Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Luglio 2021

Misura della forza durante l'impatto: simulazioni numeriche e prove sperimentali

Relatore:
Prof. Marco Gherlone

Candidato:
Francesca Cantatore

Co-relatore:
Ing. Massimiliano Corrado Mattone

Politecnico
di Torino
1859

Sommario

La seguente tesi si concentra sul calcolo della forza d'impatto generata nella collisione tra un proiettile cilindrico in acciaio sparato da un cannone ad aria compressa e un bersaglio metallico. Più precisamente, l'idea è quella di indagare la possibilità di effettuare questo calcolo attraverso una cella di carico posta sul proiettile stesso, cosa che porta a notevoli problematiche relative ai cavi e al posizionamento della cella stessa.

Quindi da un lato viene stimata la migliore forma e dimensione del proiettile e la migliore posizione della cella di carico in modo che la forza calcolata sia corretta e si scopre essere essenziale l'introduzione di una correzione inerziale. Dall'altro lato, viene elaborato anche un modello a doppio impatto per risolvere il problema relativo ai cablaggi: un primo impatto tra un proiettile non strumentato sparato con il cannone e un secondo proiettile strumentato stazionario posizionato molto vicino al bersaglio; questo secondo proiettile viene così messo in moto e impatta a sua volta con il target. Diventa necessario allora capire se il doppio impatto influenzi in qualche modo la forza generata nell'area della cella di carico e risulta fondamentale scegliere la giusta forma, massa e velocità del primo proiettile.

In questo lavoro vengono seguiti tre diversi approcci, che si completano a vicenda: la realizzazione di simulazioni preliminari tramite elementi finiti, la ricerca e l'applicazione di un modello semplificato che restituisca una forza di impatto comparabile con quella delle simulazioni, ovvero il modello di Zener, e l'organizzazione di prove sperimentali per testare il sistema a doppio impatto in un ambiente più realistico. Durante i test in laboratorio, i dati vengono acquisiti, elaborati, corretti e confrontati, con ottimi risultati, con quelli ottenuti attraverso l'analisi FEM.

Indice

Sommario 3
Indice 5
Introduzione 7
1 Richiami sull'impatto 8
1.1 L'impatto: un fenomeno dinamico 8
1.2 Tipologie di impatto 11
1.3 Classificazione dei Target 12
1.4 Approcci per lo studio del fenomeno 13
2 Dimensionamento del proiettile 16
3 Analisi agli elementi finiti 20
3.1 Proiettile con energia 10 J e velocità 7 m/s 27
3.1.1 Impatto singolo: proiettile cilindrico 27
3.1.2 Impatto singolo: proiettile con naso semisferico 34
3.1.3 Impatto singolo: proiettile allungato con naso semisferico 40
3.1.4 Impatto doppio con energia iniziale 10J 49
3.1.5 Impatto doppio con energia iniziale 20J 56
3.1.6 Impatto doppio con proiettile 2 piatto 61
3.2 Proiettile con energia 100 J e velocità 22 m/s 66
4 Modello semplificato 73
4.1 L'urto 74
4.2 L'impatto 78
4.2.1 Modello basato sull'energia cinetica 79
4.2.2 Modelli basati sulla legge di contatto Hertziana 80
4.2.2.1 Modello massa-molla 82
4.2.2.2 Modello basato sul bilancio dell'energia 85
4.2.2.3 Modello di Zener 87
4.2.3 Modello con proiettile rigido 91
5 Applicazione numerica 95
6 Metodi di misura della forza di contatto in letteratura 99
6.1 Trasduttore dinamico di misurazione della forza 99
6.2 Proiettile con cristallo piezoelettrico 100
6.3 Enhanced Laser Velocity System (ELVS) 101

6.4 Dispositivo tubolare ... 103
7 Descrizione dell'esperimento ... 105
7.1 Il cannone ad aria compressa ... 105
7.2 I proiettili ... 107
7.3 Il target ... 109
7.4 La cella di carico ... 110
7.5 Altra strumentazione ... 112
7.6 Preparazione ed esecuzione ... 114
8 Risultati delle prove sperimentali e confronto con quelli delle simulazioni ... 117
9 Conclusioni e sviluppi futuri ... 122
Appendice I - codice MATLAB per il modello di Zener ... 124
Appendice II - valori di N1 ed N2 per varie forme di naso ... 126
Bibliografia ... 129

Introduzione

Gli eventi che comportano un impatto, ovvero la collisione di due o più corpi solidi, stanno da diverso tempo ricevendo una sempre maggiore attenzione. Infatti, i recenti progressi tecnologici hanno reso necessaria una comprensione più ampia del comportamento dei materiali e delle strutture sotto carichi a breve termine di questo tipo, in quanto i requisiti da rispettare sono diventati sempre più severi.

Lo studio dell'impatto tra un proiettile e un target è un problema molto variegato e complesso che implica conoscenze in molteplici ambiti e richiede che vengano seguiti diversi approcci: analitici, numerici, ma soprattutto sperimentali. Quest'ultima tipologia è fondamentale per un fenomeno di questo tipo, risultando tuttavia molto costosa e potendo richiedere tempi molto lunghi per la preparazione e la successiva elaborazione dei dati e, soprattutto, portando ad incontrare inevitabilmente alcune difficoltà. È necessario quindi, prima di realizzare delle prove sperimentali di questo tipo, riuscire a riprodurre il fenomeno tramite analisi agli elementi finiti per prevederne il comportamento e risolvere in anticipo problemi che potrebbero presentarsi in fase di sperimentazione.

La seguente tesi si concentra in particolar modo sul calcolo della forza di impatto e, più precisamente, sull'indagare la possibilità di realizzare sperimentalmente tale calcolo tramite una cella di carico posta sul proiettile stesso. Questo approccio porta con sé diverse problematiche sia di natura pratica che di calcolo che verranno presentate successivamente. Per esempio, la cella di carico si collega alla strumentazione tramite una serie di cavi, i quali possono creare notevoli problemi in fase di inserimento del proiettile nella canna del cannone e in fase di movimento del proiettile ad alte velocità. Inoltre, la cella di carico non può essere posizionata nel punto esatto dell'impatto, ovvero sul naso del proiettile, ma dovrà essere montata ad una certa distanza: è necessario quindi capire quali fenomeni entrano in gioco e trovare un sistema per far sì che la cella senta e calcoli la giusta forza di contatto.

Si parte da una serie di considerazioni e prove che vengono realizzate utilizzando l'analisi agli elementi finiti, incominciando da modelli molto semplici per arrivare poi a modelli più realistici e rappresentativi della realtà. Queste prove permettono di capire se sia possibile il posizionamento della cella di carico sul corpo impattante, simulando l'impatto che si genera utilizzando un cannone ad aria compressa per metterlo in moto. Nei prossimi capitoli verranno descritte in dettaglio tutte le simulazioni realizzate.

Successivamente si analizzano diverse teorie che sono state elaborate negli anni per riuscire ad individuarne una che possa essere utilizzata nei casi di interesse e permetta di ottenere un valore di forza di impatto confrontabile con quello delle simulazioni.

Infine, si cerca di confrontare quanto ottenuto tramite delle prove sperimentali in laboratorio.: è necessario quindi individuare la giusta posizione per la cella di carico e progettare in modo adeguato i sistemi da impiegare.

1 Richiami sull’impatto

Per meglio comprendere le dinamiche relative all’impatto, è necessario dare spazio alla ricerca bibliografica. In questo capitolo, infatti, verranno riportati alcuni aspetti fondamentali riguardanti questo fenomeno, comprese considerazioni sul proiettile, sul target e sull’approccio da seguire.

1.1 L’impatto: un fenomeno dinamico

È possibile dividere i vari processi della vita in [2]:

- processi che si svolgono in periodi di tempo abbastanza lunghi o con una velocità di cambiamento tanto bassa da poter essere considerati e studiati come fenomeni statici, ovvero indipendenti dal tempo. Tali fenomeni si generano quando si applica un carico costante o quasi costante ad una struttura. Il tempo caratteristico può variare in un intervallo di 10^4 – 10^0 s;
- processi che avvengono in intervalli di tempo così brevi che diviene fondamentale considerare il fattore tempo e altri fenomeni come l’inerzia; questi processi vengono definiti come dinamici e hanno un tempo caratteristico che può variare molto in base al tipo di applicazione del carico. Il carico, infatti, può essere applicato tramite macchine ad aria compressa (o gas inerte compresso), tramite impatti esplosivi o tramite pistole a gas, con il tempo caratteristico che può variare in un range di 10^-2 – 10^-8 s.

La figura 1.1 riporta visivamente la classificazione di cui sopra e, come si può facilmente notare, l’impatto, ovvero un carico applicato a un singolo punto o ad un’area molto ristretta in un tempo di qualche millisecondo, microsecondo o nanosecondo, rientra pienamente nella categoria dei fenomeni dinamici. Nel caso in cui la struttura possa essere sottoposta a sollecitazioni di questo tipo, è importante garantire tramite una buona progettazione che la struttura sia in grado di assorbire tutta l’energia necessaria senza rompersi.

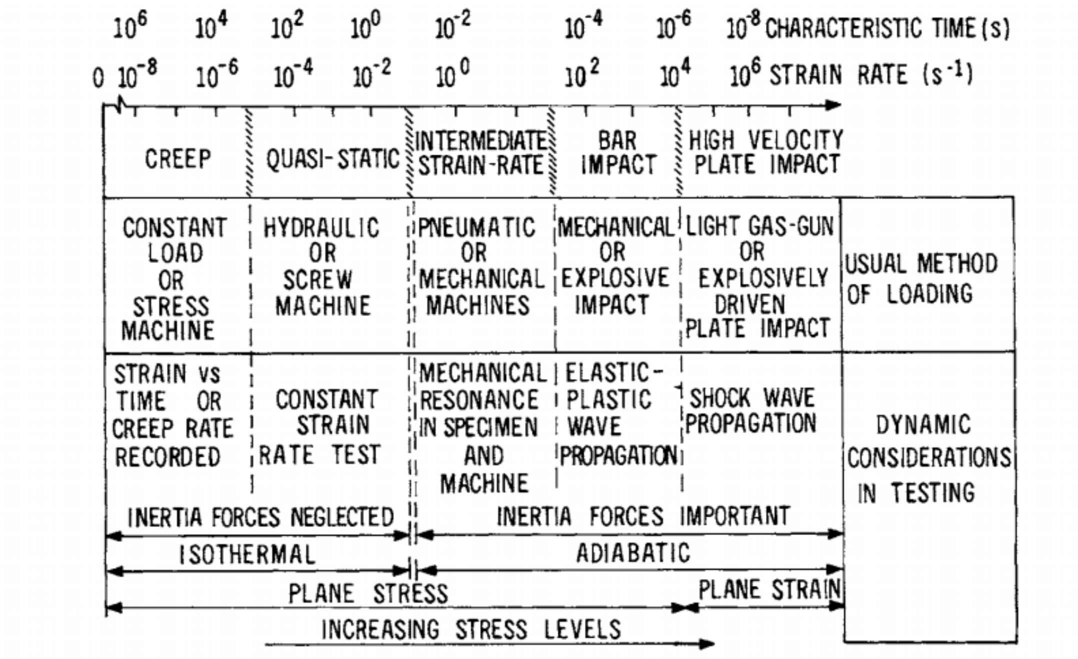


Figura 1.1 Classificazione dei fenomeni in base alla durata del carico e alla velocità di deformazione. Da "Zukas, Dynamic Behavior of Materials and Structures".

Oltre ad una classificazione basata sul tempo caratteristico e sulla velocità di deformazione, è possibile classificare i fenomeni di impatto anche in base all'angolo, alle caratteristiche geometriche, ai materiali del target o del proiettile e alla velocità di impatto. Quest'ultimo approccio è adottato nella tabella 1.1 [1].

$\dot{\varepsilon}$	Velocità di Impatto	Effetto	Metodo di carico
10^8	$> 12\ kms^{-1}$	Vaporizzazione dei solidi in collisione	-
10^6	$3 - 12\ kms^{-1}$	Compressibilità idrodinamica dei materiali non trascurabile	Accelerazione esplosiva
10^6	$1 - 3\ kms^{-1}$	Comportamento fluido del materiale con pressione che eccede la resistenza del materiale; densità parametro dominante	Pistola a polvere
10^4	$500 - 1000\ ms^{-1}$	Comportamento viscoso del materiale con forza ancora significativa	Pistola a polvere
10^2	$50 - 500\ ms^{-1}$	Comportamento principalmente plastico	Cannone ad aria compressa
10^0	$< 50\ ms^{-1}$	Comportamento principalmente elastico con plasticizzazioni locali	Cannone ad aria compressa

Tabella 1.1 Risposta dei materiali in base alla velocità di impatto

L'impatto oggetto di questa tesi, realizzato con un dispositivo ad aria compressa, che rientra nella categoria dei fenomeni dinamici con velocità intermedia di deformazione, è caratterizzato da velocità di impatto inferiori ai 50 m/s e da un comportamento principalmente elastico, con plasticizzazioni locali.

