso l'alto il valore di allungamento a rottura di questi materiali per ottenere risultati correlabili con le misurazioni sperimentali.
- **Concentrazione delle deformazioni su pochi elementi del modello FEM**
 Analizzando alcuni modelli numerici, si può notare come, di tutti gli elementi, solo una piccola parte di questi sono estremamente sollecitati. La deformazione plastica

che questi elementi subiscono, quindi, tende ad essere più elevata di quella che effettivamente subisce la struttura valutandola rispetto agli altri elementi o al caso reale. Questo fenomeno è particolarmente rilevante in situazioni dinamiche e, in questo caso d'interesse, andrebbe focalizzata in prossimità della zona impattata dalla punta del proiettile. Esiste un procedimento analitico basato sulla curva del materiale e sul provino utilizzato per la valutazione delle curve che permette di evidenziare questo fenomeno. Questa formulazione non va in alcun modo a modificare le caratteristiche della curva del materiale e quindi delle sue proprietà fisiche, ma permette unicamente di tenere conto di una possibile fonte di errore nella valutazione del fenomeno dinamico dal punto di vista puramente numerico.

Il metodo di seguito riportato, come descritto in [34], è così definito :

si supponga inizialmente di considerare una trave suddivisa in 2 elementi come rappresentato in figura 6.21 e raffigurativa del provino o della porzione di provino in esame, con uno di questi elementi maggiormente sollecitato rispetto all'altro o agli altri; lo strain locale sarà definito come:

$$\epsilon = \ln \frac{2 \left(l - \frac{l_0}{2} \right)}{l_0} \quad (6.7)$$

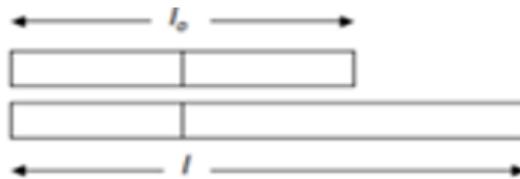


Figura 6.21: Concentrazione locale della deformazione su beam a 2 elementi

Estendendo il procedimento a 4 elementi, si ottiene:

$$\epsilon = \ln \frac{4 \left(l - \frac{3l_0}{4} \right)}{l_0} \quad (6.8)$$

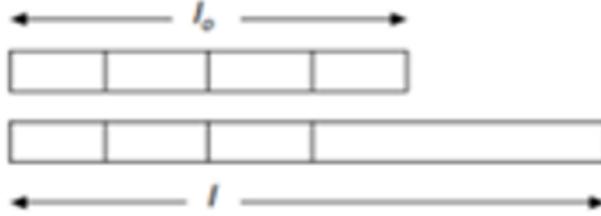


Figura 6.22: Concentrazione locale della deformazione su beam a 4 elementi

Estendendo ulteriormente e generalizzando per n elementi si ottiene:

$$\epsilon = ln \frac{n \left(l - \frac{(n-1)l_0}{n} \right)}{l_0} \quad (6.9)$$

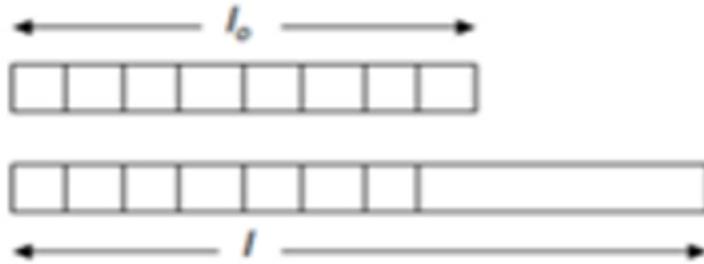


Figura 6.23: Concentrazione locale della deformazione su beam ad n elementi

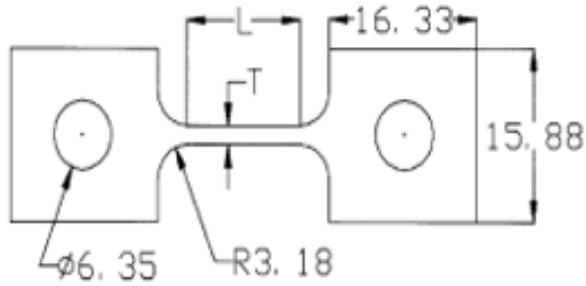
Per poter rendere questo procedimento effettivamente applicabile, si definisce la lunghezza caratteristica dell'elemento $l_c = \frac{l_0}{n}$ e la lunghezza totale finale dopo la deformazione $l = l_0 + d$ che porta ad ottenere:

$$\epsilon_{f,local} = ln \left(\frac{d}{l_c} + 1 \right) \quad (6.10)$$

rispetto a :

$$\epsilon_{f,global} = ln \left(\frac{d}{l_0} + 1 \right) \quad (6.11)$$

Per l'applicazione del metodo, le grandezze fondamentali da valutare saranno quindi proprio l_c e d . Una volta ricavati questi valori, si ricava prima il nuovo true plastic strain e poi quello effettivo ingegneristico tramite l'apposita formula.



	L	W
PRELIMINARY	3	2
FINAL	12.5	1.75

Figura 6.24: Provino considerato [18]

AL5754							
TRACTION Provino Fisico				Provino Virtuale			
L [mm]	12.5			mesh size	3.4		
t [mm]	1.75			n. Elm in L	4		
Eps_r	22.00%	ΔL [mm]	2.75	Necking et	->	Elm1 Δl	2.75
		Eps_yield	0.2%			Eps Elm1	80.88%
		Sig_yiled	350			Elm1 Eps_Plast	80.68%
		Eps_Plast_El	21.80%			Elm1 Eps_plast	59.16%
		Eps_plast_Tr	19.72%				

Rimodulazione plastic strain per AL5754

Figura 6.25: Metodologia applicata all'alluminio

Per completare il modello, sono poi stati inseriti dei contatti tra proiettile e piastra e tra rinforzi e piastra. Di seguito sono elencati e brevemente descritti, con l'ausilio della guida del software, i tipi di contatto utilizzati, :

- **Un autocontatto TYPE7 tra piastra e rinforzi** L'autocontatto viene definito impostando come master e slave parti della stessa componente: in questo caso risulta utile utilizzarlo per cogliere correttamente il comportamento tra piastra e saldature durante l'urto con il proiettile.

Name	Value
Solver Keyword:	/INTER/TYPE7/
ID:	6
Name:	autocontact
Color:	
Include:	[Main Model]
User Comments:	Hide In Menu/Export
Card Image:	TYPE7
⊕ Gmod_id (S):	(19) INTER_group_19_of_SURF
⊕ Surf_id (M):	(18) INTER_group_18_of_PART
Istf:	4: Stfac is a stiffness scale factor and the interface st...
lthe:	0: No heat transfer
Igap:	1: Variable gap varies according to the characteristic...
lbag:	0: Default
ldel:	2: When a element is deleted, the corresponding seg...
lcurv:	0: No curvature
ladm:	0: Not activated (default)
Fpenmax:	0.0
Stmin:	0.0
Stmax:	0.0
dtmin:	0.0
Irem_gap:	0: Default, set to value defined in /DEFAULT/INTER/TY...
Irem_j2:	0: Default, set to value defined in /DEFAULT/INTER/TY...
Stfac:	0.0

Figura 6.26: Parametri selezionati per contatto type 7

- Un contatto TYPE19 tra proiettile e piastra

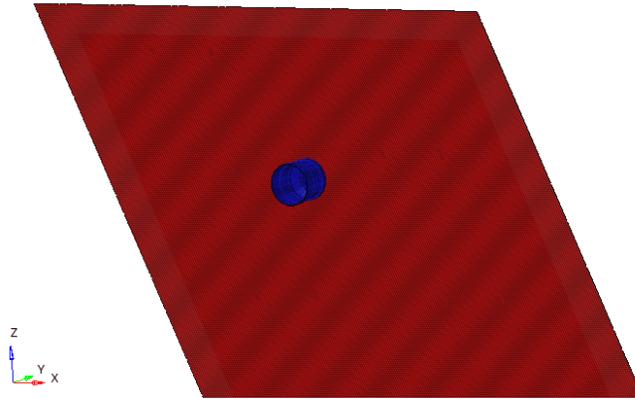


Figura 6.27: Contatto TYPE 19: particolare di piastra (slave, in rosso) e proiettile (master, in blu)

Name	Value
Solver Keyword:	/INTER/TYPE19/
ID:	3
Name:	type19_contatto
Color:	■
Include:	(1) provino_1meta
User Comments:	Hide In Menu/Export
Card Image:	TYPE19
Surf_id2 (S):	(4) SURF_piastra
Surf_id1 (M):	(11) surf_proiettile
Istf:	2: Stfac is a stiffness scale factor and the stiffness is ..
lthe:	0: Default, No heat transfer or heat friction
lgap:	0: Default, set to the value defined in /DEFAULT/INTE...
ledge:	0: Default, set to 2
lbag:	0: Default, set to the value defined in /DEFAULT/INTE...
ldel:	2: When a element is deleted, the corresponding seg...
lcurv:	0: No curvature
Fscale_gap:	0.0
Gap_max:	0.0
Stmin:	0.0
Stmax:	0.0
dtmin:	0.0
Irem_gap:	0: Set to the value defined in /DEFAULT/INTER/TYPE19
Irem_i2:	0: Set to the value defined in /DEFAULT/INTER/TYPE19

Figura 6.28: Parametri selezionati per contatto type 19

- Un contatto TYPE2 tra telo e piastra

Name	Value
Solver Keyword:	/INTER/TYPE2/
ID:	8
Name:	group1
Color:	
Include:	[Main Model]
User Comments:	Hide In Menu/Export
Card Image:	TYPE2
<input checked="" type="checkbox"/> Gnod_id (S):	(6) nodi_telo_sup
<input checked="" type="checkbox"/> Surf_id (M):	(4) SURF_piastra
Ignore:	0: Default, set to the value defined in /DEFAULT/..
Spotflag:	28: Mixed formulation, similar to spotflag1 with ...
Level:	
Isearch:	
Idel2:	
dsearch:	2.0
Stfac:	
Visc:	
Istf:	
Heat_Transfer_Options:	<input type="checkbox"/>

Figura 6.29: Parametri impostati per contatto type 2

Per la definizione dell'impatto, è stata infine assegnata una velocità iniziale utilizzando il comando INIVEL e indicando un valore di 58 m/s come velocità in direzione Y nel sistema di riferimento globale. Va precisato che il valore di velocità utilizzato risulta leggermente inferiore ai 59 m/s ricavati sperimentalmente, questo per via di un valore leggermente più elevato di massa nel proiettile numerico rispetto a quello sperimentale: effettuando questo accorgimento, il valore di energia cinetica rilevato, ovvero il parametro principale di interesse, risulta molto accurato rispetto a quello rilevato sperimentalmente. L'errore risiede principalmente in una difficoltà di riproduzione della corretta curvatura della punta del proiettile 1 utilizzato in questa prova che porta ad un eccesso di circa 10 grammi rispetto ai 140 circa dichiarati da Production Group).

Verrà effettuata sia una simulazione con rigido che una simulazione con corpo deformabile: in questo caso, per assegnare la velocità basta effettuare lo stesso procedimento utilizzato per il caso con corpo rigido, ma selezionando tutti i nodi del proiettile.

6.3.2 Risultati numerici del test con provino in alluminio

Per descrivere accuratamente l'impatto, un tempo di 3ms e successivamente 5ms è stato impostato nell'engine file da fornire al solutore, ovvero il file che contiene le direttive di simulazione e le richieste di output del calcolo.

La scelta del tempo dipende principalmente dal fatto che questa finestra temporale impostata permette di rappresentare in maniera sufficientemente completa l'impatto e il successivo comportamento del proiettile. Inoltre, permette alla piastra di rilassarsi sufficientemente per effettuare misurazioni in condizioni simili a quelle effettuate sperimentalmente.

I parametri più importanti chiesti in output sono stati plastic strain, spostamenti, andamento delle energie durante l'impatto e forza di contatto. Per le energie e le forze di contatto, è stato chiesto in output un file T01 specifico visualizzabile su Hypergraph 2D.