Ovviamente questi intervalli devono essere considerati solo come punti di riferimento in quanto le transizioni dall'uno all'altro sono molto flessibili, essendo questi processi molto complessi e dipendenti da numerosi parametri.

In ogni caso, più aumenta la velocità di impatto, più aumenta la necessità di una descrizione ondulatoria del fenomeno. La presenza di onde elastiche può sempre essere osservata nel target e tali onde possono essere suddivise in longitudinali e trasversali. Ma più si passa da un comportamento principalmente elastico a uno plastico sempre più esteso, più si osserva la generazione di onde di propagazione plastiche, più lente di quelle elastiche, con fenomeni quali grandi deformazioni e riscaldamento, assenti nel caso di urto completamente elastico. Superati i 2-3 km/s, i solidi in collisione possono essere trattati come fluidi in quanto si creano pressioni localizzate che superano la resistenza del materiale; a velocità ancora più elevate (> 12 km/s), si può arrivare ad una vaporizzazione esplosiva dei materiali in collisione [1].

Quando l'impatto è caratterizzato da sollecitazioni a bassa intensità, un ruolo fondamentale viene rivestito tanto dalla geometria quanto dal materiale dell'intera struttura; la risposta, tuttavia, tende a diventare sempre più localizzata all'aumentare dell'intensità del carico, cosa che porta la conoscenza della geometria a perdere di importanza rispetto alla conoscenza del modello costitutivo del materiale nelle vicinanze della zona d'impatto [4].

[2] Gli impatti a bassa velocità e massa elevata vengono spesso simulati in laboratorio utilizzando un tester di impatto a caduta, con cui una massa nota viene fatta cadere da un'altezza nota su un bersaglio, variando massa e altezza di caduta per ottenere l'energia di impatto desiderata. A velocità così basse, la cronologia forza-tempo del dispositivo di simulazione è facilmente ottenibile da un trasduttore di forza collegato.

Gli impatti a velocità intermedia e a velocità elevata vengono spesso eseguiti con l'uso di un dispositivo ad aria compressa o a gas inerte compresso: l'aria compressa viene utilizzata per spingere un proiettile di piccola massa lungo la canna con una certa velocità. Questa tipologia di impatto è quella che verrà affrontata e studiata in questa tesi. Risulta in questo caso abbastanza complesso misurare la forza del proiettile nel momento dell'impatto in quanto la cella di carico collegata al proiettile presenta una serie di cavi che rendono il movimento a velocità così elevate complesso, pericoloso per l'integrità della cella stessa e per l'attendibilità dei risultati finali della prova sperimentale.

Gli eventi di impatto balistico, invece, vengono comunemente eseguiti utilizzando una pistola a polvere, la quale è simile a una pistola a gas, ma fa uso di polvere da sparo per spingere un proiettile molto piccolo lungo la canna. A causa delle velocità ancora più elevate e di problemi di instabilità, la misurazione del movimento e della forza del proiettile è piuttosto complessa.

1.2 Tipologie di impatto

Data la grande varietà di impatti, risulta utile anche eseguire una classificazione tra [5]:

- impatto ideale, nel caso in cui un proiettile sia dotato di moto puramente traslazionale ed entri in contatto con un corpo fermo: è il caso che sarà trattato in questa tesi. Tali condizioni sono nella pratica realizzabili solo in laboratorio, dove non sono presenti fenomeni di disturbo e dove si può decidere di mantenere il bersaglio fisso;
- impatto non ideale, ovvero il caso più realistico, che si ha quando il bersaglio è in movimento oppure il proiettile possiede componenti di velocità non solo traslazionale.

Nel caso di impatto non ideale, si possono individuare tre tipi di angoli, visibili anche nella figura 1.2:

- angolo di obliquità β: angolo compreso tra la traiettoria del proiettile e la normale al target passante per il punto d'impatto;
- angolo di impatto θ: angolo formato tra l'asse del proiettile e la normale al target passante per il punto d'impatto;
- angolo di incidenza α: angolo compreso tra la traiettoria e l'asse del proiettile.

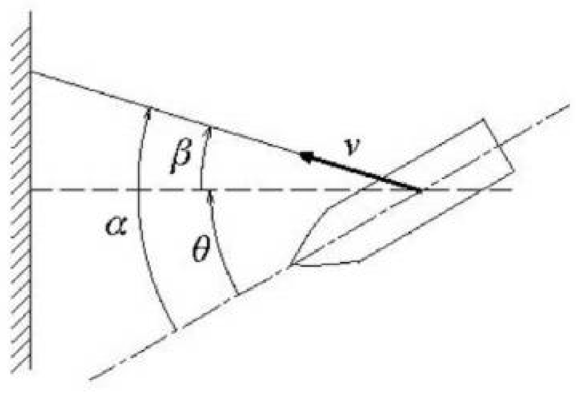


Figura 1.2 Angoli impatto non ideale.
Da "Lumassi, Pisoni, Analisi delle condizioni di impatto balistico su un componente elicotteristico".

Di conseguenza, si potrà avere un [5][1]:

- impatto normale: traiettoria normale all'obiettivo e coincidente con l'asse di simmetria. Lo stato di stress è bidimensionale. È quello che verrà trattato in questo lavoro;
- impatto obliquo: traiettoria ed asse di simmetria del proiettile sono coincidenti ma è presente un angolo rispetto alla normale al target. È presente un'ulteriore complicazione legata alle sollecitazioni di flessione dovute all'asimmetria del carico;
- impatto con incidenza imbardata: traiettoria ed asse di simmetria non sono coincidenti.

Una certa combinazione di geometria del proiettile, caratteristiche del materiale e velocità di impatto può portare al cedimento del proiettile o al rimbalzo dello stesso.

L'azione di impatto di un oggetto può causare sia la deflessione dell'elemento target che danni localizzati nel punto di contatto. Quando si considera un hard impact, significa che tutta l'energia di impatto viene assorbita dalla deflessione del target e non si ha nessun assorbimento di energia a seguito della deformazione locale, come mostrato nella figura 1.3a. La figura 1.3b rappresenta il caso in cui la massa del target risulta molto più alta della massa dell'impattatore, cosa che porta ad una deflessione del target praticamente nulla. Nel caso in cui l'impatto avvenga a velocità molto elevata, può rendersi visibile e prevalente un danno localizzato. La figura 1.3c, invece, presenta lo scenario più generale, in cui si verificano danni sia globali che localizzati.

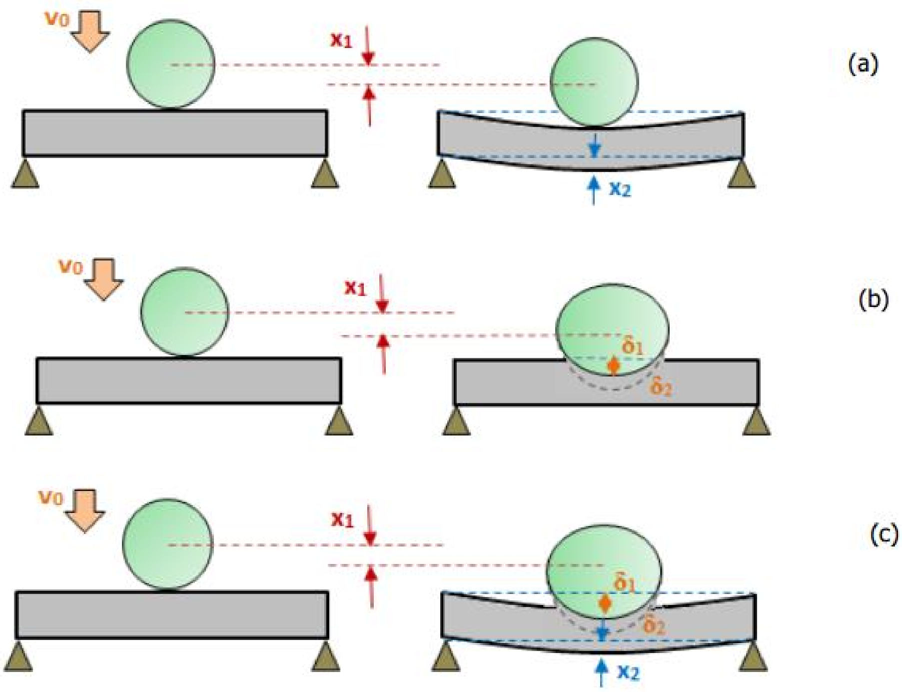


Figura 1.3 a) Solo deflessione target; b) Danno localizzato, deflessione target nulla; c) Danni sia locali che globali. Da "Shihara Perera, Modelling Impact Actions of Flying and Falling Objects".

1.3 Classificazione dei Target

Il target può essere definito come il più piccolo oggetto funzionalmente e/o strutturalmente indipendente le cui prestazioni vengono compromesse dal proiettile [7]. In primo luogo, si dice che un target sia [1]:

- semi-infinito, se non c'è influenza del contorno sul processo di penetrazione;

- spesso se c'è l'influenza del contorno solo dopo una corsa sostanziale del proiettile nel bersaglio;
- intermedio, se la superficie posteriore esercita una notevole influenza sul processo di deformazione durante quasi tutto il movimento del penetratore;
- sottile, se non esistono gradienti di sollecitazione e deformazione in tutto il suo spessore.

Inoltre, l'impatto tra proiettile e target può dar luogo a [7]:

- una perforazione: quando il corpo penetrante passa totalmente attraverso il bersaglio;
- una inclusione: quando il corpo penetrante viene bloccato dal bersaglio e ne resta incastrato al suo interno;
- un rimbalzo: quando il corpo penetrante viene riflesso dal bersaglio senza esserne bloccato.

Tutti questi termini rientrano nella definizione di penetrazione, ovvero l'ingresso del penetratore in una qualsiasi regione del target, cosa che si verifica frequentemente come risultato di molti impatti. Tutti questi processi portano inevitabilmente ad una deformazione anche importante del proiettile, ma soprattutto del target: se la combinazione di intensità di carico e durata supera un dato valore critico per il materiale, il target inizia a rompersi.

1.4 Approcci per lo studio del fenomeno

L'azione di impatto avviene, come già detto, in un tempo molto breve e può essere suddivisa in due fasi: prima e dopo il verificarsi del primo contatto. Appena i due corpi entrano in contatto, si generano sulle superfici forze di compressione uguali ma opposte per il principio di azione e reazione: questa è la fase di carico o compressione (figura 1.4a), durante la quale l'energia cinetica viene trasformata in energia interna di deformazione elastica dalla forza di contatto. Non appena la velocità relativa dei due corpi raggiunge valore nullo, termina la fase di carico e inizia subito quella di scarico o restituzione (figura 1.4b), durante la quale si ha lo scarico dell'energia elastica immagazzinata durante la fase precedente, e che termina quando i due oggetti non sono più in contatto. I due periodi solitamente non hanno uguale durata, a meno che non ci si trovi in una situazione di urto perfettamente elastico; nel momento in cui compare una componente plastica, vi è una dissipazione che porta a una riduzione della durata della fase di restituzione, la quale viene totalmente annullata nel caso di impatto perfettamente plastico, nel quale i due corpi proseguono, teoricamente, senza separarsi. In realtà, al momento del contatto tra i due corpi non esiste solo la componente di velocità normale, che influenza la forza e il periodo di contatto, ma anche la componente tangenziale, responsabile della dissipazione di energia per attrito [4].

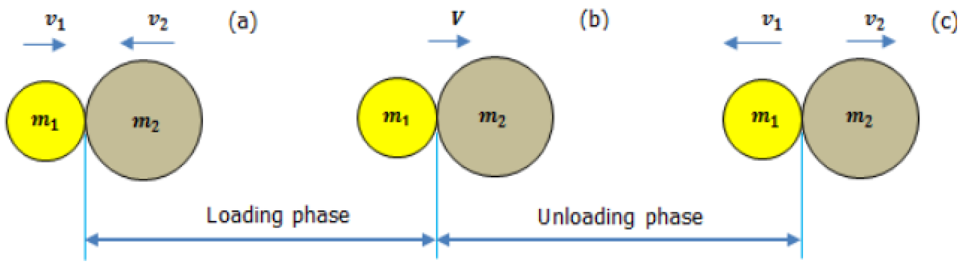


Figura 1.4 a) Primo contatto tra i due corpi; b) I due corpi si avvicinano fin quando la loro velocità relativa non risulta nulla; c) I due corpi non sono più in contatto. Da "Shihara Perera, Modelling Impact Actions of Flying and Falling Objects".

Come si può vedere nella figura 1.5, si possono individuare due componenti nelle forze di impatto normale: la forza quasi statica (o di reazione) e la forza di contatto localizzata, causa di sollecitazioni localizzate attorno al punto di contatto e che può portare a fenomeni come ammaccature, schiacciamenti locali o perforazioni. Generalmente, la forza di contatto ha un valore molto più alto di quello della forza quasi statica a causa della presenza delle forze di inerzia non trascurabili. Risulta quindi evidente come non si possa rappresentare un'azione di impatto utilizzando solamente la forza quasi statica equivalente che genera una quantità simile di deflessione, cosa che spesso viene fatta nel campo ingegneristico, ma è fondamentale fare una distinzione tra i due tipi di forze.

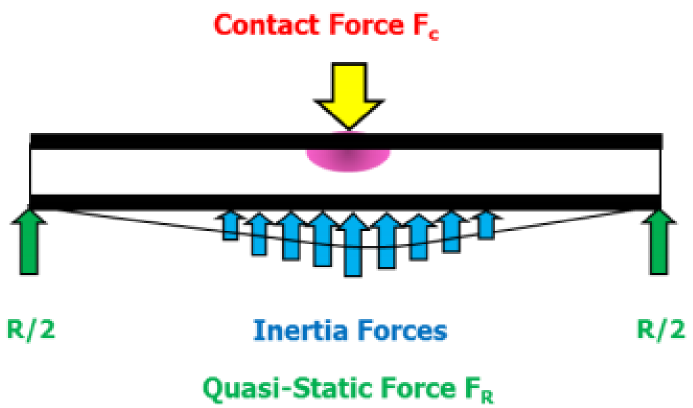


Figura 1.5 Forza di contatto e forza di reazione. Da "Shihara Perera, Modelling Impact Actions of Flying and Falling Objects".

Come dimostrato in [4], la forza di contatto, così come il periodo di contatto, sono influenzati soprattutto dal materiale e dalla geometria dei due corpi. In particolare, la forza di contatto dipende fortemente dal materiale, in quanto l'energia cinetica è legata alla densità: a seguito dell'impatto di una massa con densità maggiore, dovrà essere assorbita una maggiore quantità di energia e quindi si avrà una maggiore forza di contatto. Ma la forza di contatto è influenzata molto anche dalla sezione della superficie impattante; la lunghezza del corpo impattante, invece, influenza molto il periodo di contatto.

La distinzione tra questi due tipi di forze, e in generale lo studio del fenomeno dell'impatto, sono molto complicati ed è per questo che solitamente si seguono tre diversi approcci che si completano a vicenda [1][7]:

1. il metodo sperimentale, per la delineazione di equazioni empiriche o come verifica e controllo delle previsioni fornite dai metodi teorici;
2. procedure analitiche approssimate, che si concentrano su un preciso aspetto del fenomeno e introducono una serie di semplificazioni. Generalmente queste procedure si basano sul bilancio di energia o sulla quantità di moto, considerando o il target o l'impattatore come rigido: solo in pochi lavori si fa riferimento alla deformazione di entrambi i corpi. Inoltre, molte di queste equazioni richiedono la conoscenza di dati che possono essere ottenuti solo sperimentalmente o fanno affidamento a parametri del materiale non facilmente ottenibili.
3. soluzioni numeriche che coinvolgono programmi molto complessi, che richiedono lunghi tempi di calcolo e che si basano sui metodi alle differenze finite o agli elementi finiti, i quali sono anch'essi di natura approssimativa, ma più flessibili e in grado di modellare abbastanza accuratamente fenomeni di questo tipo. È necessario ricorrere a tali simulazioni quando si vuole ottenere una soluzione completa a un problema d'impatto, sia in situazioni complesse come impatti obliqui, sia in casi più semplici e risolvibili con modelli bidimensionali. Permettono infatti di ottenere un'ottima soluzione trattando anche geometrie e stati di carico complessi, ma solamente se si comprende e si caratterizza al meglio il comportamento del materiale.

2 Dimensionamento del proiettile

Prima di poter realizzare il modello FEM, è necessario definire le dimensioni e le proprietà dei due corpi che impattano.

Si considera come target una piastra circolare di raggio

$$a = 150\ mm = 0.15\ m$$

e spessore

$$t = 2\ mm = 0.002\ m$$

Le piastre disponibili in laboratorio sono generalmente quadrate, ma siccome verrà utilizzato un modello FEM assialsimetrico, si preferisce fornire da subito indicazioni riguardanti una geometria circolare, le cui dimensioni sono però abbastanza ampie rispetto al punto di impatto tanto che la diversa geometria non modifica la risposta del corpo nella zona centrale di contatto.

La piastra è realizzata in acciaio inox AISI 316 X5CrNiMo 17-12-2, il quale presenta mediamente la seguente composizione [9]:

Elementi componenti	*Percentuale*
Carbonio, C	<= 0.080 %
Cromo, Cr	16 – 18 %
Ferro, Fe	61.8 – 72%
Manganese, Mn	<= 2.0 %
Molibdeno, Mo	2.0 – 3.0 %
Nichel, Ni	10 – 14 %
Fosforo, P	<= 0.045%
Silicio, Si	<= 1.0 %
Zolfo, S	<= 0.030 %

Tabella 2.1 Composizione AISI 316 X5CrNiMo 17-12-2

I valori di densità ρ_s, modulo di Young E_s, sollecitazione di snervamento σ_y, sollecitazione di rottura σ_r, allungamento percentuale a rottura e modulo di Poisson ν_s sono [9]:

$$\rho_s = 8000\ kg/m^3$$

$$E_s = 1.93x10^{11}Pa = 193\ GPa = 1.93x10^{11}N/m^2$$

$$\sigma_y = 2.9x10^8Pa = 290\ MPa = 2.9x10^8N/m^2$$

$$\sigma_r = 5.8x10^8Pa = 580\ MPa = 5.8x10^8N/m^2$$

$$Allungamento\ percentuale\ a\ rottura = 50\%$$

$$\nu_s = 0.30$$

Nel prossimo capitolo verrà descritto come le proprietà del materiale vengono impiegate nella modellizzazione agli elementi finiti.

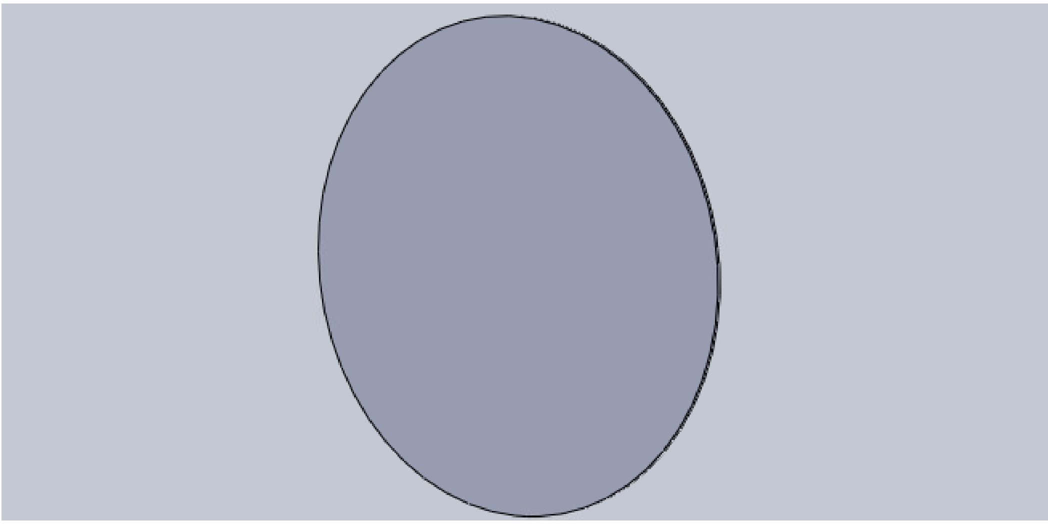


Figura 2.1 Rappresentazione del target

Il proiettile è invece realizzato in acciaio 39NiCrMo3 bonificato, il quale presenta la seguente composizione percentuale e le seguenti proprietà fisiche e meccaniche, alcune delle quali si riferiscono a un acciaio generico [9]:

Elementi componenti	*Percentuale*
Carbonio, C	0.35 – 0.43 %
Cromo, Cr	0.60 - 1.0 %
Ferro, Fe	96.1 - 97.5 %
Manganese, Mn	0.50 - 0.80 %
Molibdeno, Mo	0.15 - 0.25 %
Nichel, Ni	0.70-1.0 %
Fosforo, P	<= 0.035 %
Silicio, Si	0.15 – 0.35 %
Zolfo, S	<= 0.035 %

Tabella 2.2 Composizione percentuale acciaio 39NiCrMo3

$$\rho_i = 7850\ kg/m^3$$

$$E_i = 2.0x10^{11}Pa = 2.0x10^{11}N/m^2$$

$$\nu_i = 0.29$$

$$\sigma_y = 350\ MPa = 3.5\ x10^8 Pa$$

$$\sigma_r = 420\ MPa = 4.2\ x10^8 Pa$$

$$elongazione = 15\%\ strain$$

Il proiettile presenta un corpo cilindrico e una testa semisferica e deve essere inserito all'interno della canna del cannone, la quale ha un raggio di circa 2,4 cm. Si preferisce, però, realizzare il proiettile con un raggio leggermente inferiore, essendo comunque molto facile con un adattatore o sabot ottenere la dimensione finale della canna. Questi elementi verranno ripresi e trattati in modo più preciso nel capitolo relativo alla prova sperimentale. Si considera, quindi, un generico raggio del proiettile pari a:

$$R = 1.5\ cm = 0.015\ m$$

Si suppone una lunghezza totale, ovvero corpo più testa, di:

$$L = 8\ cm = 0.08\ m$$

La lunghezza del solo corpo risulta quindi:

$$L_c = 6.5\ cm = 0.065\ m$$

La lunghezza del corpo non deve essere troppo elevata perché altrimenti le masse in gioco diventerebbero troppo alte, ma non deve essere neanche troppo limitata rispetto al naso perché è necessario che ci sia lo spazio sufficiente per inserire la cella di carico.

La massa risulta di conseguenza pari a:

$$m = \rho\left(\frac{1}{2}\frac{4}{3}\pi R^3 + \pi L_c R^2\right) = 7850\,\frac{kg}{m^3}\cdot\left(\frac{2}{3}\cdot\pi\cdot(0.015m)^3 + \pi\cdot 0.065m\cdot(0.015m)^2\right)$$
$$\approx 0.416\ kg$$

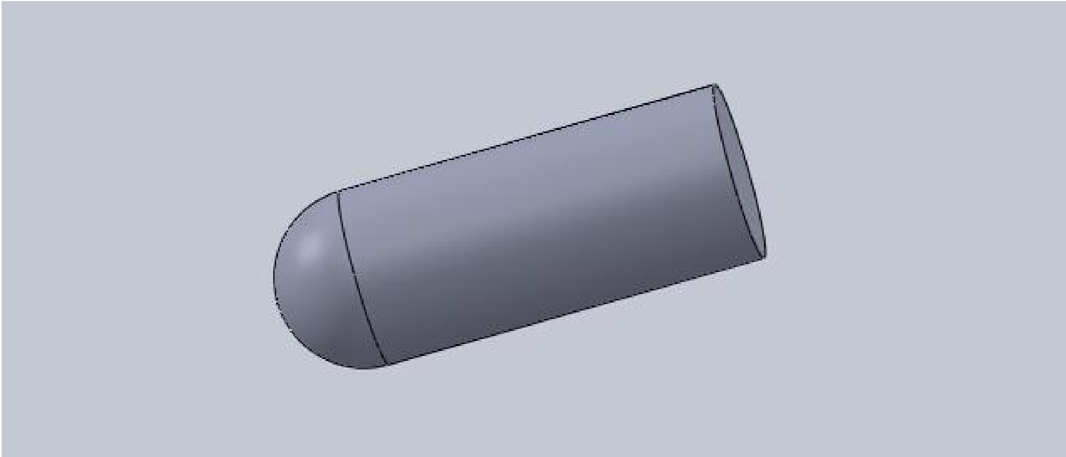


Figura 2.2 Rappresentazione del proiettile

Avendo definito la geometria del proiettile, è molto facile calcolare la velocità V necessaria per ottenere due diversi valori indicativi di energia cinetica, ovvero $E_k = 10, 100\,J$:

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2$$

$$V = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} \approx \begin{cases} 7\,\frac{m}{s} & [E_k = 10\,J] \\ 22\,\frac{m}{s} & [E_k = 100\,J] \end{cases}$$

Le dimensioni del proiettile fornite in questo capitolo sono solamente dei valori iniziali che verranno modificati nel corso della tesi, dopo aver realizzato una serie di considerazioni tramite diversi modelli e analisi agli elementi finiti. Si rimanda quindi ai capitoli successivi per la conoscenza delle dimensioni definitive scelte anche per le prove sperimentali.

3 Analisi agli elementi finiti

Le analisi numeriche risultano fondamentali perché permettono di modellare situazioni anche molto complesse, valutando numerosi aspetti difficilmente prevedibili con modelli analitici e permettendo di programmare l'attività sperimentale, indirizzandola verso gli aspetti più critici e riducendone in questo modo tempi e costi.