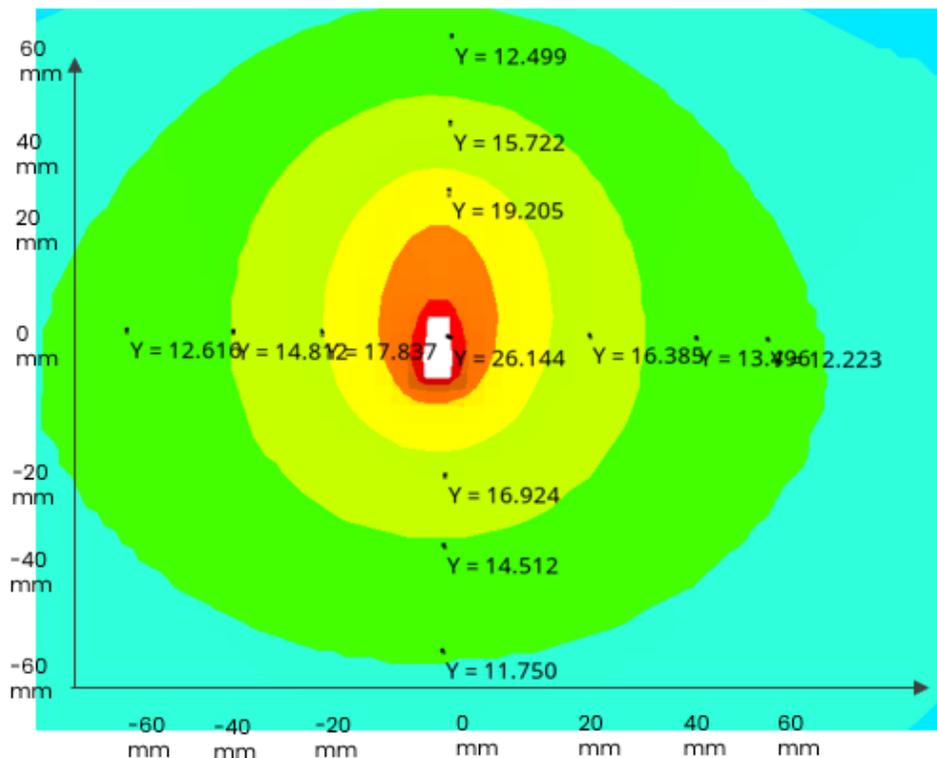


Figura 6.30: Displacement provino in alluminio dopo 3 ms

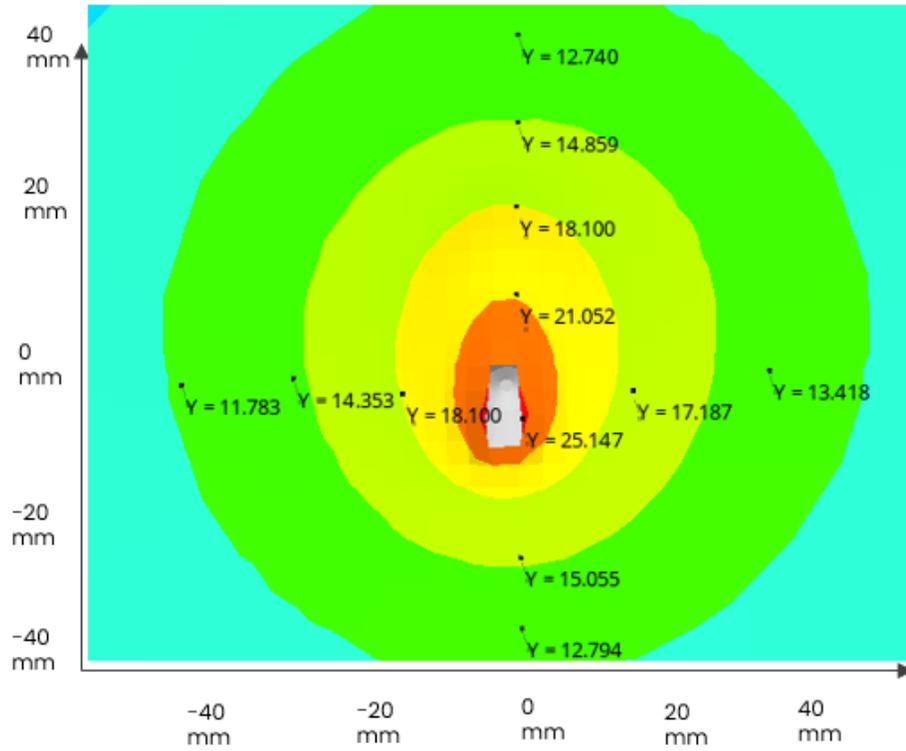


Figura 6.31: Particolare del displacement del provino in alluminio dopo 5 ms, centro della zona impattata

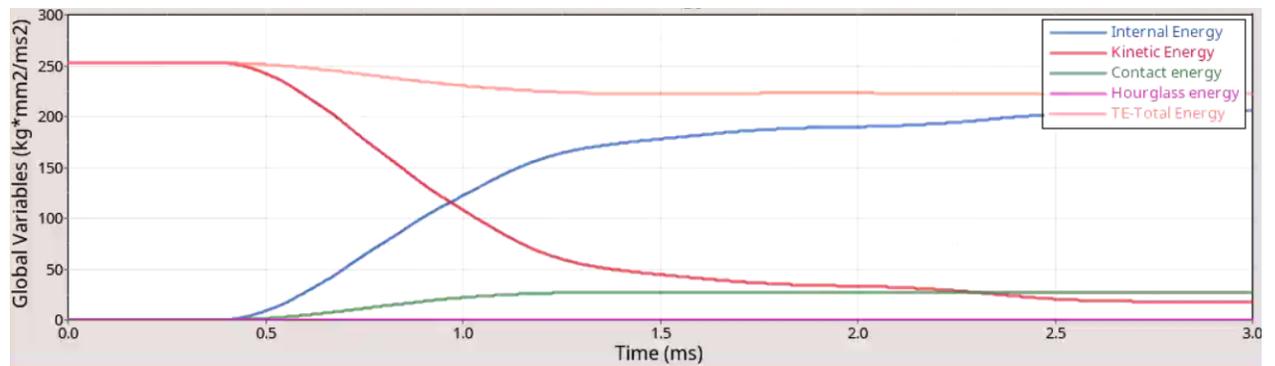


Figura 6.32: Grafico energie test numerico con provino in alluminio, prova fino a 3 ms

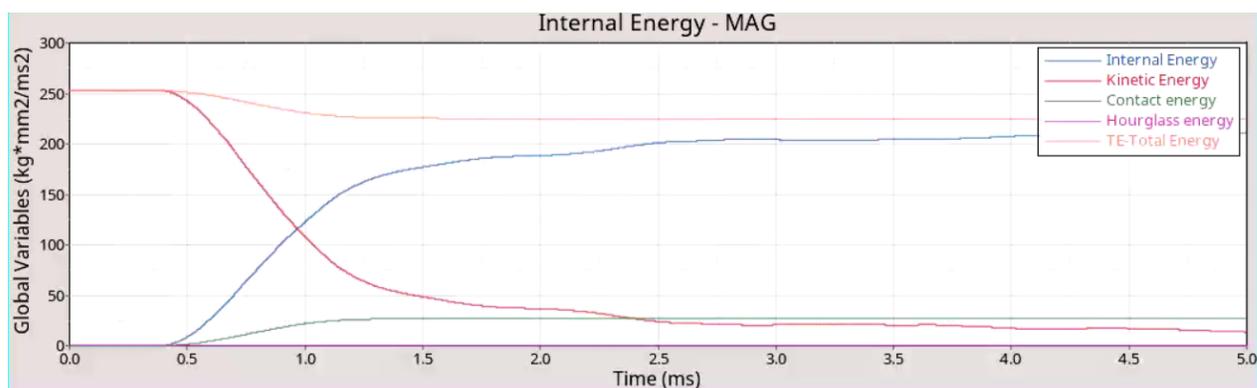


Figura 6.33: Grafico energie test numerico con provino in alluminio, prova fino a 5 ms

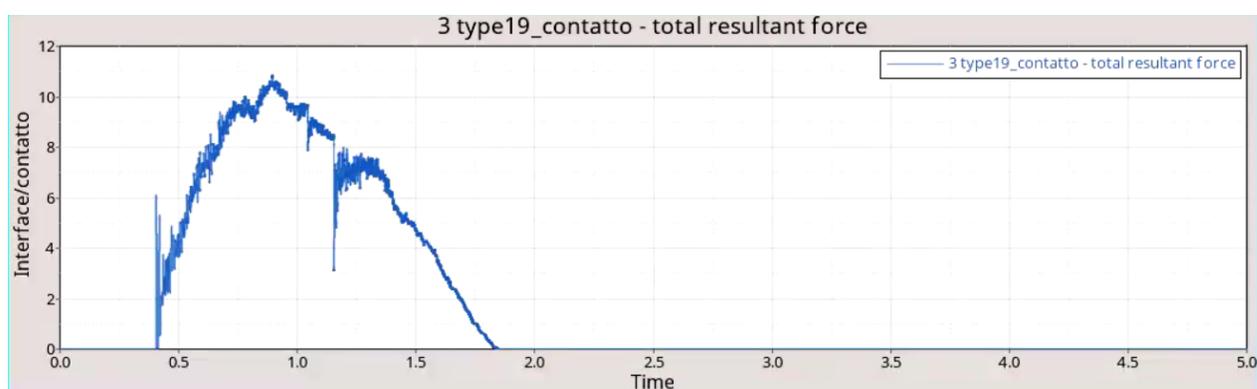


Figura 6.34: Forza di contatto test numerico con provino in alluminio (ordinata in kN, tempo in ms)

6.4 Modellazione numerica del test con provino in composito

6.4.1 Setup del modello in composito

Il provino FEM in composito non vede particolari differenze nella forma rispetto al provino metallico: in particolare, varia lo spessore (3mm invece che 1.5mm) e varia leggermente la forma dei rinforzi, in cui le saldature sono state rimosse e sostituite con l'adesivo ADERIS. In questo test i rinforzi sono quindi incollati alla piastra tramite lo stesso tipo di Tie utilizzato precedentemente tra telo e piastra.

Il contatto tra proiettile e piastra rimane invariato rispetto al caso precedente. Viene invece aumentata la lunghezza degli elementi della piastra, con lunghezza del singolo elemento pari a 5 mm. Varia inoltre il tipo di elemento 2D utilizzato: si passa dal QEPH descritto

prima ad un elemento fully integrated, poichè la legge del materiale utilizzata risulta poco compatibile con quel tipo di elemento, come descritto dalla guida del software. I vari layer del composito sono composti da fibre intrecciate in direzione 0/90 e presentano le caratteristiche meccaniche definite in Figura 6.35.

In particolare, i valori in verde sono stati ipotizzati in base ad assunzioni sui compositi e sulle curve dei test effettuati, dove disponibili. I valori vuoti o sbarrati sono invece valori non richiesti nel modello numerico e che sono stati omessi. Va inoltre sottolineato che i dati si riferiscono a proprietà ricavate tramite test statici effettuati su compositi costituiti dalle stesse fibre ma con matrice differente, seppur con lo stesso processo produttivo.

Non avendo a disposizione le proprietà meccaniche della resina o delle fibre del composito presi singolarmente, ma solo quelle dei laminati già impregnati di resina, è stato scelto di fare riferimento alla resina Büfa S425 ed al relativo datasheet delle proprietà meccaniche per tutti i laminati e definire così la E33 (sulla base del modello 2D implementato, valori leggermente differenti delle proprietà meccaniche della resina sono verosimilmente poco influenti dal punto di vista dei risultati ottenibili. Un'altra opzione considerata è stata quella di imporre E33=E22, ottenendo però risultati pressochè identici.).

	fiber	resin				fiber	resin				fiber	resin				
LAYER 1	E-BX600,	BUFA S425				LAYER 2	CBX400	NUVOCRYL 60-100			RINFORZ	MAT450,	BUFA S440			
thickness	0.5	mm				thickness	0.6	mm			thickness	0.5	mm			
	Density					Density					Density					
	0.84	kg/m2				0.63	Kg/m2				0.77	Kg/m2				
	1.68E-06	kg/mm3				1.05E-06	Kg/mm3				1.54E-06	Kg/mm3				
E11	23.94	[GPa]				E11	49.58	[GPa]			E11	5.84	[GPa]			
E22	20.16	[GPa]				E22	49.58	[GPa]			E22	6.27	[GPa]			
v12	0.3					v12	0.3				v12	0.3				
v13	-					v13	-				v13	-				
v23	-					v23	-				v23	-				
E33	3.4	[GPa]				E33	3.4	[GPa]			E33	3.4	[GPa]			
G12	1.7	[GPa]				G12	3.19	[GPa]			G12	4.3	[GPa]			
G23	1.7	[GPa]				G23	3.19	[GPa]			G23	4.3	[GPa]			
G31	1.7	[GPa]				G31	3.19	[GPa]			G31	4.3	[GPa]			
S11	0.4879	[GPa]				S11	0.5888	[GPa]			S11	0.0676	[GPa]			
S12	0.031	[GPa]				S12	0.03158	[GPa]			S12	0.04	[GPa]			
S22	0.4333	[GPa]				S22	0.5888	[GPa]			S22	0.0768	[GPa]			
S33	0.055	[GPa]				S33	0.055	[GPa]			S33	0.55	[GPa]			
ISS	0.021	[GPa]				ISS	-	[GPa]			ISS	0.021	[GPa]			
C11	0.375	[GPa]				C11	0.2456	[GPa]			C11	0.1378	[GPa]			
C22	0.394	[GPa]				C22	0.2456	[GPa]			C22	0.1458	[GPa]			
C12	-	[GPa]				C12	-	[GPa]			C12	-	[GPa]			
eps11	2.53	[%]				eps11	1.17	[%]			eps11	1.6	[%]			
eps22	2.8	[%]				eps22	1.17	[%]			eps22	1.84	[%]			
eps12	-	[%]				eps12	-	[%]			eps12	-	[%]			
eps33	-	[%]				eps33	-	[%]			eps33	-	[%]			
eps11c	-	[%]				eps11c	-	[%]			eps11c	-	[%]			
eps22c	-	[%]				eps22c	-	[%]			eps22c	-	[%]			