L'approccio utilizzato nella maggior parte di queste analisi è quello agli elementi finiti, il quale, in maniera molto sintetica, consiste nel [1]:

- dividere il continuo in un numero finito di regioni molto piccole, chiamate elementi, le quali interagiscono tra di loro solamente in una serie di punti chiamati nodi. Le incognite base del problema sono gli spostamenti in questi nodi;
- definire lo spostamento in ogni punto all'interno dell'elemento in funzione dello spostamento nodale utilizzando un set di funzioni specifiche;
- definire tramite queste funzioni di spostamento uno stato di deformazione per ogni singolo elemento e, di conseguenza, uno stato di stress;
- determinare un sistema di forze concentrate nei nodi per equilibrare i carichi esterni. I dati dei singoli elementi vengono poi assemblati per comprendere il comportamento globale.

In questo lavoro di tesi, vengono realizzati diversi modelli dell'impatto tra proiettile e target utilizzando il software commerciale ad elementi finiti della Dassault Systemes Abaqus CAE sia per la creazione del modello che per la visualizzazione dei risultati. Il pre-processore, infatti, permette di definire e di visualizzare molto facilmente la geometria, le condizioni iniziali e la descrizione dei materiali, preparando tutte le informazioni necessarie per l'analisi, la quale avviene attraverso il processore principale. Il post-processore, invece, permette di visualizzare graficamente e in maniera molto intuitiva i risultati di interesse delle analisi. L'obiettivo finale in questo caso è stato controllare:

1. lo stress σ e la deformazione ε che si generano nel proiettile e, conseguentemente, capire se il corpo rimane in campo elastico, si deforma plasticamente o, eventualmente, arriva a rottura;
2. l'andamento dell'energia cinetica nel proiettile e quindi la quantità che viene persa durante l'urto. Questo è importante soprattutto se si realizzano due impatti consecutivi;
3. la differenza tra la forza calcolata dal programma nel punto di impatto e lo stress che si genera nel proiettile nella zona dove dovrebbe essere posizionata la cella di carico.

Per semplicità e velocità di calcolo, tutti i modelli che vengono realizzati sono di tipo bidimensionale assialsimmetrico: realizzare un modello tridimensionale, infatti, anche considerando solo un quarto del sistema totale, richiederebbe molte ore se non addirittura giorni di calcolo. Prima di realizzare il modello, vengono riportate alcune considerazioni su come lavora e ragiona Abaqus.

Dal manuale di Abaqus, si legge cosa si intende per elementi Axisymmetric: sono elementi utili per la modellazione di corpi di rivoluzione in condizioni di carico assialmente simmetriche. Un corpo di rivoluzione viene generato ruotando una sezione trasversale piana attorno a un asse, ovvero l'asse di simmetria, ed è facilmente descritto in coordinate polari cilindriche r, z e. θ. La figura 3.1 mostra una tipica sezione trasversale (cross section) di riferimento in θ=0. Le coordinate radiali e assiali di un punto su questa sezione trasversale sono indicate rispettivamente con r e z. In θ=0 le coordinate radiali e assiali coincidono con le coordinate cartesiane X e Y globali. ABAQUS non applica automaticamente le condizioni al contorno ai nodi che si trovano sull'asse di simmetria nei modelli assialsimmetrici: se necessario, bisogna applicarle direttamente.

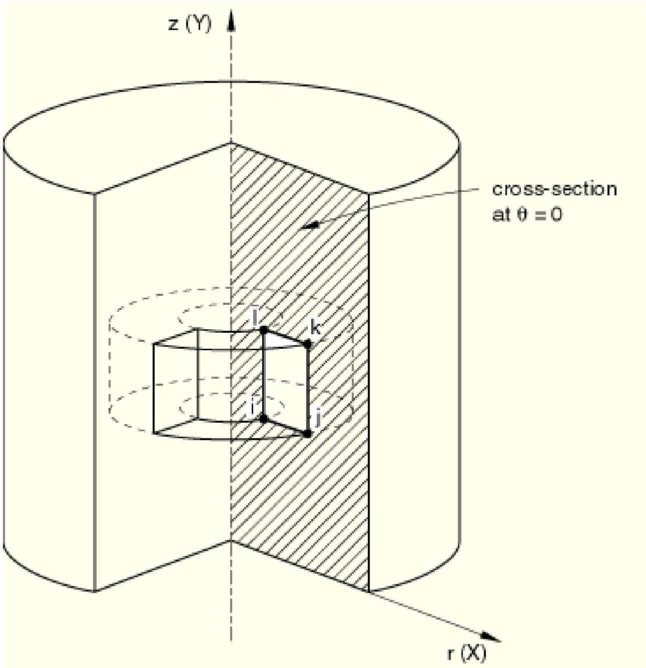


Figura 3.1 Tipica sezione trasversale di un corpo di rivoluzione.
Da "Abaqus/CAE User's Manual".

Quindi la soluzione in qualsiasi piano r-z definisce completamente la soluzione nell'intero corpo nel momento in cui il carico e le proprietà del materiale sono indipendenti da θ. La figura 3.1 mostra un elemento di un corpo assialsimmetrico, in cui nodi i, j, k e l sono in realtà, come si può notare, "cerchi" nodali e il volume del materiale associato all'elemento è quello di un corpo di rivoluzione. Allo stesso modo, il valore di un carico nodale o di una forza di reazione è il valore totale sull'anello.

Gli elementi assialsimmetrici regolari (CAX) per applicazioni strutturali consentono solo il carico radiale e assiale, sono associabili a materiali con proprietà isotrope o ortotrope e sono indicati come elementi privi di torsione. Poiché lo spostamento deve anche essere puramente assialsimmetrico, ci sono solo quattro possibili componenti non nulle di deformazione ($\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{\theta\theta}, \gamma_{rz}$).

Nei problemi di impatto, inoltre, è molto importante la definizione del contatto. Abaqus / CAE non riconosce il contatto meccanico tra due parti o due regioni di un assieme a meno che esso non sia specificato nel modulo interazione; la semplice vicinanza fisica di due superfici in un assieme, infatti, non è sufficiente per indicare alcun tipo di interazione tra le superfici.

Come si legge nel manuale di Abaqus, Abaqus / Explicit fornisce diversi algoritmi per modellare le interazioni di contatto:

- le interazioni di tipo "*general contact*" consentono di definire il contatto tra tutte le superfici e gli spigoli che costituiscono il modello ed è molto utile nei casi in cui, a priori, non si possono conoscere le superfici oggetto di contatto; per perfezionare il dominio del contatto, si possono includere o escludere coppie di superfici specifiche;
- le interazioni di tipo "*Surface-to-surface contact*" descrivono invece il contatto tra due superfici deformabili o tra una superficie deformabile e una rigida, le quali devono essere esplicitamente specificate. Il vantaggio è sicuramente un minor rallentamento dei calcoli rispetto al caso precedente;
- le interazioni di *"Self-contact"* descrivono invece il contatto tra diverse aree su una singola superficie.

Nel caso in esame, il contatto avviene tra la faccia anteriore del proiettile e la superficie anteriore del target: è conveniente inserire un "*Surface-to-surface contact*". Viene in un primo momento considerata l'assenza di un qualsiasi attrito tra le superfici, ma in secondo luogo si inserisce tale fenomeno tramite un coefficiente di attrito dinamico tra i due corpi, il quale dipende dal materiale dei corpi stessi. Viene anche inserita la relazione "hard contact", che riduce al minimo la penetrazione della superficie slave nella superficie master nei punti di vincolo.

Abaqus / Explicit, inoltre, utilizza due metodi diversi per applicare i vincoli di contatto:

- l'algoritmo di contatto "*kinematic*" utilizza un algoritmo di contatto predittore/correttore cinematico per applicare rigorosamente i vincoli di contatto (ad esempio, non sono consentite penetrazioni);
- l'algoritmo di contatto "*penalty*" ha un'applicazione più debole dei vincoli, ma consente il trattamento di tipi più generali di contatto.

Le coppie di contatto in Abaqus / Explicit utilizzano l'applicazione *kinematic* per impostazione predefinita, ma è possibile modificare tale impostazione e applicare la *penalty*, come verrà fatto nel caso in esame. Entrambi i metodi, comunque, conservano la quantità di moto tra i corpi in contatto.

Un'altra considerazione d'obbligo prima di passare alla realizzazione del modello riguarda il materiale, per la modellazione del quale ci sono diverse possibilità:

- la prima è definire un materiale perfettamente plastico, ovvero un materiale che ha un tratto plastico parallelo all'asse delle deformazioni, cioè la tensione in fase plastica è costantemente uguale alla sua σ_y di snervamento: si può fare aggiungendo la plasticità al materiale elastico perfetto. È sufficiente definire la tensione di snervamento (tensione reale) e immettere "0" per la deformazione plastica. L'acciaio non è però un materiale perfettamente plastico;

- la seconda opzione è utilizzare le curve di sforzo-deformazione reali e i corrispondenti valori di stress e deformazione reali riferiti al comportamento plastico.

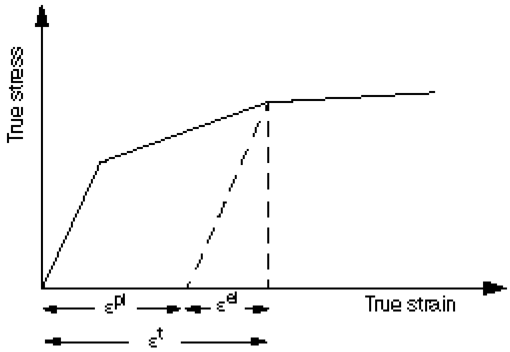


Figura 3.2 Generica curva sforzo-deformazione

Si ricorda che il comportamento elastico può essere facilmente definito inserendo il modulo di Young e quello di Poisson. Per descrivere il comportamento plastico, invece, non avendo a disposizione tutti i punti della curva sforzo-deformazione per i materiali in esame, la si approssima tramite l'equazione di Ramberg-Osgood, che calcola la deformazione ingegneristica totale come funzione dello stress, nel caso in cui si consideri la σ_y come lo stress a cui corrisponde una deformazione residua dello 0.2%:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^{1/n}$$

Il primo termine si riferisce alla deformazione elastica e il secondo a quella plastica. In particolare, si possono definire i valori di deformazione totale, plastica ed elastica corrispondenti alla sollecitazione di snervamento e a quella di rottura nel seguente modo:

	Stress σ	Deformazione totale ε	Deformazione elastica ε_e	Deformazione plastica ε_p
Snervamento	σ_y	$\frac{\sigma_y}{E} + 0.002$	$\frac{\sigma_y}{E}$	0.002
Rottura	σ_r	$\frac{\sigma_r}{E} + \varepsilon_f$	$\frac{\sigma_r}{E}$	ε_f

Tabella 3.1 Formule generiche per la deformazione elastica e plastica

Dove ε_f è semplicemente la percentuale di elongazione espressa in forma decimale.

Importante ricordare che su Abaqus è necessario inserire i valori di tensione e deformazione plastiche reali e non nominali, ovvero:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom})$$
$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom})$$

Si riportano le tabelle riepilogative dei valori da inserire in Abaqus per descrivere il comportamento plastico rispettivamente dell'acciaio e dell'AISI 316.

	Stress nominale (Pa)	**Deform. Pl. Nominale**	**Stress reale (Pa)**	**Deform. Pl. Reale**
Snervamento	3.5E+08	0.002	3.507E+08	0.001998
Rottura	4.2E+08	0.15	4.83E+08	0.14

Tabella 3.2 Valori di stress e deformazione reale per l'acciaio

	Stress nominale (Pa)	**Deform. Pl. Nominale**	**Stress reale (Pa)**	**Deform. Pl. Reale**
Snervamento	2.9E+08	0.002	2.906E+08	0.001998
Rottura	5.8E+08	0.5	8.7E+08	0.4055

Tabella 3.3 Valori di stress e deformazione reale per l'AISI 316

- La terza possibilità, molto usata nell'ambito della modellazione degli impatti per descrivere il comportamento plastico del materiale, è il modello di Johnson-Cook. Come definito sempre nel manuale di Abaqus, questo modello è adatto in caso di tassi di deformazione elevati di molti materiali, inclusa la maggior parte dei metalli, ed è tipicamente utilizzato nelle simulazioni dinamiche transitorie adiabatiche; può essere utilizzato insieme al modello di guasto dinamico di Johnson-Cook e deve essere utilizzato insieme al modello di materiale elastico lineare.
  Questo modello [11] è comunemente usato per descrivere lo stress nei metalli come il prodotto degli effetti della temperatura, della deformazione e della velocità di deformazione tramite la formula:

$$\sigma = \left(A + B\left(\varepsilon_{pl}\right)^n\right)\left[1 + CLn\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_{ref}}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{tr}}{T_{melt} - T_{tr}}\right)^m\right]$$

Dove σ è il flusso di stress, ε_{pl} è la deformazione plastica, $\dot{\varepsilon_{pl}}$ è la velocità di deformazione (1/s), $\dot{\varepsilon_{ref}}$ è la velocità di deformazione plastica di riferimento (1/s), che è di solito normalizzata a una velocità di deformazione di 1 al secondo, T è la temperatura di analisi corrente (° C), Ttr è la temperatura di transizione, che è definita come la temperatura a cui o al di sotto della quale non c'è nessuna dipendenza dalla temperatura nell'espressione della σ, Tm è la temperatura di fusione del materiale da lavorare.

A, B, C, n e m sono le costanti del materiale che possono essere determinate sperimentalmente alla temperatura di transizione o a una temperatura inferiore. In particolare, il coefficiente A è legato alla resistenza allo snervamento (MPa), B è il modulo di indurimento (MPa), C è il coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione, n è il coefficiente di indurimento e m il coefficiente di rammollimento termico.

Il cedimento nel materiale target è introdotto con il modello di danno Johnson – Cook, il quale assume la deformazione plastica all'inizio del danno come:

$$\varepsilon_D^{pl} = \left[d_1 + d_2 exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right)\right]\left[1 + d_4 Ln\left(\frac{\dot{\varepsilon_{pl}}}{\dot{\varepsilon_{ref}}}\right)\right]\left[1 - d_5\left(\frac{T - T_{tr}}{T_{melt} - T_{tr}}\right)^m\right]$$

Dove ε_D^{pl} è la deformazione plastica equivalente all'inizio del danno, d1-d5 sono parametri di cedimento, p è la sollecitazione media (o idrostatica), q è la sollecitazione di von Mises ed *m* è una costante del materiale.

Il problema principale dell'ultimo modello proposto, che lo rende difficilmente utilizzabile nel caso che si sta trattando in questa tesi, è che tutti i coefficienti sopra riportati devono essere determinati sperimentalmente e devono essere estremamente precisi e fedeli alla realtà per ottenere dei risultati accurati. Sono presenti in letteratura una serie di riferimenti utili a riguardo, ma si rischia che non siano perfettamente applicabili al caso in esame e che quindi, invece che rendere l'analisi più precisa, la rendano meno affidabile.

Risulta più conveniente, di conseguenza, utilizzare, almeno in un primo momento, il secondo metodo riportato sopra che, seppur meno preciso nella sua definizione, è applicabile in maniera più accurata. Tuttavia, è importante precisare che le proprietà dei materiali sopra riportate e che verranno inserite nella simulazione sono state prese dalla letteratura e non sono state trovate sperimentalmente: è quindi probabile che, quando si eseguirà la prova sperimentale effettiva, i risultati non siano totalmente coerenti con la realtà.

Per quanto riguarda la risoluzione del problema di impatto, viene utilizzato il codice esplicito, che è il più diffuso per le analisi dinamiche, le quali prevedono elevate non linearità, grandi deformazioni e cambiamenti delle condizioni di contatto. Esso permette, infatti, di effettuare in tempi relativamente brevi analisi anche molto complesse, ma richiede una grande attenzione nel controllo dei risultati in quanto l'accumulo di errori nel processo di integrazione può facilmente portare a stime sbagliate. Abaqus/Explicit usa un metodo alle differenze centrali per integrare le equazioni del moto in maniera esplicita nel tempo, usando le condizioni cinematiche al passo i per calcolare quelle al passo i+1, riuscendo ad integrare in maniera esatta solo le accelerazioni costanti: quando si è in presenza di forze non costanti, diviene quindi necessario avere incrementi di tempo relativi ad ogni passo molto piccoli in modo che si possa considerare l'accelerazione costante senza causare errori eccessivi. Questo porta alla necessità di avere migliaia di incrementi ognuno dei quali, però, ha un basso costo computazionale.

Un fattore che risulta critico nel caso di un solutore esplicito è il tempo di incremento stabile [4], il quale determina la durata della simulazione. Si può definire tale limite di stabilità come segue:

$$\Delta t_{stab} = \frac{L_e}{c_d}$$

In cui L_e è la lunghezza caratteristica del più piccolo elemento e c_d è la velocità di propagazione delle onde dilatazionali nel materiale, definita come:

$$c_d = \sqrt{\frac{1}{\rho}\frac{d\sigma}{d\varepsilon}}$$

Che nel caso di materiale lineare elastico diventa:

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

L'utente, tuttavia, non ha bisogno di fare alcun calcolo in quanto il programma sia valuta il tempo di incremento stabile iniziale, sia lo adatta nel corso dell'analisi in quanto la distorsione degli elementi fa variare inevitabilmente la loro lunghezza caratteristica. In questa tesi l'incremento viene infatti impostato su Automatic. Tuttavia, è utile realizzare una simulazione per valutare il limite calcolato dal programma e, eventualmente, ridurlo in seguito. In ogni caso, l'eventuale superamento del limite di stabilità si può facilmente verificare controllando il valore dell'energia totale del modello, la quale non dovrebbe variare molto nel corso dell'analisi.

Il limite di stabilità è quindi strettamente correlato a come viene realizzata la mesh del modello. In primo luogo, gli elementi dovrebbero essere realizzati il più grandi possibile, in quanto questo permetterebbe un aumento del Δt_{stab} e quindi un'analisi più veloce; questo, però, risulta in contrasto con la necessità di ottenere risultati accurati che è legata all'utilizzo di una mesh raffinata. È necessario, quindi, tramite un'analisi di convergenza, riuscire a trovare una dimensione della mesh che garantisca risultati accurati in tempi abbastanza brevi. In secondo luogo, essendo il limite di stabilità influenzato anche se un singolo elemento risulta distorto, diviene fondamentale avere una mesh regolare e cercare di non raffinare la mesh solo in specifiche zone in quanto l'interfaccia tra elementi grandi e piccoli può aumentare la durata dell'analisi. Si può comunque controllare questo aspetto molto facilmente in quanto Abaqus fornisce nello status file (.sta) la possibilità di consultare la lista dei dieci elementi che hanno il limite di stabilità più basso.

Anche il modello del materiale influenza ovviamente il limite di stabilità, essendo questo strettamente correlato alla velocità di propagazione delle onde dilatazionali. Se il modello è elastico, la velocità di propagazione è costante e il tempo di incremento stabile dipende dal materiale più rigido; se si entra in campo plastico, la rigidezza diminuisce e la velocità di propagazione diminuisce, aumentando il limite di stabilità.

3.1 Proiettile con energia 10 J e velocità 7 m/s

3.1.1 Impatto singolo: proiettile cilindrico

Si parte dal caso più semplice possibile, ovvero quello di un singolo impatto tra il target e un proiettile con una geometria cilindrica, sempre utilizzando un modello assialsimmetrico bidimensionale. Per cercare di semplificare ulteriormente l'analisi, per il momento entrambi i corpi sono realizzati in acciaio generico con proprietà elastico-plastiche. Le dimensioni del target e del proiettile sono quelle riportate nel capitolo precedente, ovvero:

$$a_{target} = 150\ mm = 0.15\ m$$

$$t_{target} = 2\ mm = 0.002\ m$$

$$R_{pro} = 1.5\ cm = 0.015\ m$$

$$L_{pro} = 8\ cm = 0.08\ m$$

Le figure 3.3 e 3.4 mostrano rispettivamente come appare il modello bidimensionale che è stato realizzato e il modello tridimensionale corrispondente:

Figura 3.3 Modello bidimensionale impatto singolo con proiettile cilindrico

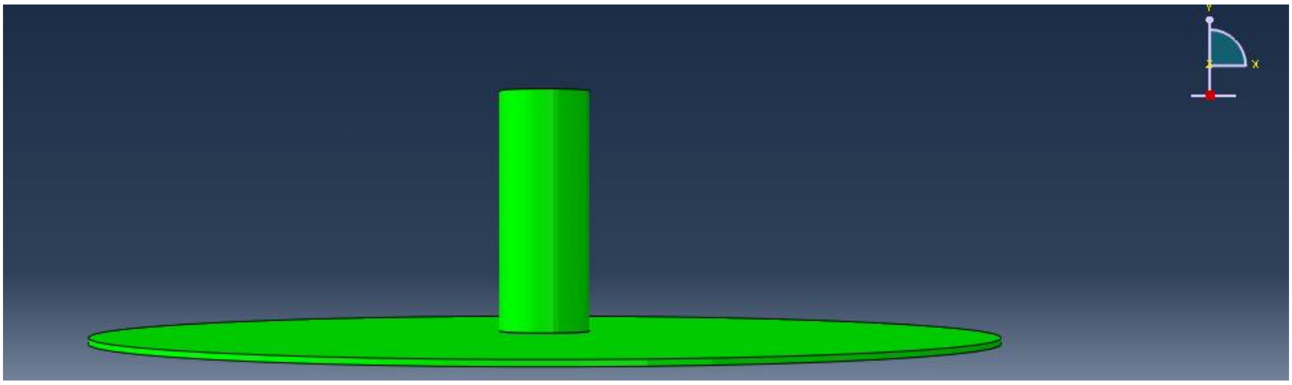


Figura 3.4 Modello tridimensionale impatto singolo con proiettile cilindrico

In questo specifico caso, per quanto concerne l'interazione tra i due corpi, non è stato inserito l'attrito in direzione tangenziale per evitare la dissipazione di energia per attrito, ma solamente un Hard Contact in direzione normale ed è stato utilizzato il Penalty Contact Method. Queste scelte sono state prese sempre per semplificare il più possibile l'analisi.

Il proiettile è soggetto ad una velocità di 7 m/s in direzione del target, al quale è applicato un vincolo di appoggio, ovvero un impedimento al movimento in direzione y. Il proiettile, invece, non è soggetto ad alcun tipo di vincolo.

Gli elementi che costituiscono la mesh sono di tipo esplicito, assisimetrico e lineare a 4 nodi (CAX4R) di dimensione 0.0005 sia nel proiettile che nel target.

L'analisi ha una durata di 0.01s e viene realizzata tramite 133378 incrementi; il tempo di incremento stabile calcolato automaticamente da Abaqus risulta di circa 7.5079e-8, più conservativo del valore 9.8742e-8 che si può calcolare tramite la formula riportata precedentemente. L'energia totale del sistema rimane sempre costante e pari a circa 10.806 J.

Si realizzata prima di tutto un confronto sulla superficie di contatto appartenente al proiettile (0 m dal naso del proiettile) tra la forza di impatto CFN2 calcolata da Abaqus in direzione y e la forza che si ottiene a partire dallo stress S22 in direzione y su quella sezione. Questa seconda forza, indicata con F_cl_0m è stata calcolata considerando che ogni elemento presenta uno stress che deve essere moltiplicato per l'area della corona circolare corrispondente. Si ottengono così una serie di forze (una per ogni elemento della superficie) che devono essere sommate per ottenere una forza paragonabile a quella di contatto. Si noti come le due curve siano quasi completamente sovrapposte, tranne delle inevitabili oscillazioni sulla curva che rappresenta lo stress.

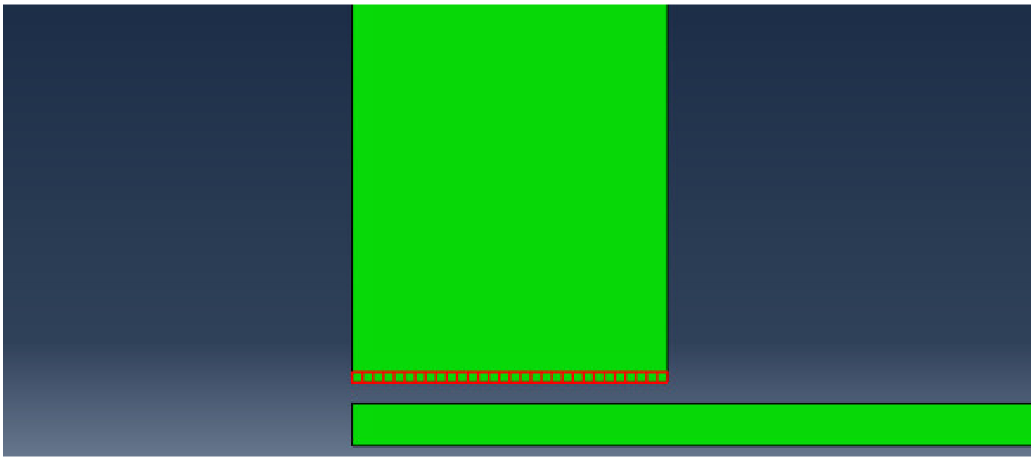


Figura 3.5 Sezione proiettile 0m

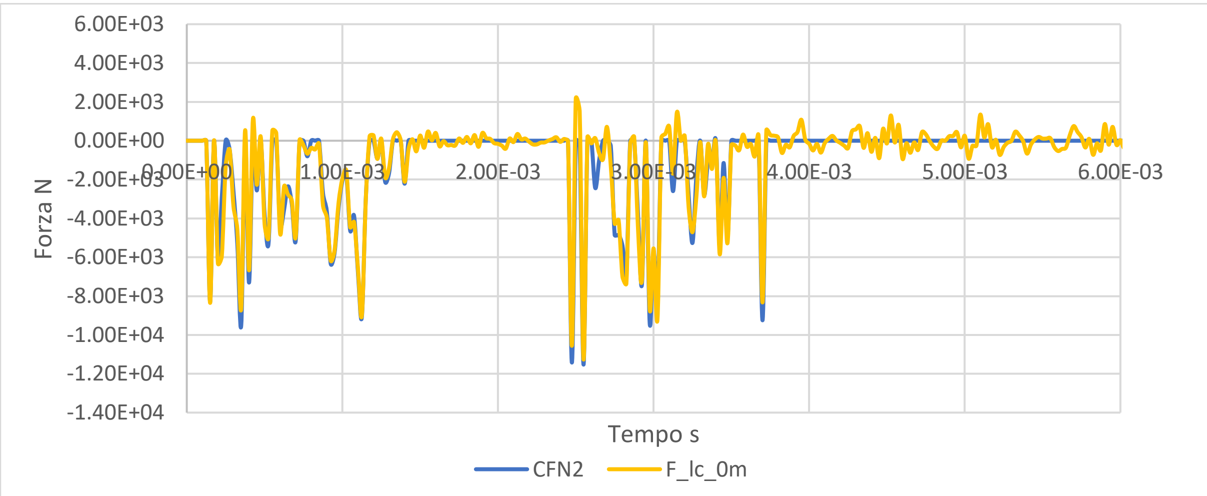


Figura 3.6 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0m

Le curve vengono rappresentate solo fino all'istante temporale 0.006s per rendere maggiormente visibile il momento dell'impatto.