Figura 6.35: Proprietà dei compositi del provino

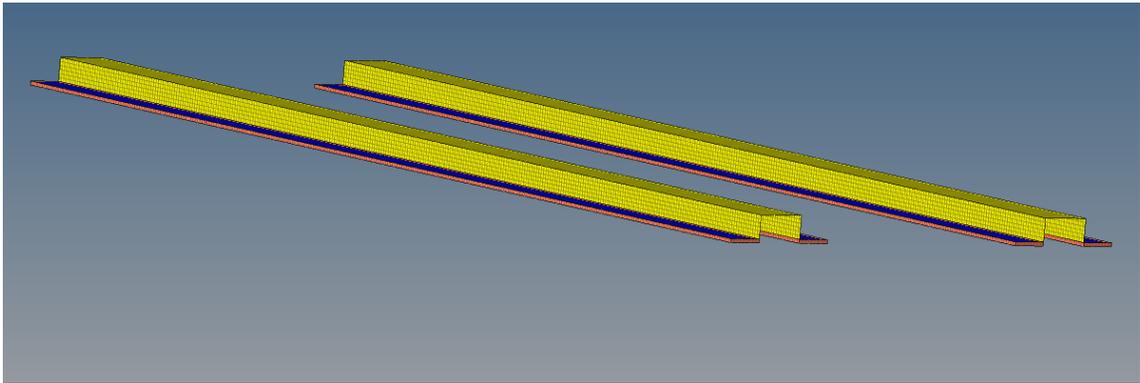


Figura 6.36: Rinforzi del provino in composito

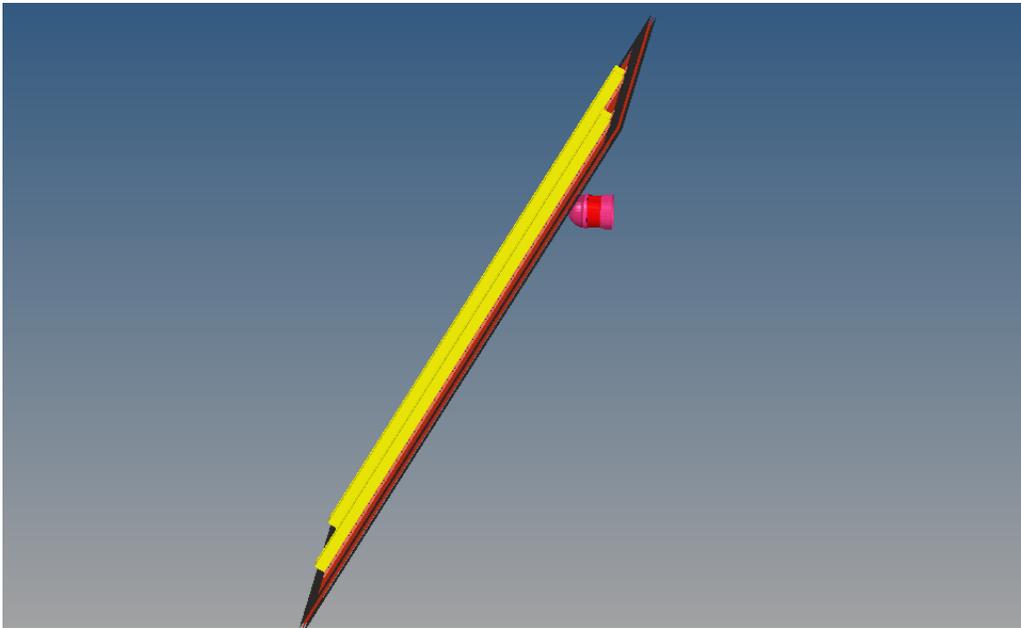


Figura 6.37: Setup FEM completo del provino in composito (piastra inclinata e proiettile orientato)

Per quanto riguarda le proprietà degli elementi da inserire nel software, il provino è stato realizzato utilizzando la proprietà `/PROP/TYPE11(SH_SANDW)`: questa proprietà permette di modellare la piastra utilizzando elementi 2D.

All'interno della proprietà viene definito il composito layer per layer inserendo opportunamente materiale, spessore e orientamento di ogni singolo strato.

Per definire il corretto orientamento dei vari layer, sono stati definiti dei sistemi di riferimento opportuni associati alla proprietà del composito.

Il software definisce l'orientamento delle lamine come in Figura 6.39 , dove la componente X del sistema di riferimento associato alla proprietà viene proiettata sulla superficie dell'elemento shell e le direzioni vengono definite in base all'angolo ϕ definito nella proprietà, per ogni singolo layer.

La direzione 1 del laminato è definita tramite ϕ , mentre la direzione 2 è ruotata di 90° rispetto ad essa.

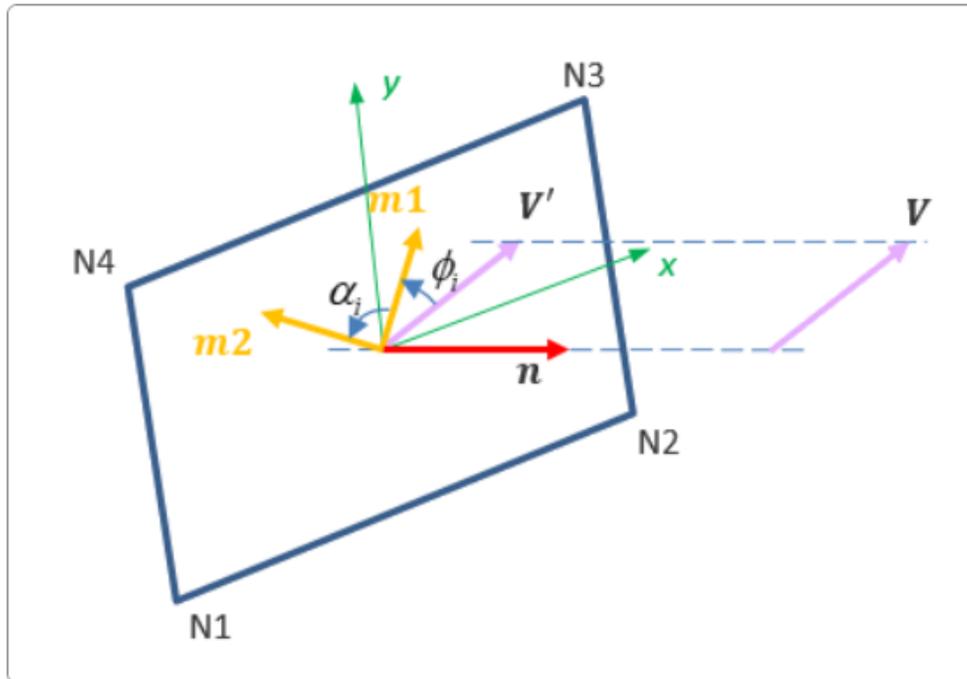


Figura 6.38: definizione direzione lamina in Radioss [35]

I materiali dei vari layer sono stati inseriti utilizzando la /MAT/LAW25 (COMPSH), basata sul modello Tsai-Wu per i compositi.

La formulazione di Tsai-Wu definisce, sulla base dei valori inseriti, il seguente criterio di failure del composito [36]:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_{12} + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (6.12)$$

Se l'equazione è verificata, si ha rottura della lamina. Le F_i sono definite nel seguente modo

$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1}{\sigma_1^{RT}} - \frac{1}{\sigma_1^{RC}} \\
F_2 &= \frac{1}{\sigma_2^{RT}} - \frac{1}{\sigma_2^{RC}} \\
F_6 &= \frac{1}{\sigma_1^{RT}} + \frac{1}{\sigma_1^{RC}} \\
F_{11} &= \frac{1}{\sigma_1^{RT} \sigma_1^{RC}} \\
F_{22} &= \frac{1}{\sigma_2^{RT} \sigma_2^{RC}} \\
F_{66} &= \frac{1}{\sigma_{12}^{RT} \sigma_{12}^{RC}} \\
F_{12} &= \frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}}
\end{aligned} \tag{6.13}$$

Dove RT ed RC indicano rispettivamente a trazione e a compressione L'opzione utilizzata nel software è l'opzione CRASURV (crash survivability): questa vede una formulazione che si basa sempre sul criterio di Tsai-Wu, ma con un'applicazione leggermente modificata che permette di tenere conto della plasticità del materiale (il criterio di Tsai-Wu tradizionale prevede un comportamento principalmente elastico fino a rottura della prima lamina):

$$\begin{aligned}
F_1(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{1}{\sigma_1^{RT}(W_p^*, \dot{\epsilon})} - \frac{1}{\sigma_1^{RC}(W_p^*, \dot{\epsilon})} \\
F_2(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{1}{\sigma_2^{RT}(W_p^*, \dot{\epsilon})} - \frac{1}{\sigma_2^{RC}(W_p^*, \dot{\epsilon})} \\
F_6(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{1}{\sigma_1^{RT}(W_p^*, \dot{\epsilon})} + \frac{1}{\sigma_1^{RC}(W_p^*, \dot{\epsilon})} \\
F_{11}(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{1}{\sigma_1^{RT}(W_p^*, \dot{\epsilon}) \sigma_1^{RC}(W_p^*, \dot{\epsilon})} \\
F_{22}(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{1}{\sigma_2^{RT}(W_p^*, \dot{\epsilon}) \sigma_2^{RC}(W_p^*, \dot{\epsilon})} \\
F_{66}(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{1}{\sigma_{12}^{RT} \sigma_{12}^{RC}(W_p^*, \dot{\epsilon})} \\
F_{12}(W_p^*, \dot{\epsilon}) &= \frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11}(W_p^*, \dot{\epsilon}) F_{22}(W_p^*, \dot{\epsilon})}
\end{aligned} \tag{6.14}$$

Dove $W_p^* = \frac{W_p}{W_p^{ref}}$ definisce la dipendenza dal lavoro di deformazione plastica. Inoltre, la

formulazione può anche permettere di tenere conto dell'influenza dello strain rate. Anche tensioni e stress vengono modificati:

$$\sigma_i(W_p^*, \dot{\epsilon}) = \sigma_i \left(1 + b_i (W_p^*)^{n_i} \right) \left(1 + c_i \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (6.15)$$

Dove b ed n sono rispettivamente parametro ed esponente del plastic hardening. Si possono inoltre definire strain di snervamento e di failure e strain di softening del materiale. Il software procede a scalare opportunamente il modulo e gli stress del singolo elemento e a valutarne il danneggiamento e l'eventuale cancellazione dell'elemento. La cancellazione dell'elemento dipende dal parametro I_{off} utilizzato.

[37] In questo caso, è stato selezionato $I_{off}=6$, ovvero si ha cancellazione dell'elemento quando lavoro plastico massimo o failure nelle due direzioni vengono raggiunti.

Il provino in composito ultimato è illustrato in Figura 6.37

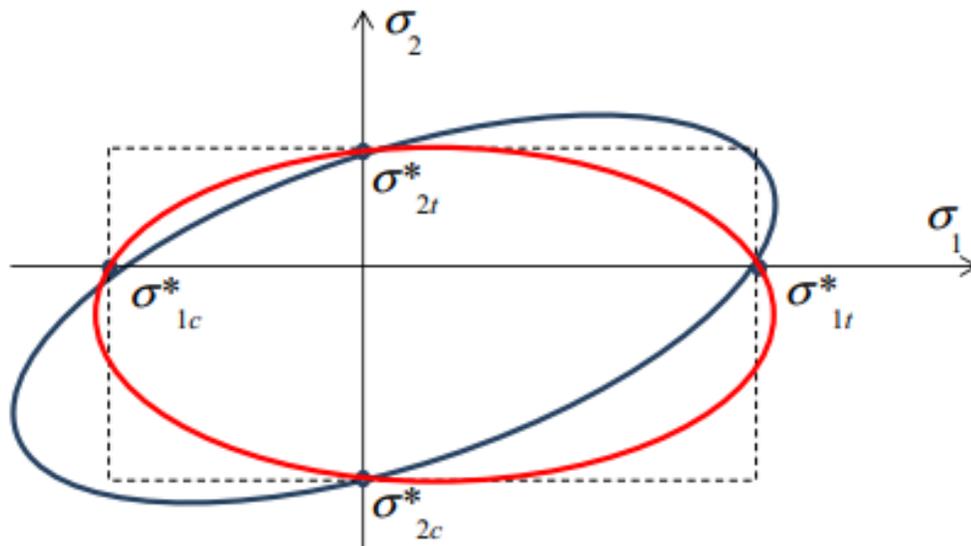


Figura 6.39: Failure loci del criterio di Tsai-Wu [38]

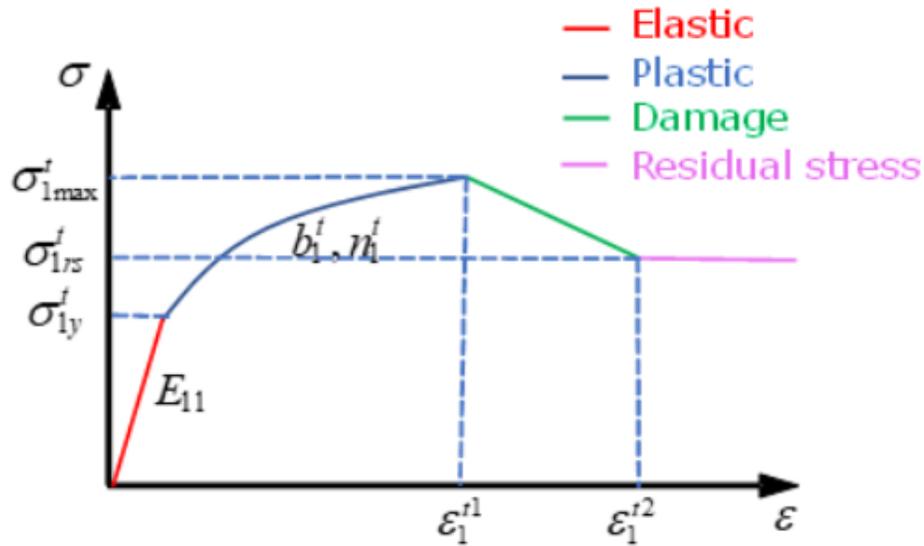


Figura 6.40: Andamento tensione-deformazione secondo criterio CRASURV

Anche in questo caso, come per il provino in metallo, è stato modificato il valore massimo di allungamento a rottura utilizzando la procedura descritta in [34]. Le uniche differenze rispetto al caso precedente sono le dimensioni del provino, il materiale e la dimensione dell'elemento della mesh. Il procedimento è stato ripetuto per ogni direzione del composito richiesta dalla legge del materiale utilizzata nel software. Inoltre, in figura 6.41 è messo in evidenza come sia stata utilizzata la formulazione CRASURV per mantenere costante il valore di stress nella regione di deformazione plastica incrementata. La curva è stata inoltre leggermente modificata introducendo un piccolo tratto di strain hardening a pendenza estremamente ridotta tra i valori di snervamento e rottura del materiale (praticamente coincidenti in questo tipo di materiali, eccetto per la componente di taglio), comunque basato sull'energia di deformazione plastica ricavabile dalle curve dei test sperimentali per poter permettere una migliore impostazione della legge del materiale secondo criterio CRASURV, senza modificare in maniera non trascurabile la curva del materiale.