Si cerca a questo punto di realizzare lo stesso confronto su superfici del proiettile più lontane dal punto di impatto, per capire se sia possibile, posizionando la cella di carico a queste distanze, relazionare la S_22 trasformata in F_lc con la CFN2 calcolata da Abaqus. In particolare, il calcolo di F_lc è stato realizzato per molte posizioni diverse, come si può notare dai grafici (le posizioni sono calcolate a partire dalla punta del naso):

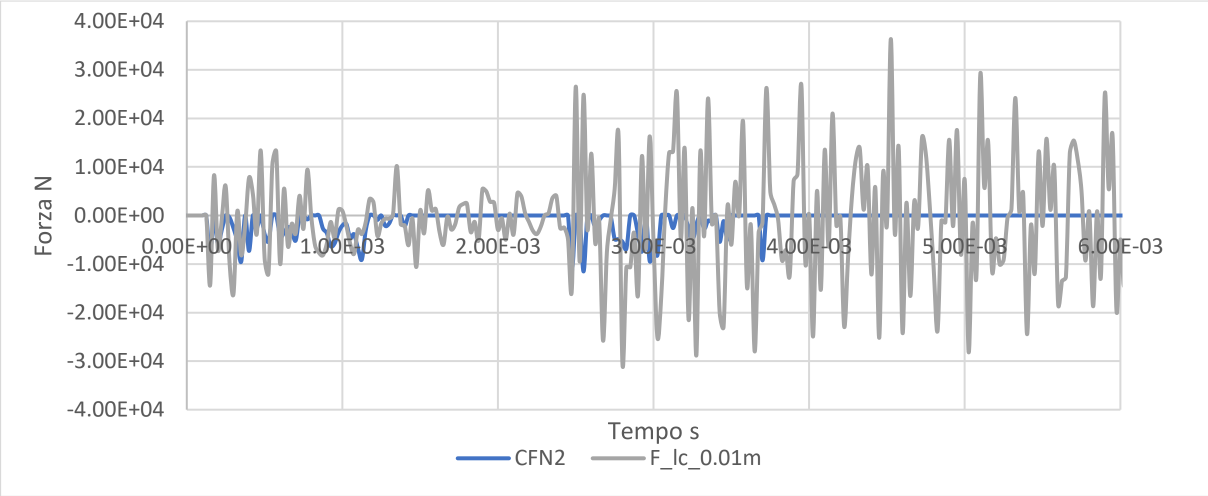


Figura 3.7 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.01m

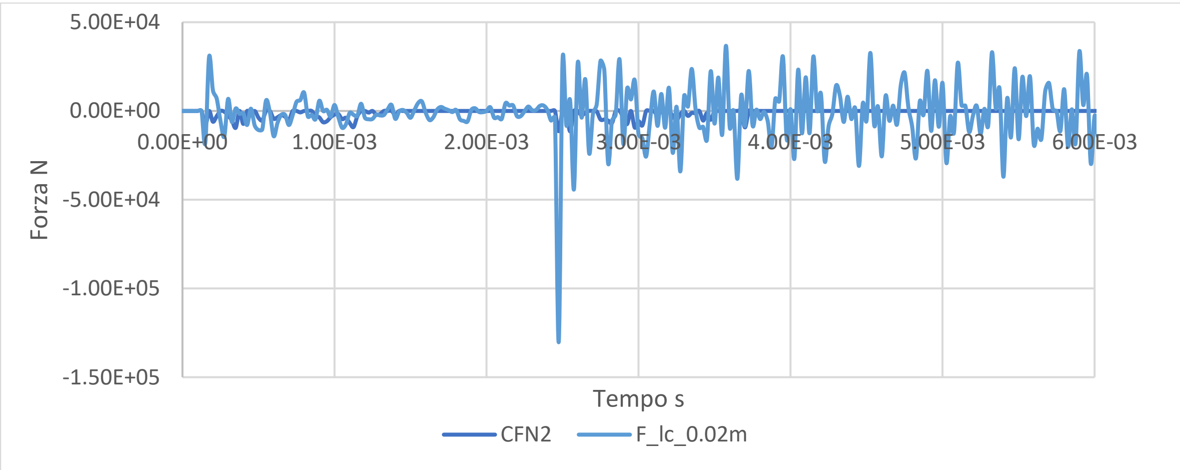


Figura 3.8 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.02m

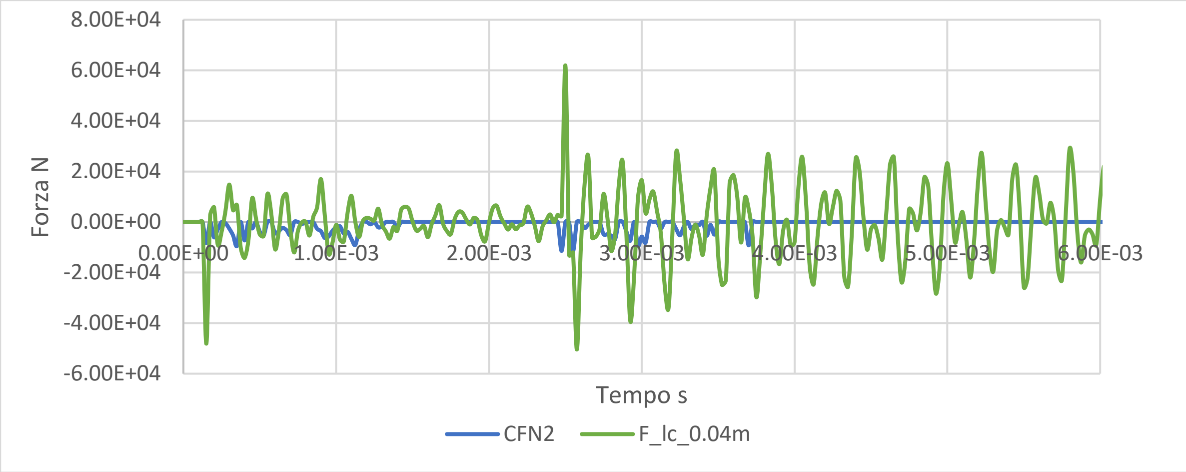


Figura 3.9 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.04m

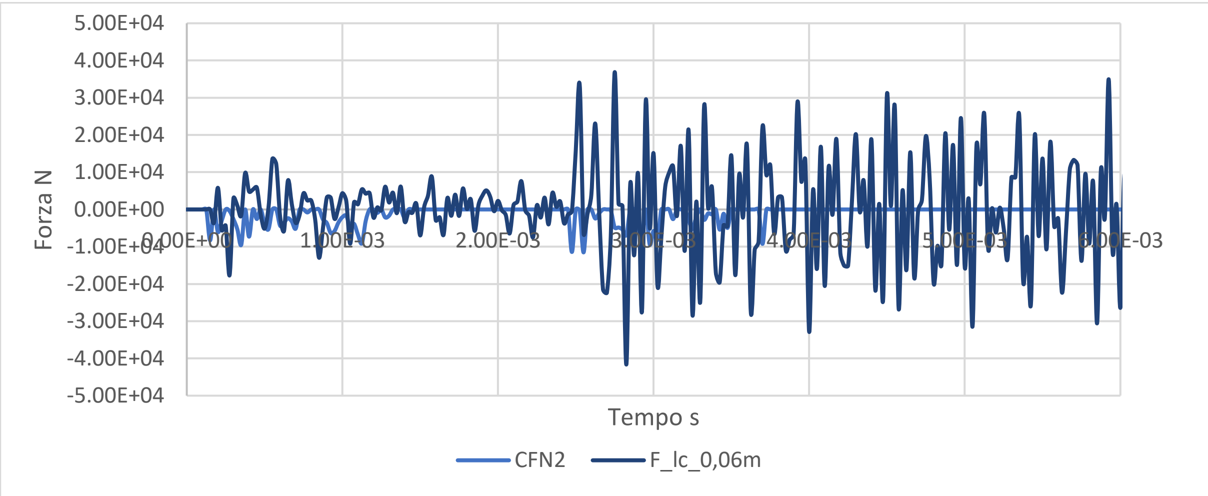


Figura 3.10 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.06m

Come si può facilmente notare, nessuna di queste curve è confrontabile con quella della forza di contatto, in quanto presentano tutte dei valori decisamente maggiori in modulo e un andamento che non rispecchia quello della CFN2.

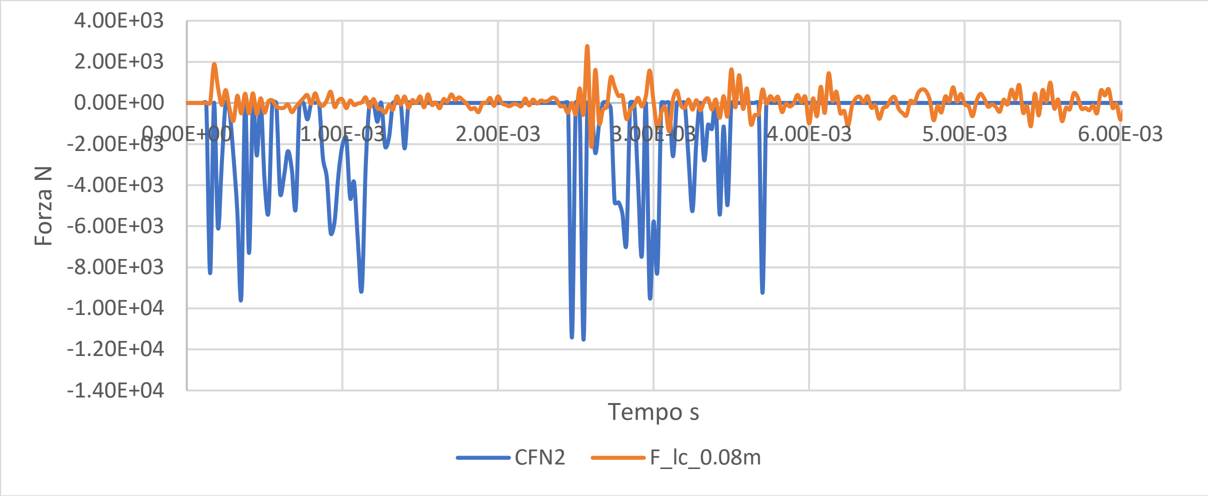


Figura 3.11 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.08m

Prendendo la F_lc calcolata nella sezione finale del proiettile, ovvero 0.08 m, si può notare come risulti avere valori molto più piccoli in modulo rispetto a CFN2. Questa sezione non verrà più presa in considerazione a partire da questo punto.

Si cerca di capire se possa esserci un modo per far coincidere le curve CFN2 e F_lc nelle diverse stazioni. Essendo tutte le curve riportate molto simili tra di loro, almeno in quanto ad ordine di grandezza, si decide di realizzare tutte le considerazioni e i calcoli successivi solo su due di esse, ovvero F_lc_0.04m, la quale si trova esattamente al centro del proiettile, e la F_lc_0.02m, la quale risulta un po' più vicina al punto di impatto.

Si valuta l'aggiunta dell'inerzia della porzione di proiettile tra il punto di impatto e la posizione della cella di carico, in quanto è il contributo più evidente e che può modificare in maniera sostanziale l'andamento della forza. L'equazione del moto, infatti, può essere scritta come:

$$F_c = F_{lc} \mp F_i$$

con F_c che è la forza di contatto nel punto di contatto, F_{lc} la forza generata dall'impatto nella zona della cella di carico, calcolata nel caso in esame a partire dallo stress, come già descritto sopra, e F_i la forza di inerzia della sezione.

È chiaro il perché non sia stato necessario inserire questo contributo nel caso di sezione a 0m dal punto di impatto

È importante a questo punto capire come poter calcolare la forza di inerzia della sezione nel miglior modo possibile. Si sa che:

$$F_i = m \cdot a$$

con m che è la massa della sezione stessa, facilmente calcolabile conoscendone la densità ed il volume, informazioni note:

$$m = \rho \cdot Vol = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h$$

con h distanza della sezione considerata dal punto di impatto (0.02m e 0.04m nei due casi in esame), quindi:

$$m_{0.02m} \approx 0.110\ kg$$
$$m_{0.04m} \approx 0.220\ kg$$

L'accelerazione, invece, si ottiene tramite una media del valore di accelerazione calcolato da Abaqus sui vari nodi della sezione.

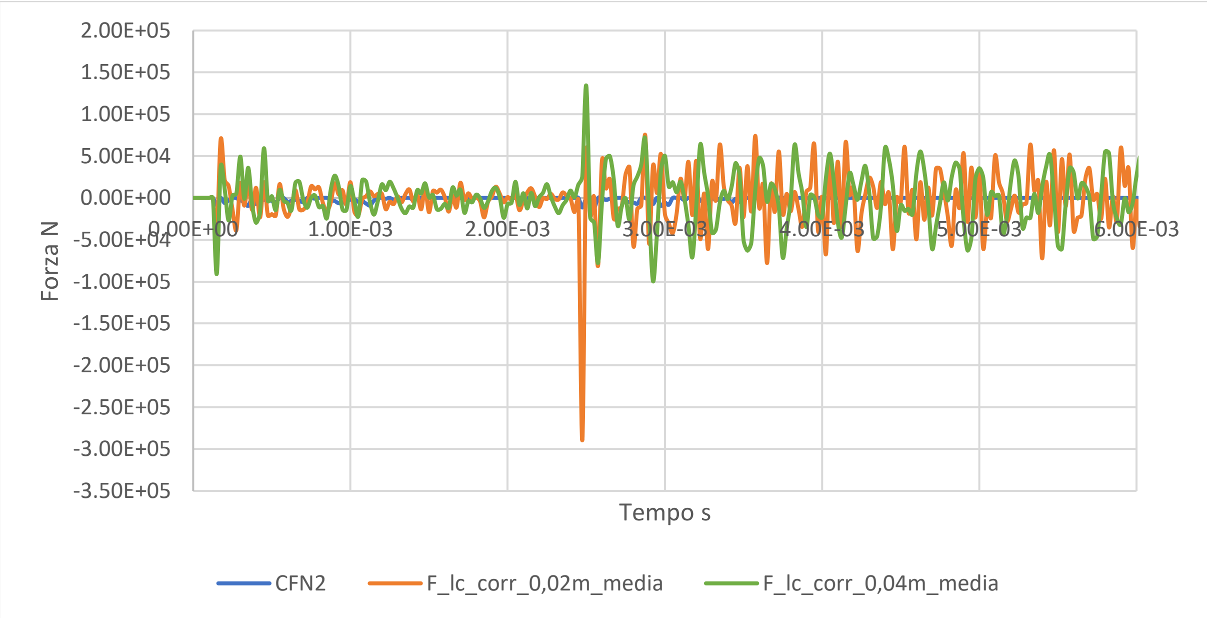


Figura 3.12 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nelle sezioni a 0.02m e 0.04m

Come si può notare, neanche utilizzando una correzione tramite inerzia si riesce a far avvicinare le due curve, né come valori, ma neanche come andamento. Nella F_lc, infatti, rimane un'oscillazione molto evidente che rende la forza di contatto poco visibile. Probabilmente questo è dovuto a un modello non abbastanza preciso, in particolare potrebbe esserci una grande influenza data dalla geometria.

3.1.2 Impatto singolo: proiettile con naso semisferico

Si prova a realizzare lo stesso modello precedente, ma con qualche modifica per renderlo più realistico e meno approssimato. Prima di tutto, la forma è quella riportata nel capitolo del dimensionamento, ovvero un proiettile cilindrico con naso semisferico con le seguenti dimensioni:

$$R = 1.5\ cm = 0.015\ m$$

$$L = 8\ cm = 0.08\ m$$

$$L_c = 6.5\ cm = 0.065\ m$$

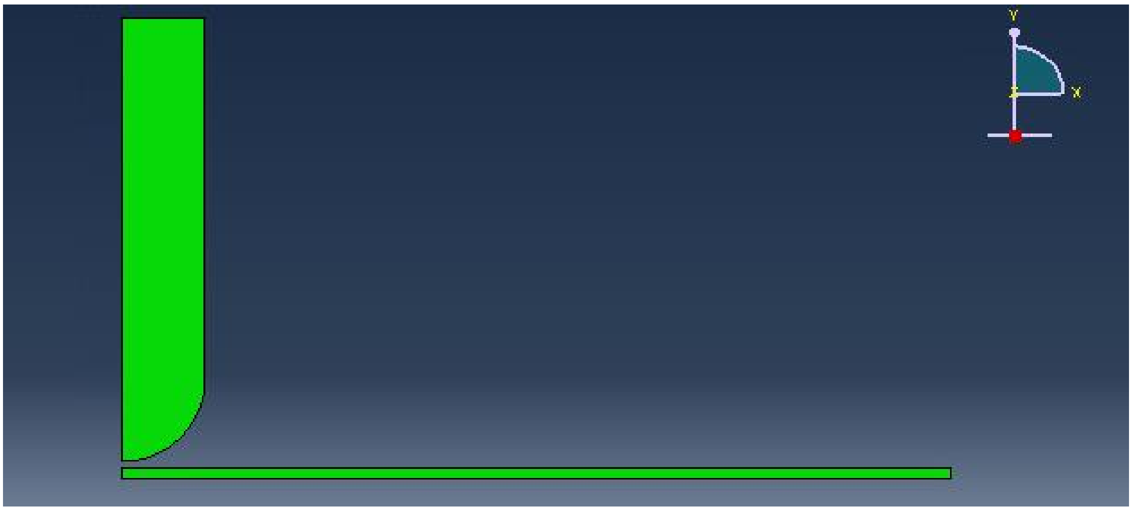


Figura 3.13 Modello bidimensionale impatto singolo con proiettile con naso semisferico

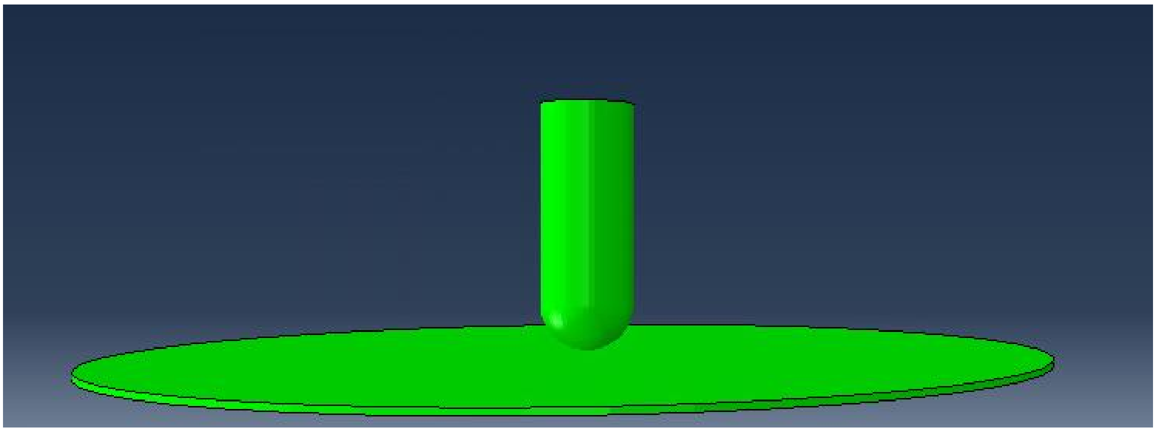


Figura 3.14 Modello tridimensionale impatto singolo con proiettile con naso semisferico

Al target non viene assegnato il materiale acciaio, ma l'AISI 316 seguendo il modello di tipo elastico plastico presentato nel capitolo del dimensionamento.

Nell'interazione tra i due corpi viene inserito anche un coefficiente di attrito dinamico pari a 0.57, oltre all'Hard Contact in direzione normale.

Per quanto riguarda la mesh, viene utilizzata la stessa tipologia di elemento del caso precedente, ma per quanto concerne la grandezza dell'elemento stesso viene realizzata un'analisi di convergenza: ci si vuole assicurare, infatti, di non realizzare una mesh eccessivamente grossolana oppure eccessivamente fine. Nei grafici vengono riportati rispettivamente l'andamento dello spostamento del nodo posizionato sulla punta del naso (sull'asse di simmetria), l'andamento dell'energia cinetica del proiettile e della forza di contatto CFN2 in caso di mesh di dimensione:

- 0.001: tempo di analisi 64 s;
- 0.0007: tempo di analisi 152 s;
- 0.0005: tempo di analisi 425 s;
- 0.00025: tempo di analisi 2640 s.

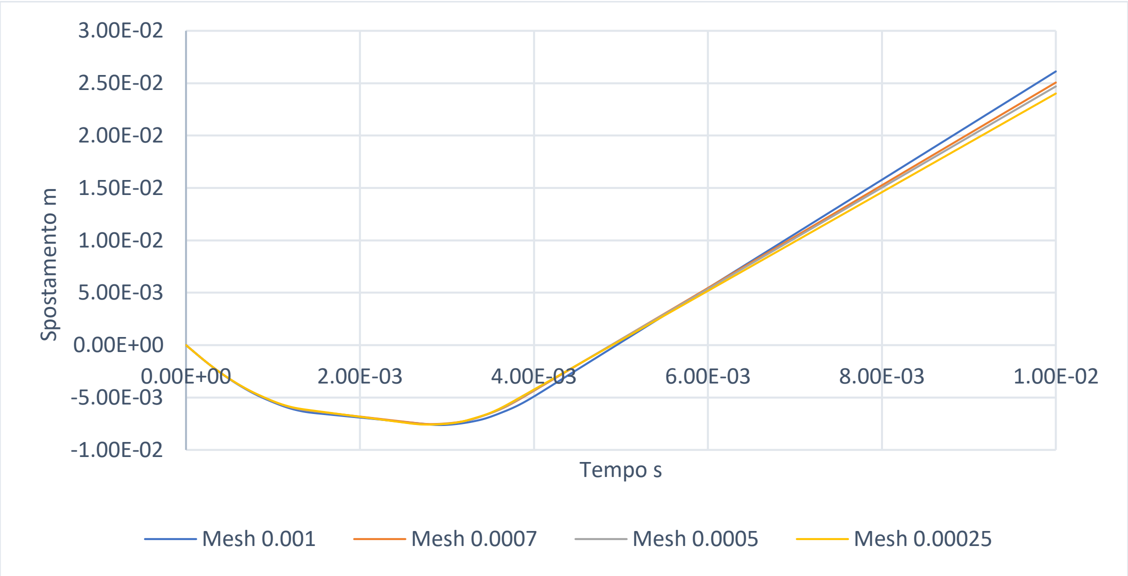


Figura 3.15 Spostamento del nodo posizionato sulla punta del naso del proiettile utilizzando diverse dimensioni degli elementi

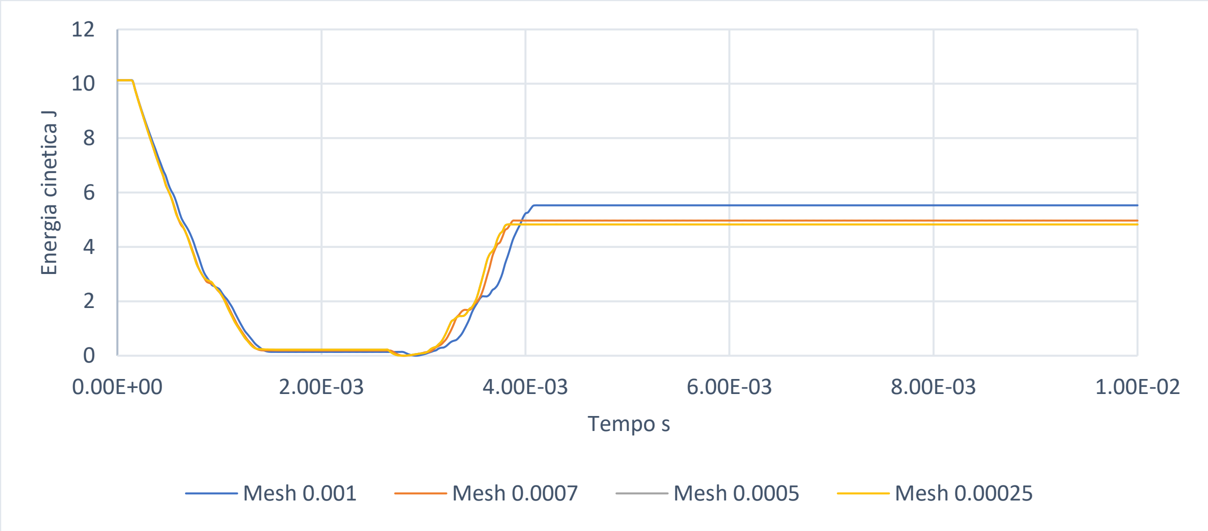


Figura 3.16 Energia cinetica del proiettile utilizzando diverse dimensioni degli elementi