6.4.2 Risultati dei test numerici con provini in composito

Effettuando le analisi numeriche alle velocità stabilite, si ottengono i seguenti risultati:

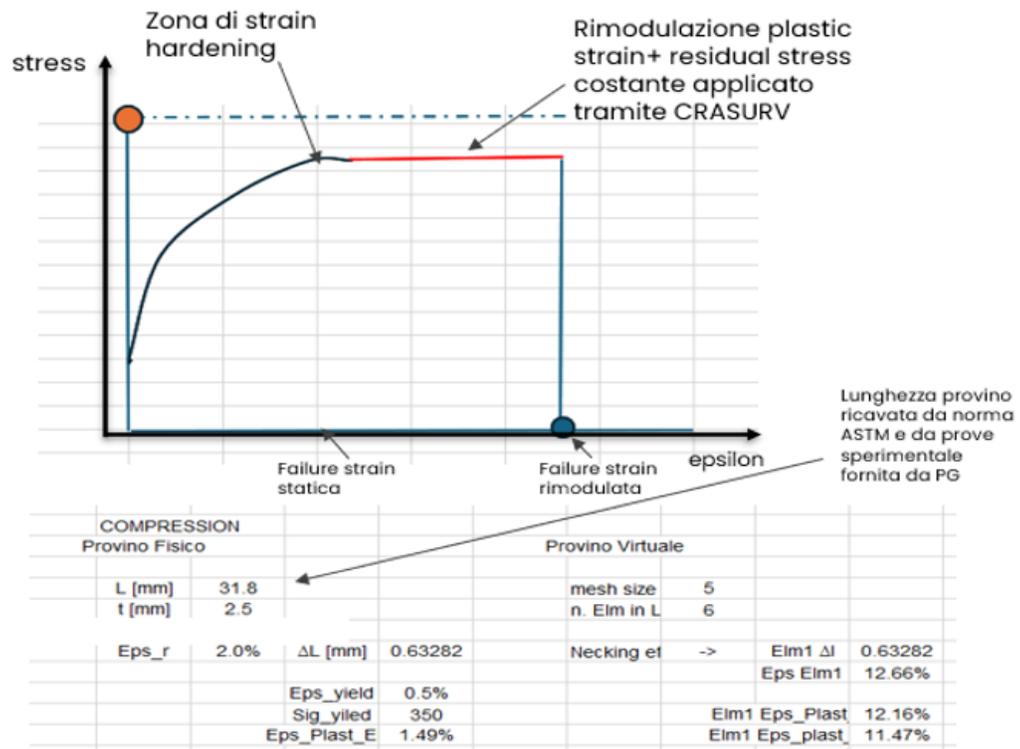


Figura 6.41: Esempio di schematizzazione della curva del materiale composito e della deformazione plastica utilizzata nel modello numerico

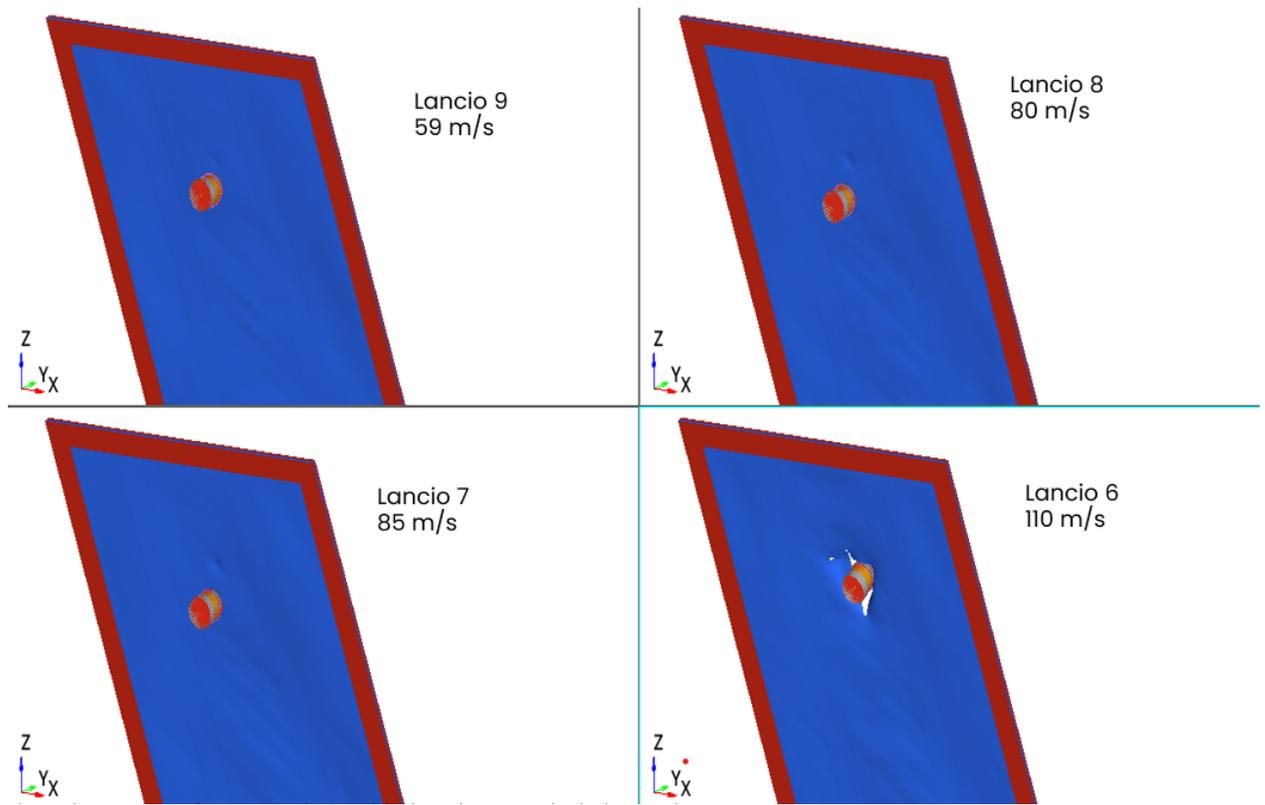


Figura 6.42: Risultati modello numerico in composito con proiettile tipo 1

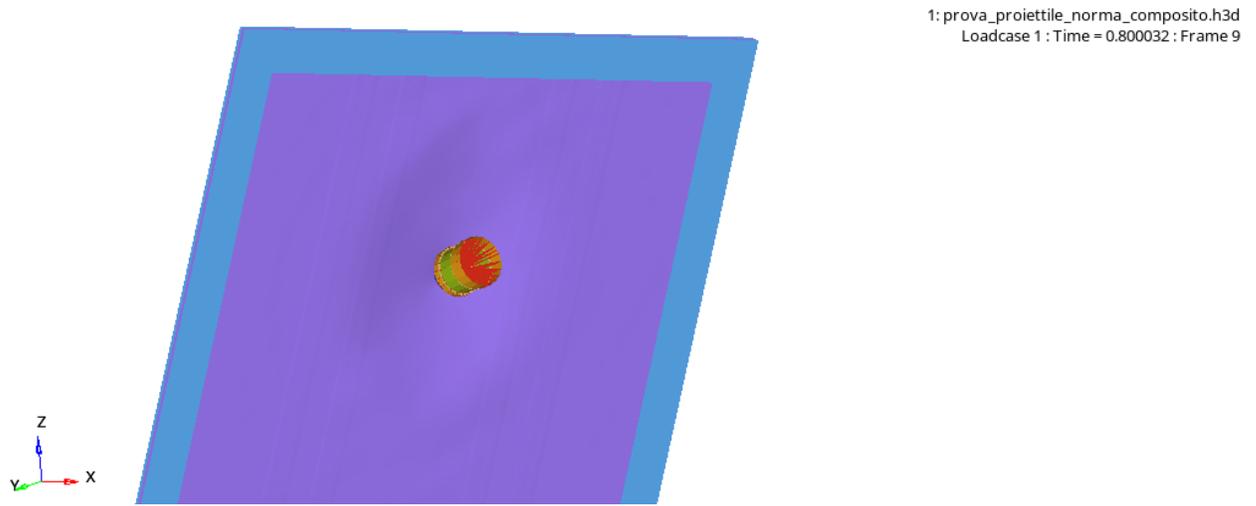


Figura 6.43: Risultati modello numerico in composito,proiettile tipo 2, caso 55m/s, particolare a 0.8 ms

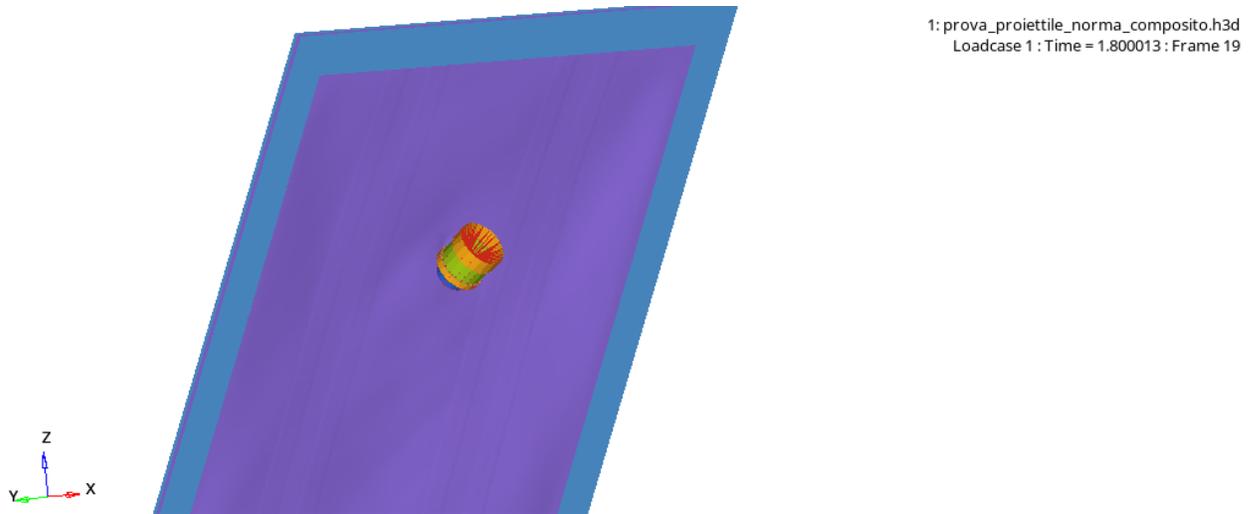


Figura 6.44: Risultati modello numerico in composito,proiettile tipo 2, caso 55m/s, particolare a 1.8 ms

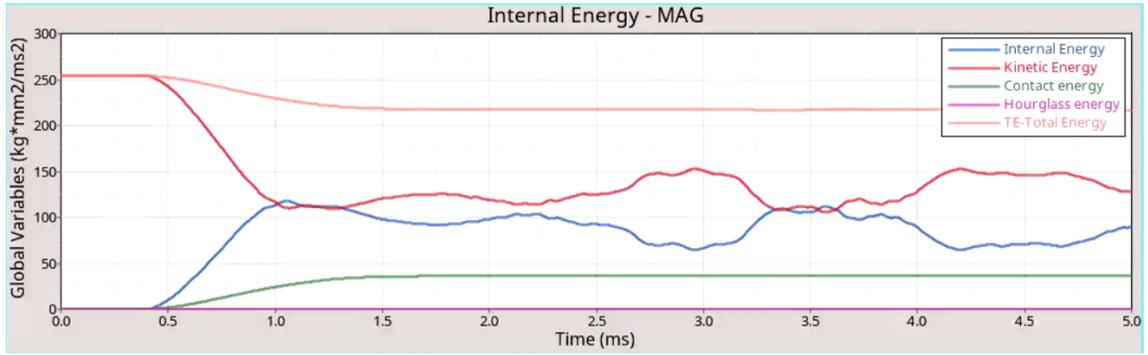


Figura 6.45: Grafico delle energie, caso 59 m/s

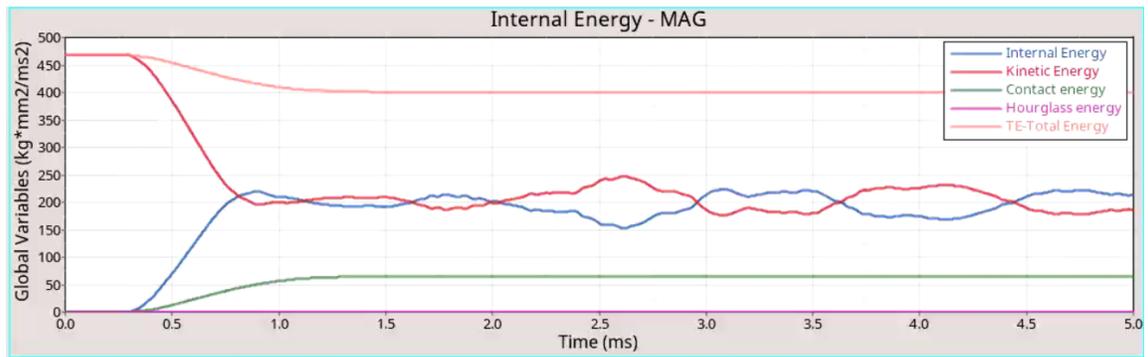


Figura 6.46: Grafico delle energie, caso 80 m/s

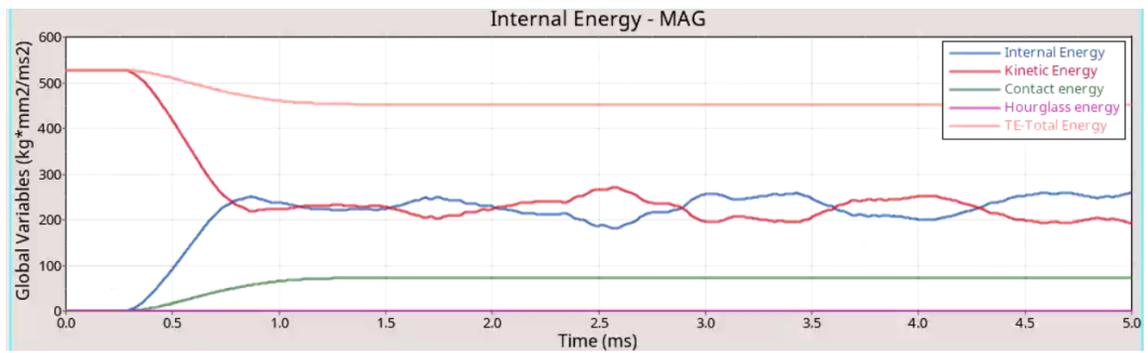


Figura 6.47: Grafico delle energie, caso 85 m/s

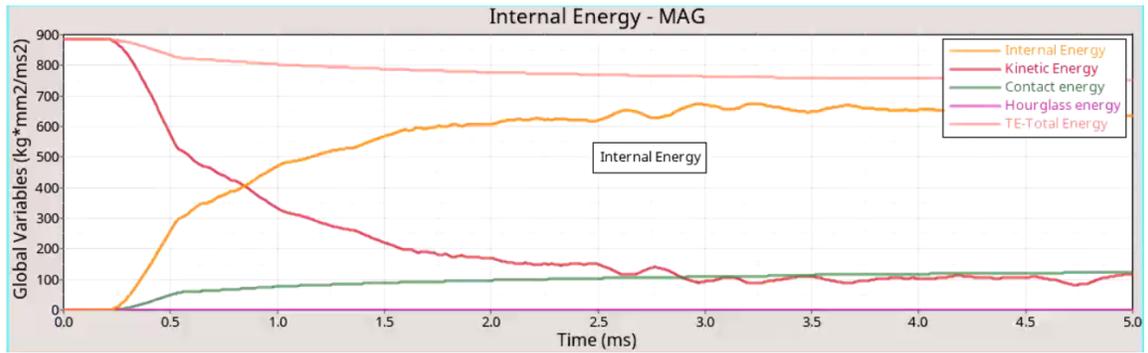


Figura 6.48: Grafico delle energie, caso 110 m/s

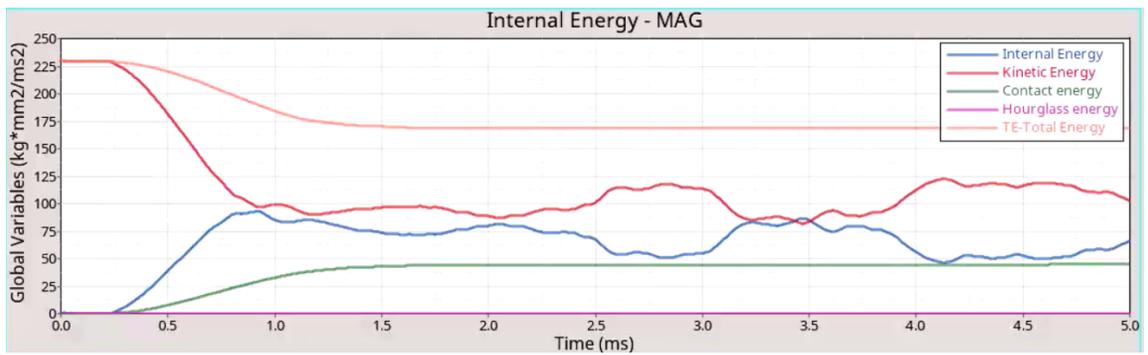


Figura 6.49: Grafico delle energie, caso 55 m/s

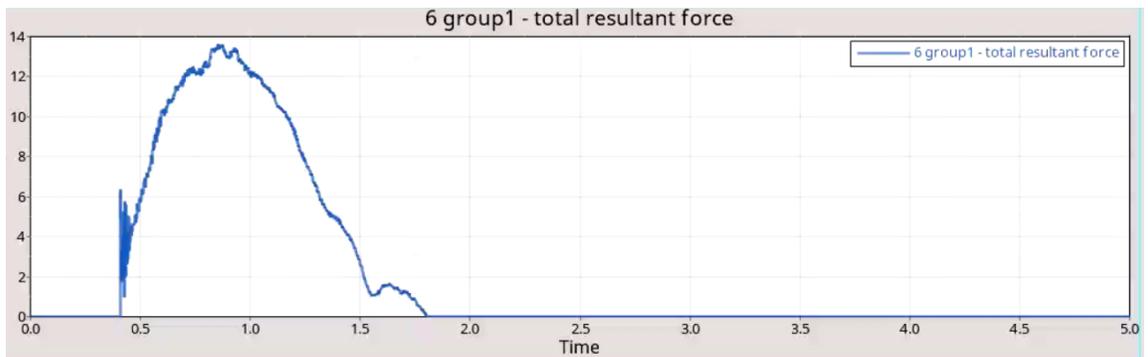


Figura 6.50: Forza di contatto, caso 59 m/s (ordinata in kN, tempo in ms)

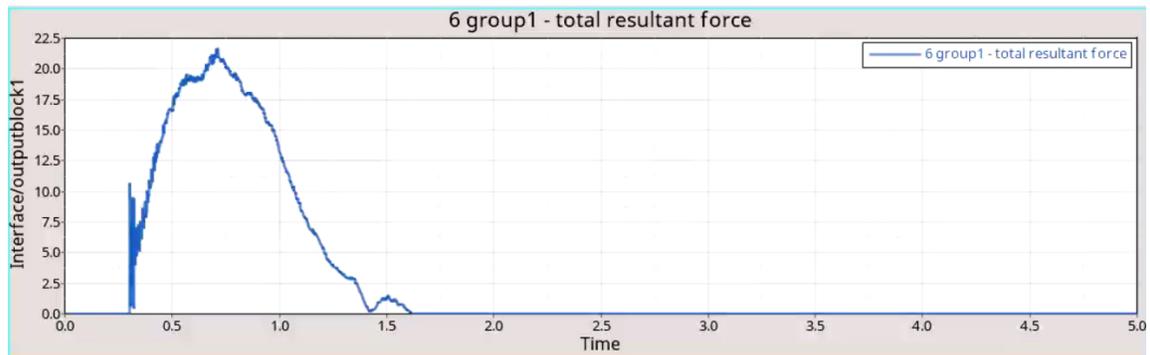


Figura 6.51: Forza di contatto, caso 80 m/s (ordinata in kN, tempo in ms)

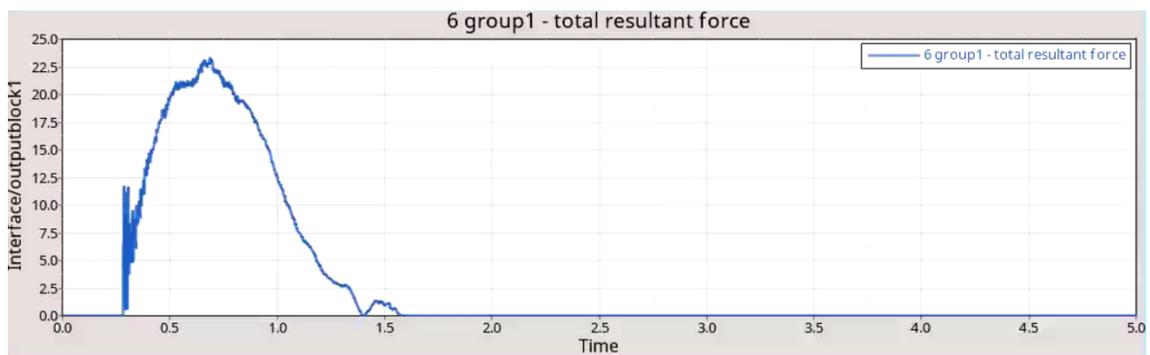


Figura 6.52: Forza di contatto, caso 85 m/s (ordinata in kN, tempo in ms)

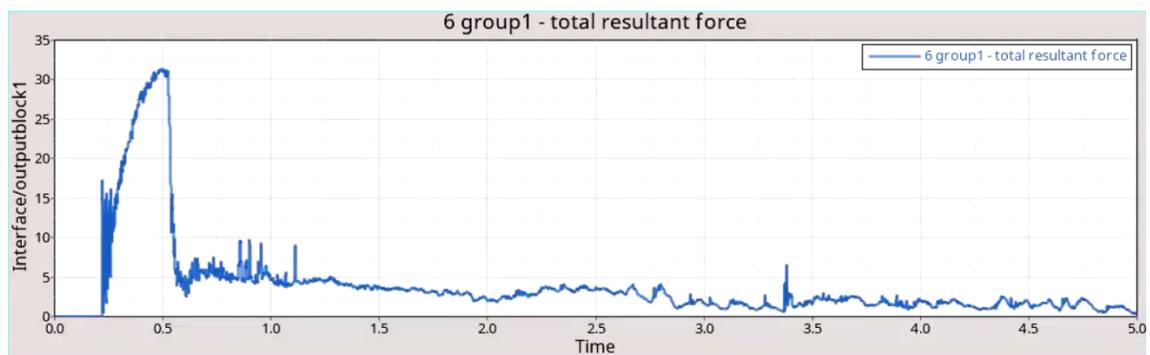


Figura 6.53: Forza di contatto, caso 110 m/s (ordinata in kN, tempo in ms)

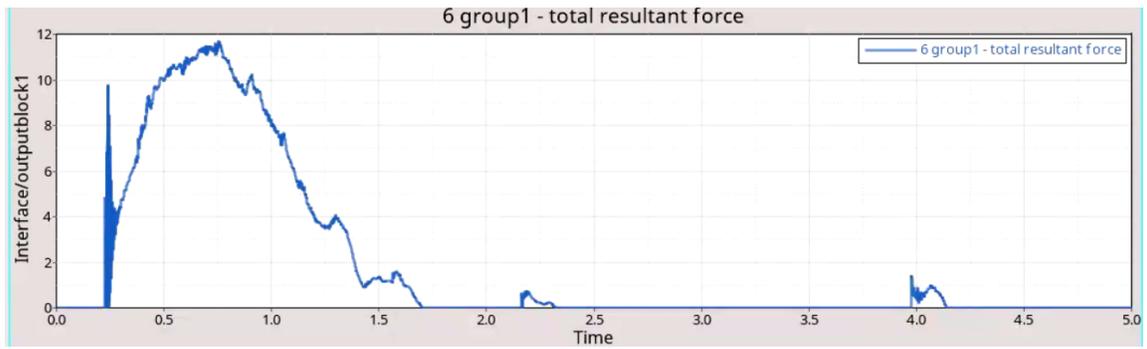


Figura 6.54: Forza di contatto, caso 55 m/s (ordinata in kN, tempo in ms)

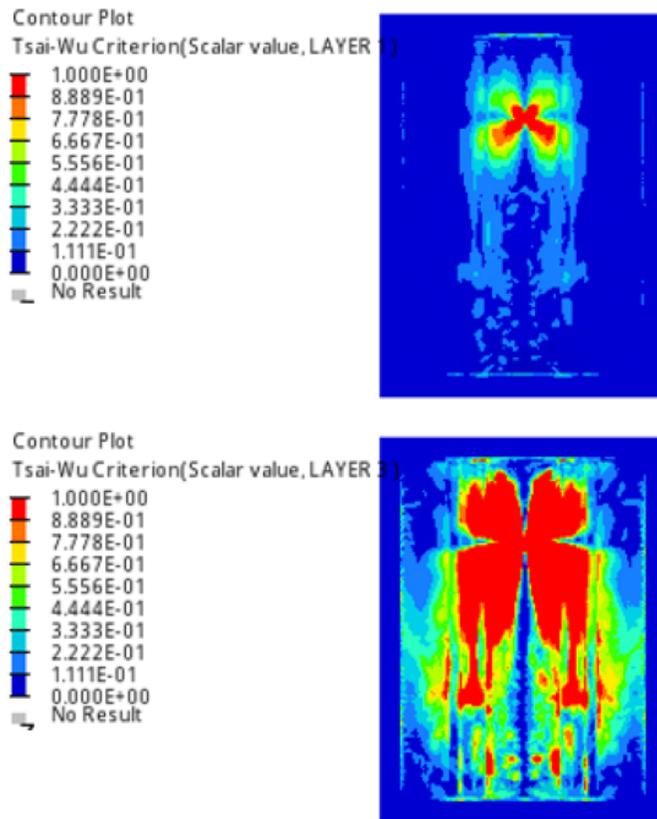


Figura 6.55: Criterio di Tsai-Wu sui layer 1 e 3 del modello numerico, caso 59 m/s

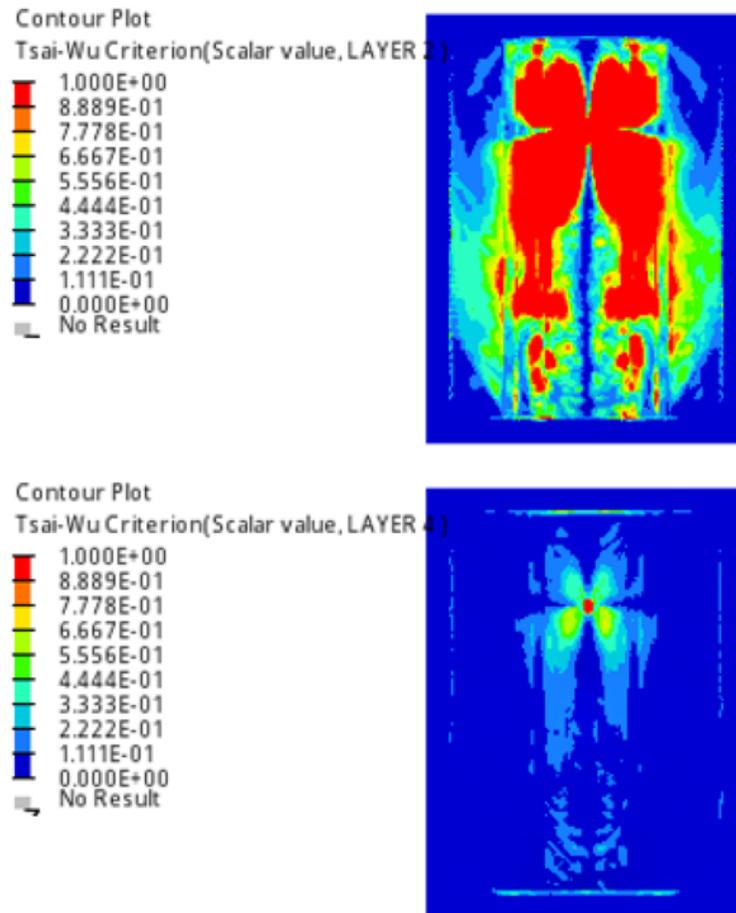


Figura 6.56: Criterio di Tsai-Wu sui layer 2 e 4 del modello numerico, caso 59 m/s

Analizzando i risultati, è possibile notare che il valore iniziale di energia massima, che coincide con quella cinetica del proiettile, sia in linea con il valore iniziale di energia per ogni prova sperimentale effettuata (rappresentati in tabella 5.1). Si possono notare alcune oscillazioni tra energia cinetica e interna per via delle oscillazioni di piastra e proiettile (queste tendono a diminuire all'aumentare della velocità iniziale del proiettile) ed una perdita di energia totale dovuta al contatto. Le oscillazioni non sono presenti nel caso a 110 m/s, poichè il proiettile perfora la piastra (l'energia cinetica va a 0, quindi il proiettile tende a fermarsi dopo aver perforato la piastra. Questa tendenza è riscontrabile anche nel grafico dell'energia di contatto. La correttezza del comportamento tuttavia non può essere dimostrata poichè non ci sono informazioni sufficienti a riguardo dal punto di vista sperimentale).

Può essere inoltre utile evidenziare il caso a 55 m/s con il proiettile tipo 2 (i tipi di proiettili sono indicati in figura 6.43 e 6.44): in questo caso specifico il proiettile tende ad avere un comportamento che lo porta a strisciare contro la piastra e ad orientare la punta verso il basso, in maniera simile al comportamento dei detriti del ballast durante l'impatto reale con una carenatura; questo tipo di comportamento non si ottiene con il proiettile tipo 1. Dal punto di vista delle forze, non è possibile confrontare la validità dei risultati ottenuti poichè i test sperimentali non hanno previsto questo tipo di rilevazione. Si possono notare picchi sempre più alti di forza di contatto tra un caso e l'altro all'aumentare della velocità, ed alcune oscillazioni ed un picco di breve durata in fase iniziale dovuti principalmente all'impostazione del contatto (non risultano comunque influenti poichè l'andamento della forza dopo l'oscillazione risulta essere regolare). Un esempio tipico di diagramma delle forze

Per quanto riguarda invece il comportamento del laminato, esso si rompe solo nel caso a 110 m/s, come ottenuto dai test sperimentali. Il problema principale del modello utilizzato risulta essere il criterio di failure impostato: infatti, come è possibile notare in figura 6.55 e 6.56 (in figura, il layer 1 è situato in prossimità della faccia posteriore, mentre il 4 è a contatto con il proiettile), il laminato risulta essere danneggiato (in rosso in figura) su tutti i layer anche a velocità più basse di quella di perforazione da parte del proiettile. Questo risulta però giustificabile da una serie di considerazioni:

- Nell'analisi dei provini danneggiati sperimentalmente non si è investigato in dettaglio l'estensione e la tipologia del danno arrecato, concentrandosi solamente sulla presenza di penetrazione del provino. Il criterio di TSAI-WU considera tutte le possibili cause di danno, per questo i due casi risultano essere difficilmente correlabili.
- Come descritto nei precedenti paragrafi, il modello che descrive il comportamento dei materiali compositi impiegati è un modello (CRASURV) che ammette una plasticizzazione del materiale lungo le sue direzioni principali. Questa condizione è stata sfruttata numericamente per correlare il comportamento sperimentale, attraverso la definizione del limite di rottura dei materiali al raggiungimento di un valore massimo di deformazione plastica. Il criterio di TSAI-WU che è base matematica del modello

numerico CRASURV è però definito inizialmente dal solo comportamento elastico del materiale e quindi, durante il post-processing del failure index questo raggiunge valore 1 (indicatore della avvenuta rottura). Ad un osservatore non conscio degli specifici settaggi della simulazione, sembra quindi mancare la correlazione tra quanto indicato dal TSAI-WU e l'effettivo cancellamento degli elementi del FEM, fenomenologia invece corrispondente a quanto effettivamente implementato.

Capitolo 7

Riproduzione del modello analitico di Olsson

7.1 Implementazione del modello e possibili limiti applicativi

L'ultimo obiettivo di questa tesi è quello di provare ad implementare ed utilizzare il metodo di Olsson descritto in precedenza. Va comunque specificato che l'obiettivo principale riguardante questa formulazione non è quello di correlare i risultati, ma valutarne i limiti applicativi per poter sviluppare in futuro accorgimenti per migliorarne il campo di utilizzo. Volendolo infatti applicare ai nostri casi di interesse, si notano delle condizioni di impatto differenti rispetto a quelle affrontate dall'autore.

In particolare:

- La piastra da analizzare è inclinata, diversamente dai casi con piastre piane analizzati dall'autore. Questo causa una differenza soprattutto dal punto di vista della velocità effettiva dell'impatto da inserire nella formula.
- I proiettili hanno una forma abbastanza complessa ed è quindi difficile riportare correttamente il valore da inserire. La formula è adatta a proiettili che seguono il comportamento ideale per la legge di contatto di Hertz, quindi di forma tendenzialmente cilindrica o sferica.
- L'impatto non avviene al centro della piastra, ma leggermente sopra esso: la vicinanza del proiettile al bordo della piastra potrebbe quindi innescare contributi dati dalle condizioni al contorno della struttura che potrebbero indurre ad errori nella formulazione.
- Eventuali meccanismi di danneggiamento possono influire sui risultati ottenuti poiché vanno a modificare proprietà di lamina e caratteristiche di impatto.

Il metodo verrà quindi implementato sia per il caso in metallo che per il caso in composito. Per il caso in metallo, l'errore atteso è molto grande, poichè il metodo è adatto solo a laminati in composito, mentre per il caso in composito potrà essere utile analizzare i risultati e cercare se possibile di capire quanto i fattori descritti sopra possano aver influito sull'eventuale errore (molti di questi fattori non sono esplicitamente descritti dall'autore del metodo). Nella formulazione, verrà impostato il valore di raggio della punta del proiettile tipo 1 (20mm) e verranno ricavate le matrici D del laminato utilizzando il modello piastra di Kirchhoff. La velocità è stata opportunamente scomposta, con la sola componente normale alla piastra valutata.

7.2 Risultati del modello

L'implementazione porta ai seguenti risultati:

7.2.1 Modello metallico

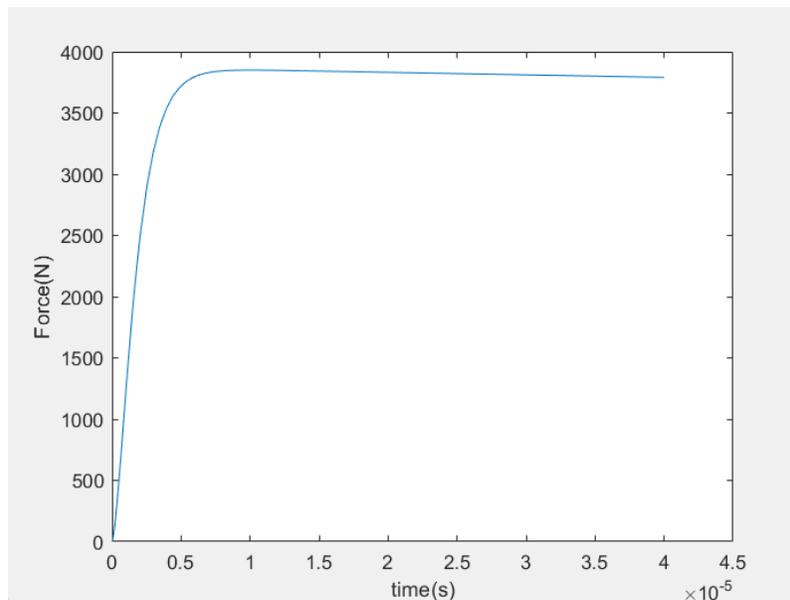


Figura 7.1: Forza di contatto con metodo di Olsson, provino metallico, test a 59 m/s

7.2.2 Modello in composito

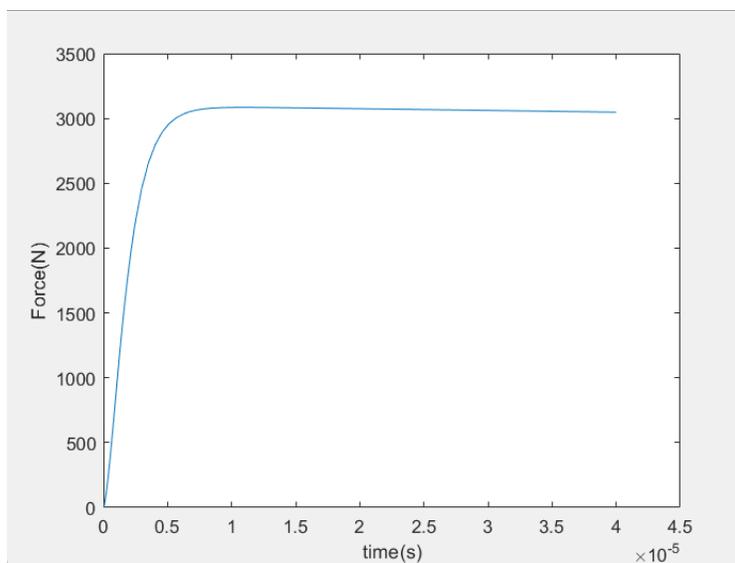


Figura 7.2: Forza di contatto con metodo di Olsson, composito, test a 55 m/s

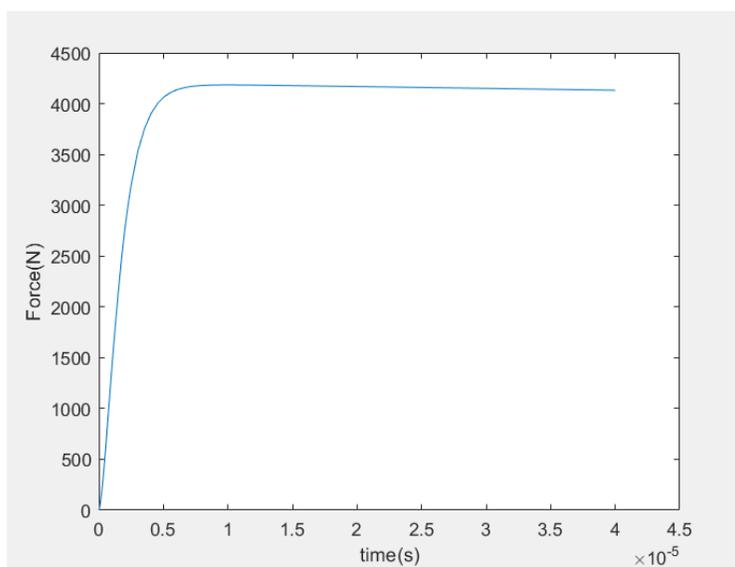


Figura 7.3: Forza di contatto con metodo di Olsson, composito, test a 80 m/s

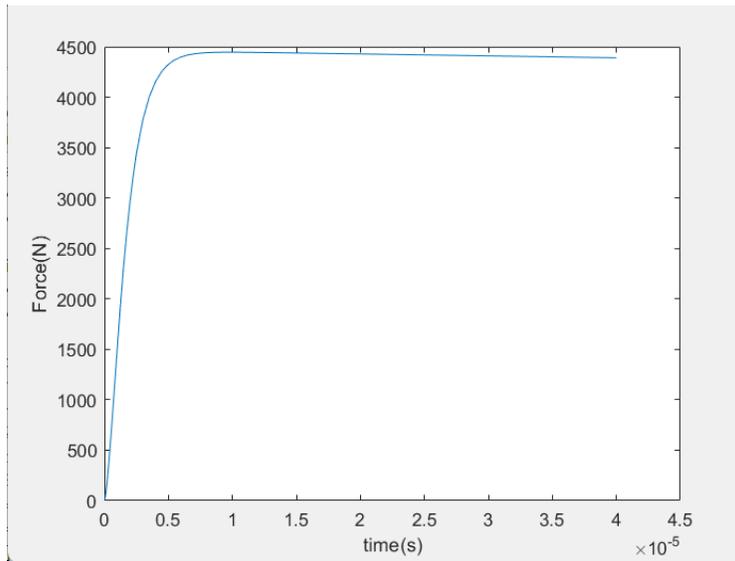


Figura 7.4: Forza di contatto con metodo di Olsson, composito, test a 85 m/s

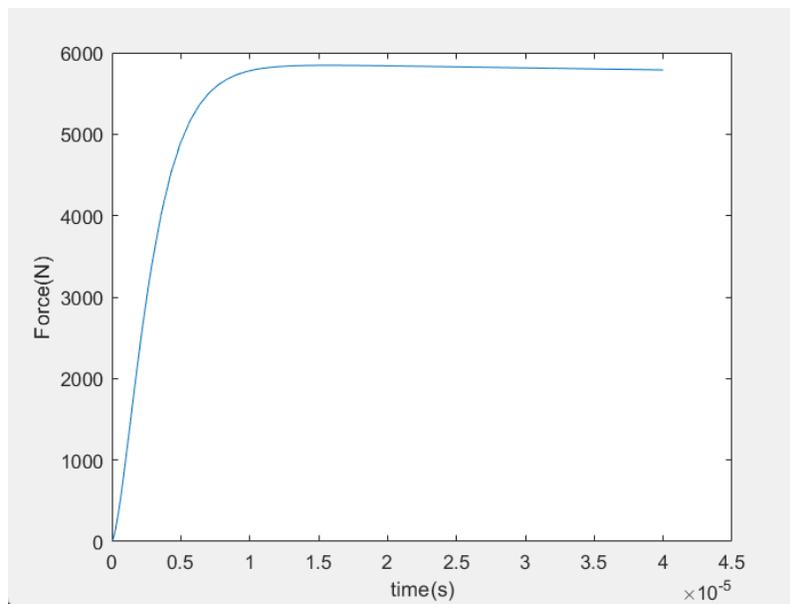


Figura 7.5: Forza di contatto con metodo di Olsson, composito, test a 110 m/s

Capitolo 8

Confronto risultati

Per verificare le correlazioni, vengono di seguito confrontati i valori ottenuti dai test numerici con quelli sperimentali.

8.1 Confronto tra prova sperimentale e numerica su provino in alluminio

In figura 8.1 è mostrato un confronto tra i valori misurati sperimentalmente e il displacement numerico ottenuto a 5 ms:

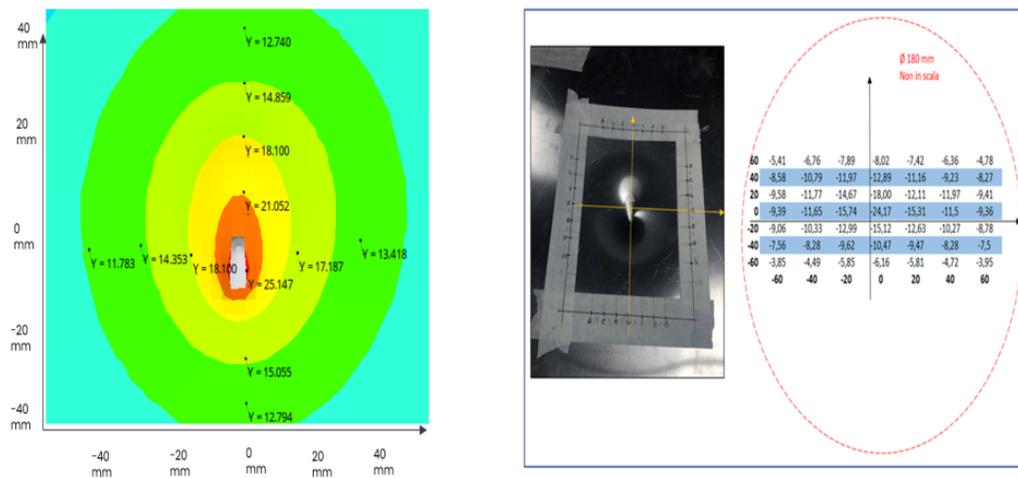


Figura 8.1: Confronto tra risultati numerici e sperimentali per provino in alluminio

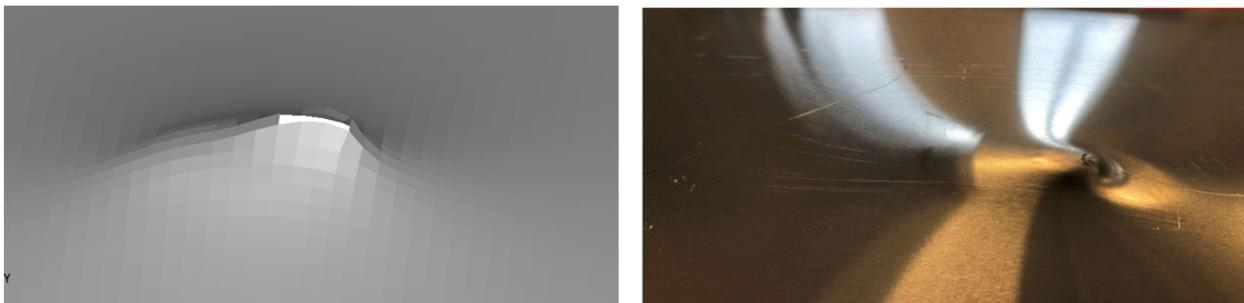


Figura 8.2: Deformazione dovuta al proiettile su piastra numerica (a sinistra) e sperimentale (destra)

Come è possibile notare in figura 8.1, i valori misurati numericamente e sperimentalmente sono molto vicini tra loro, in particolare al centro del foro. Il confronto è stato inizialmente effettuato con le rilevazioni numeriche valutate nella prova fino a 3 ms. Valutando invece i valori ottenuti nel caso a 5 ms (figura 6.33), la corrispondenza in prossimità del centro del foro risulta ancora più netta. Valutando invece il confronto in figura 8.2, la deformazione causata dal proiettile risulta essere molto simile in forma ed estensione, fatta eccezione per un numero leggermente maggiore di elementi perforati dal proiettile.

8.2 Confronto tra prova sperimentale e numerica su provini in composito

Come già detto, non sono presenti rilevazioni di spostamenti sui test con provino in composito, perciò verranno confrontate le immagini relative a caso numerico e sperimentale per verificare lo stato del composito alle velocità indicate.



Figura 8.3: Confronto tra provino in composito e test numerico dopo impatto a 59 m/s (particolare dell'impronta (in alto) e sezione dell'impatto (in basso))

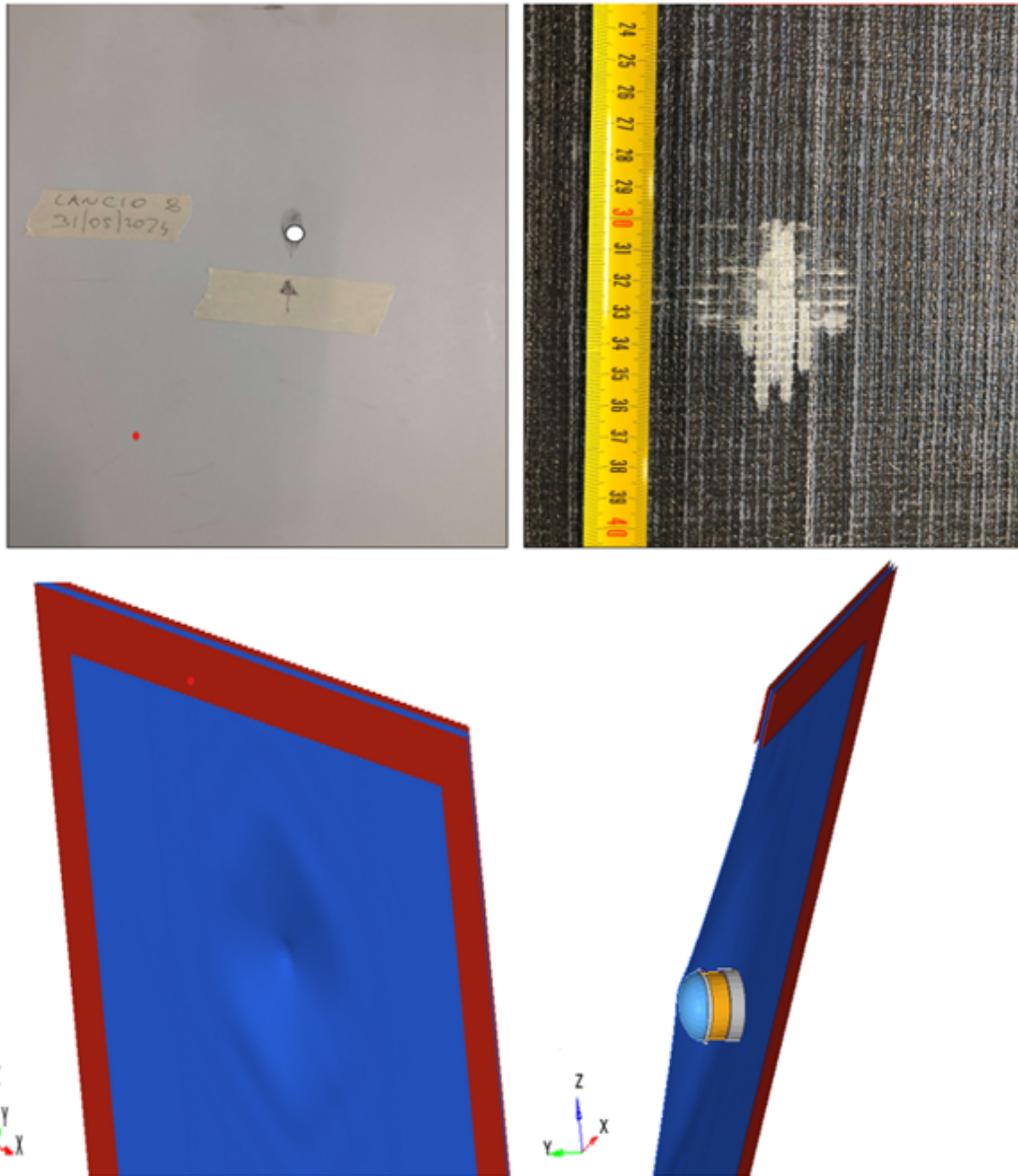


Figura 8.4: Confronto tra provino in composito e test numerico dopo impatto a 80 m/s (particolare dell'impronta (a sinistra) e sezione dell'impatto (a destra))

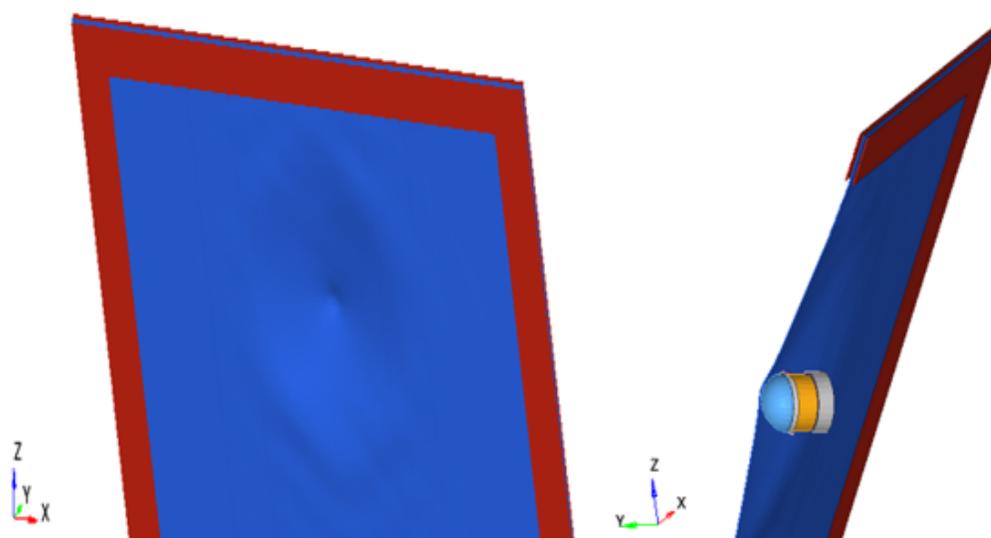


Figura 8.5: Confronto tra provino in composito e test numerico dopo impatto a 85 m/s (particolare dell'impronta (a sinistra) e sezione dell'impatto (a destra))

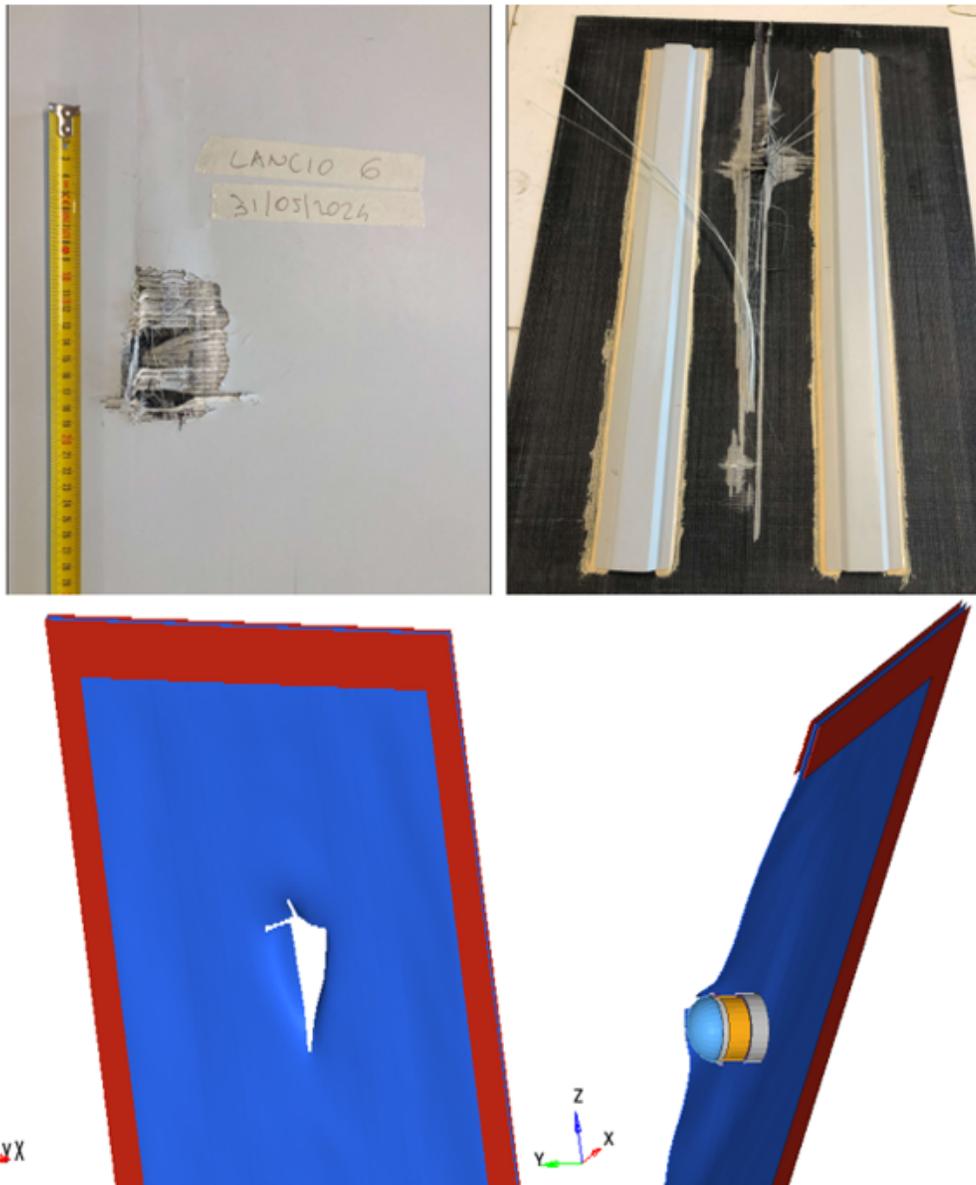


Figura 8.6: Confronto tra provino in composito e test numerico dopo impatto a 110 m/s (particolare dell'impronta (a sinistra) e sezione dell'impatto (a destra))

Come è quindi possibile osservare, in particolare nel caso con velocità di 110 m/s, si nota dimensione simile del foro dovuto al proiettile ed un meccanismo simile di rottura, seppur con una porzione minore di piastra danneggiata. Non è possibile osservare il danneggiamento negli altri casi, ma solo un'impronta della punta del proiettile sulla piastra che tende ad essere più marcata all'aumentare della velocità. Non è stato riportato il confronto del caso con velocità di 55 m/s con il proiettile tipo 2, in quanto presenta una dinamica simile a quello del caso a 59 m/s; Il caso a 55 m/s presenta inoltre dal punto di vista sperimentale un danno maggiore a pari velocità rispetto al caso con il proiettile tipo 1: questo va a confermare l'influenza sul danneggiamento da impatto sui compositi dovuto a forma e tipo di proiettile e punta.

8.3 Confronti tra forze di contatto numeriche e metodo analitico

Confrontando i risultati del metodo analitico riportati nel capitolo 7 e i risultati ottenuti dal modello numerico, si può notare come i valori di forza siano molto diversi tra loro, con il metodo analitico che sottostima in maniera importante la forza di contatto generata dall'impatto con un errore che aumenta all'aumentare della velocità, fino ad arrivare nei nostri casi di interesse ad un ordine di grandezza (non sono stati riportati i valori degli spostamenti ottenuti, ma anche in questo caso il metodo analitico sottostima di molto i risultati numerici).

Le cause di questa discrepanza, oltre alle ipotesi citate in precedenza riguardo alle incertezze sulle condizioni dell'impatto dei casi di interesse, possono derivare anche da una non corretta interpretazione di alcuni limiti applicativi del modello (per esempio, il tipo di composito utilizzato e le relative proprietà, oppure l'influenza del danneggiamento sulle caratteristiche della piastra durante l'impatto o l'influenza delle alte velocità sulle proprietà del composito).

Capitolo 9

Conclusioni e sviluppi futuri

Come descritto all'interno della tesi, i modelli sviluppati e realizzati portano alle seguenti conclusioni:

- **Modello metallico**

Il modello metallico riprodotto è molto simile dal punto di vista dei risultati all'esperimento reale eseguito. Risulta presente solo una leggera discrepanza nei risultati e nella zona effettivamente perforata del provino metallico nella simulazione fino a 3 ms. La discrepanza nei risultati dipende principalmente dal fatto che il materiale dopo l'impatto necessiterebbe di alcuni istanti di tempo in più per rilassarsi. La misurazione sperimentale è infatti avvenuta molto tempo dopo l'impatto. La prova successiva a 5 ms conferma questa ipotesi migliorando notevolmente la correlazione. Una verifica utile per aumentare il livello di correlazione potrebbe consistere nell'aumentare il tempo di simulazione oltre i 5ms per ottenere risultati ancora più affidabili. In ogni caso, l'errore ottenuto soprattutto nella zona più sollecitata dall'impatto è molto basso e i risultati sono nel complesso molto soddisfacenti.

- **Modello in composito**

Il modello in composito vede una buona correlazione per quanto riguarda la capacità del proiettile di perforare la piastra alle varie velocità testate, riuscendo quindi a cogliere l'obiettivo principale della simulazione.

Tuttavia, i modi di rottura e le aree danneggiate interessate non vengono interpretati dal modello: il modello infatti non riesce a descrivere il danneggiamento e le delaminazioni che si ottengono nei casi intermedi, mentre, pur riuscendo a cogliere la rottura nel caso a velocità più elevata, vede un danneggiamento meno diffuso, in particolare sulla faccia posteriore della piastra, rispetto al caso sperimentale.

- **Procedimento analitico**

Il modello di Olsson generato su Matlab è stato validato con successo andando a utilizzare il codice sviluppato cercando di riprodurre alcuni risultati di test sperimentali

indicati e affrontati con lo stesso metodo dall'autore .

Dopo averlo utilizzato nei casi d'interesse, si nota che il modello utilizzato per il caso metallico non è fedele a quello reale. In questo caso preciso, la discrepanza risulta essere prevedibile poichè il modello non è adatto all'utilizzo su materiali non ortotropi. La discrepanza nei risultati avviene anche nel modello in composito, con una evidente sottostima di forza di contatto e indentazione della piastra nei casi analizzati dovuta molto probabilmente alle caratteristiche del tipo di impatto analizzato.

Sulla base di questo lavoro, molte possibilità di approfondimento e di migliorie possono essere considerate.

In particolare:

- **Perfezionamento mesh e modello**
La limitazione principale del modello in composito è stata la mancanza di dati, in particolare riguardo a proprietà della matrice e percentuale di fibre nel composito: questo ha escluso l'eventuale possibilità di un modello molto più complesso basato su elementi 3d o 2d continuum shell o mesomesh che permetterebbe di introdurre in maniera efficace il contributo non trascurabile alle alte velocità della matrice che non è stato possibile introdurre nel modello sviluppato.
- **Introduzione degli effetti dello strain rate per il composito**
La mancanza di dati riferiti alle proprietà meccaniche del composito non hanno permesso l'inserimento della dipendenza dallo strain rate delle proprietà meccaniche. Per questo motivo, la bontà del modello generato potrebbe essere migliorata per esempio valutando un materiale con proprietà dinamiche ad alte velocità definite tramite test appositi sul materiale e ripetendo l'esperimento.
- **Approfondimento del modello analitico**
La versione sviluppata del modello permette di ricavare solo alcune proprietà basilari del fenomeno d'impatto e potrebbe non essere affidabile nelle condizioni affrontate in precedenza. Versioni successive sviluppate dallo stesso autore vedono anche considerati contributi delle delaminazioni che potrebbero essere implementati nel codice. Uno sviluppo che tenga conto in maniera più efficace dell'angolo di impatto può essere investigato per poter ottenere un modello con applicabilità più generale e per comprendere eventualmente l'origine dell'errore nei casi analizzati.

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto i miei genitori per aver effettuato ancora una volta molti sacrifici per permettermi di concludere il mio percorso di studi magistrale.

Ringrazio inoltre tutti gli amici e le persone che mi hanno supportato e che mi hanno offerto aiuto e consigli durante il mio soggiorno a Torino, permettendomi di affrontare la vita universitaria in maniera più piacevole.

Infine, vorrei ringraziare tutti i membri di Fev Italia della sede di Torino, in particolare tutti i colleghi dell'area di simulazione numerica, per avermi dato l'opportunità di svolgere questa tesi ma soprattutto per i consigli e le linee guida che mi hanno offerto per il proseguo della mia carriera.

Bibliografia

- [1] K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, and G.A. Schoeppner. *Long-Term Durability of Polymeric Matrix Composites*. SpringerLink : Bücher. Springer US, 2011.
- [2] FAA. AC 20-107B , 2009, DOT Federal Aviation Administration Advisory Circular on Composite Aircraft Structure.
- [3] Robin Olsson. Impact response of orthotropic composite plates predicted from a one-parameter differential equation. *AIAA journal*, 30(6):1587–1596, 1992.
- [4] Robin Olsson. Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact. *Composite Structures*, 59(3):341–349, 2003.
- [5] Robin Olsson. Engineering method for prediction of impact response and damage in sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 4(1):3–29, 2002.
- [6] R. Olsson. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(8):879–887, 2000.
- [7] Naveen Padaki, R Alagirusamya, Bl Deopura, Sugun Sridharan, and Raul Fanguero. Low velocity impact behaviour of textile reinforced composites. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 33, 06 2008.
- [8] Serge Abrate. *Impact on Composite Structures*. Cambridge University Press, 1998.
- [9] Dahsin Liu. Impact-induced delamination—a view of bending stiffness mismatching. *Journal of Composite Materials*, 22(7):674–692, 1988.
- [10] Amita Bhaduri. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*. Springer, 2018.
- [11] Uday K. Vaidya. *Impact Response of Laminated and Sandwich Composites*, pages 97–191. Springer Vienna, Vienna, 2011.
- [12] J.A. Zukas. *High Velocity Impact Dynamics*. Wiley, 1990.

- [13] ESA. Hypervelocity impacts and protecting spacecraft.
- [14] T.X. Yu and X. Qiu. *Introduction to Impact Dynamics*. CourseSmart Series. Wiley, 2018.
- [15] J. Zukas. *Introduction to Hydrocodes*. Studies in Applied Mechanics. Elsevier Science, 2004.
- [16] Serge Abrate. Modeling of impacts on composite structures. *Composite Structures*, 51(2):129–138, 2001.
- [17] R Sierakowski. Strain rate behavior of metals and composites. 05 2008.
- [18] R. Smerd, S. Winkler, C. Salisbury, M. Worswick, D. Lloyd, and M. Finn. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1):541–560, 2005. Fifth International Symposium on Impact Engineering.
- [19] NK Naik and Venkateswara Rao Kavala. High strain rate behavior of woven fabric composites under compressive loading. *Materials Science and Engineering: A*, 474(1-2):301–311, 2008.
- [20] Guoqing Jing, Dong Ding, and Xiang Liu. High-speed railway ballast flight mechanism analysis and risk management – a literature review. *Construction and Building Materials*, 223:629–642, 2019.
- [21] Federal Railroad Administration. Identification of high-speed rail ballast flight risk factors and risk mitigation strategies – final report, 2015.
- [22] AFNOR. AFNOR NF F07–101: Railway applications — shock test by throwing up ballast simulation,, 2002.
- [23] S. Abrate. *Impact Engineering of Composite Structures*. CISM International Centre for Mechanical Sciences. Springer Vienna, 2011.
- [24] Altair. Introduction to explicit analysis using Radioss: A study guide, 2017.
- [25] John W Walter and David Bellshaw. Survey to determine the value of DYNA. Technical report, Lawrence Livermore National Lab., CA (United States), 1993.
- [26] Altair. Radioss Help: Shell elements, 2021.
- [27] Altair. Radioss Help: Energy evaluation, 2021.
- [28] Altair. Radioss Help: Contact treatment, 2021.
- [29] Altair. Radioss Help: General purpose interface (/INTER/TYPE7) , 2021.

- [30] Altair. Radioss Help: Tied contact (/INTER/TYPE2) , 2021.
- [31] Gordon R. Johnson and William H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1):31–48, 1985.
- [32] Gordon R. Johnson and W. Howard Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium of Ballistics*, 2018.
- [33] Marcos Rodriguez-Millan, Daniel Garcia-Gonzalez, Alexis Rusinek, and Angel Arias. Influence of stress state on the mechanical impact and deformation behaviors of aluminum alloys. *Metals*, 8(7), 2018.
- [34] Ansys. LS-DYNA Aerospace Working Group Modeling Guidelines Document, 2024.
- [35] Altair. Radioss Help: Composite properties, 2022.
- [36] Stephen W. Tsai and Edward M. Wu. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 5:58 – 80, 1971.
- [37] Altair. Radioss Help: MAT/LAW 25 CRASURV formulation, 2021.
- [38] Shuguang Li, Elena Sitnikova, Yuning Liang, and Abdul-Salam Kaddour. The Tsai-Wu failure criterion rationalised in the context of UD composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 102:207–217, 2017.