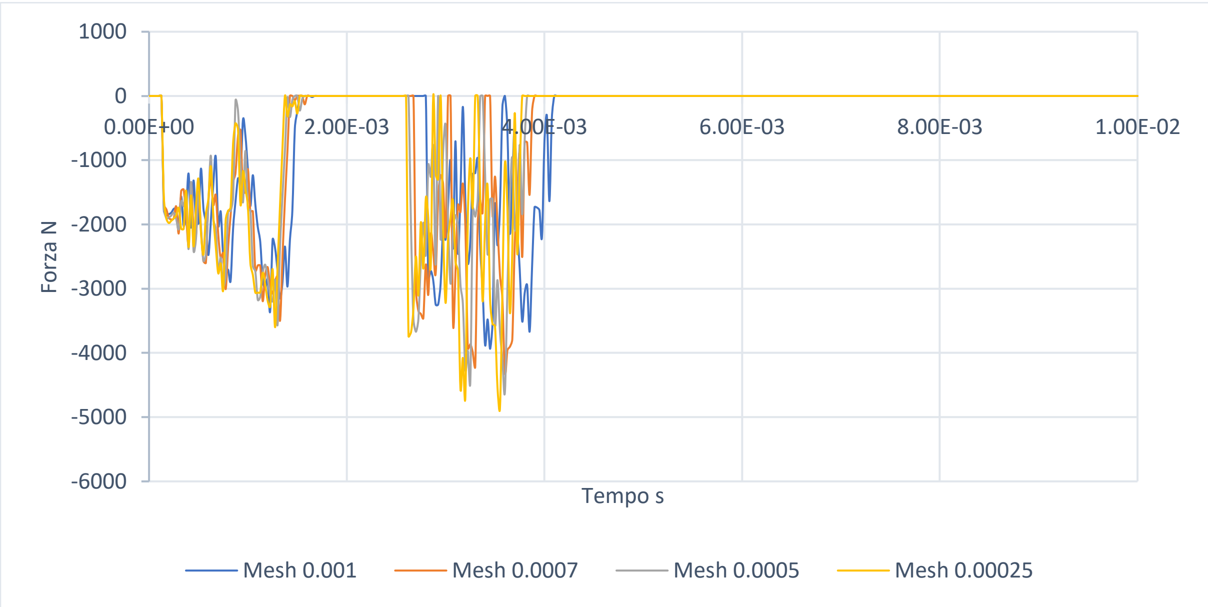


Figura 3.17 Forza di impatto CFN2 utilizzando diverse dimensioni degli elementi

Si può notare come, a parte la mesh di dimensione 0.001, tutte le altre conducano a soluzioni molto simili tra loro; tuttavia, quando si arriva ad una dimensione di 0.00025 i tempi di analisi diventano troppo elevati, considerato che la differenza nei risultati è minima. Quindi si può affermare che la dimensione di 0.0005 utilizzata nell'analisi precedente sia quella ottimale in quanto permette di ottenere una soluzione abbastanza precisa in un tempo di calcolo molto breve. Verrà quindi usata anche in questa analisi, la quale viene realizzata tramite 312722 incrementi con un tempo di incremento stabile di circa 3.2e-8, con l'energia totale che rimane costante e pari a 10.1306 J.

Così come è stato fatto nel caso precedente, si realizza prima di tutto un confronto tra la CNF2 e la F_lc lungo la superficie di impatto, ovvero ad una distanza di 0m dal naso del proiettile. Si ricordi che in questo caso la superficie del proiettile che interagisce con il target non è piana: per questo motivo si prendono solo i valori dei 6 elementi più vicini al naso. In primo luogo, infatti, questi sono gli unici elementi che impattano effettivamente con il target; in secondo luogo, come si può notare dalla figura 3.18, si può approssimativamente dire che discretizzino una superficie quasi piana.

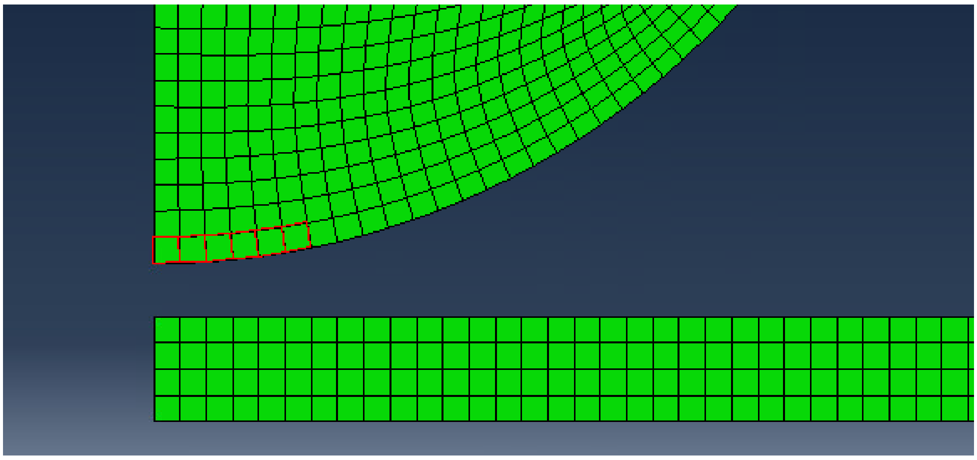


Figura 3.18 Elementi considerati per il confronto delle forze nella sezione 0m

Si ottiene quindi la seguente curva:

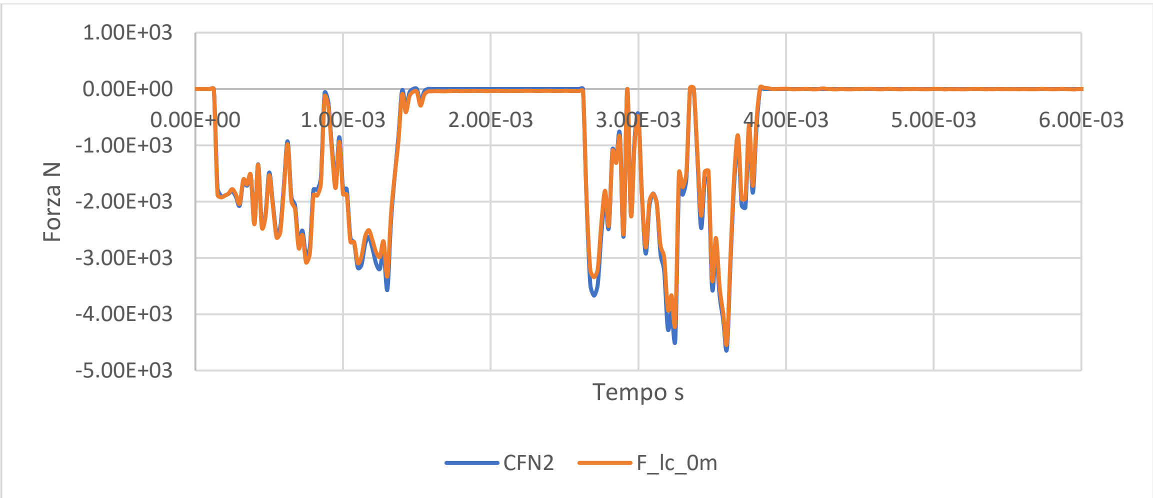


Figura 3.19 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0m

Nonostante il calcolo sia abbastanza approssimato a causa della geometria della superficie di impatto, le due curve risultano quasi completamente sovrapposte, soprattutto prima del rimbalzo.

Ci si chiede se si possa ottenere lo stesso ottimo risultato allontanandosi dalla zona di impatto e, precisamente, ad una distanza di 0.01m, 0.015m e 0.025m. Si osservino le curve ottenute:

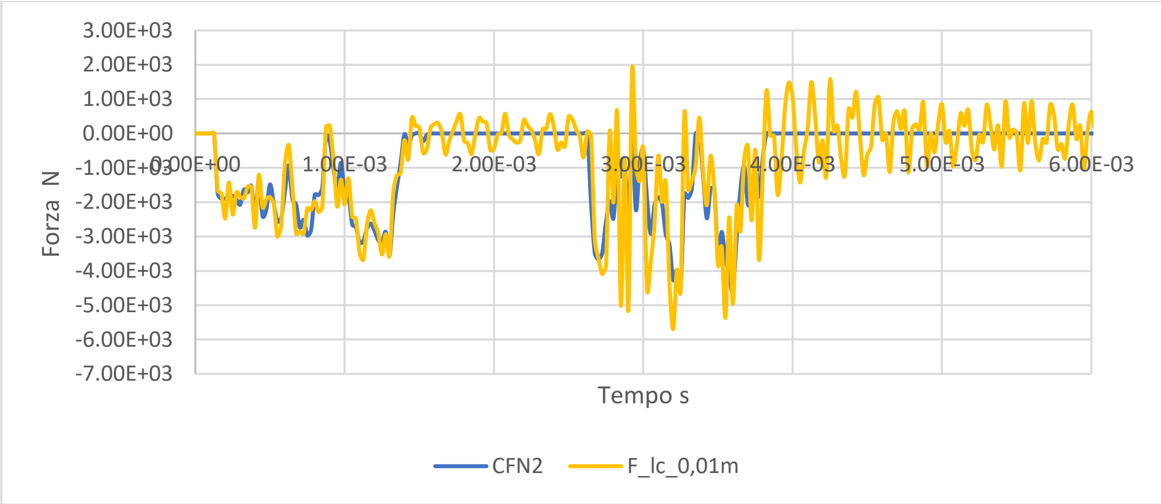


Figura 3.20 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.01m

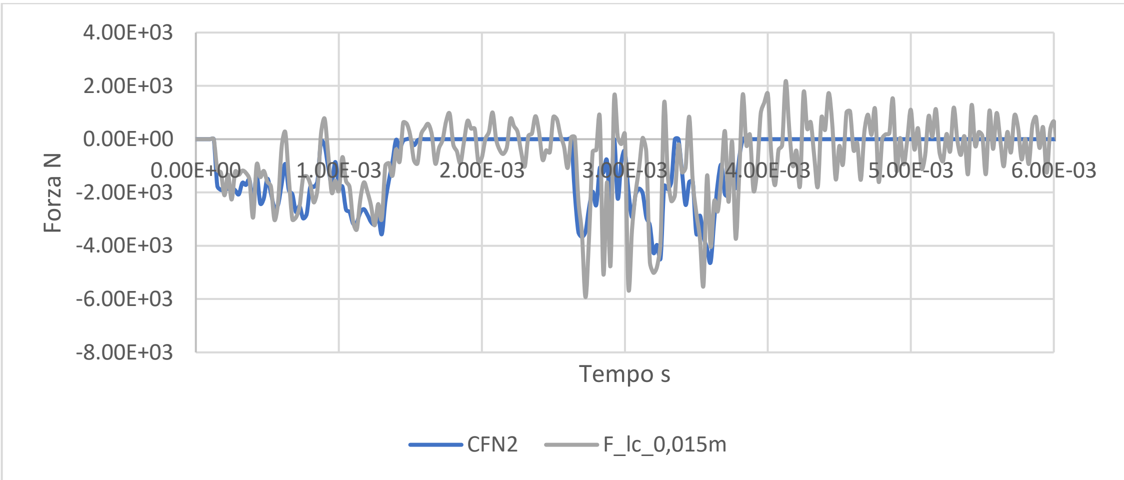


Figura 3.21 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.015m

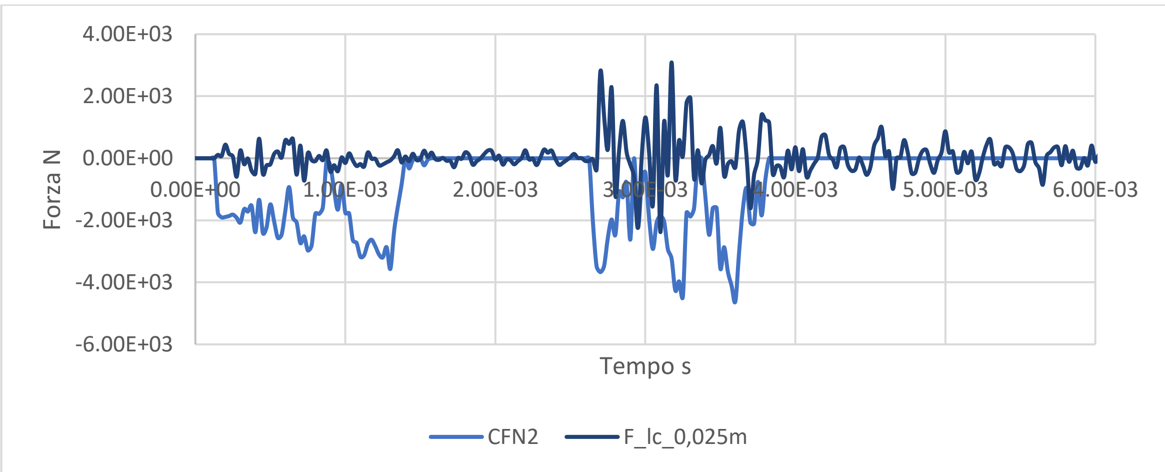


Figura 3.22 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.025m

Come si può notare, più ci si allontana dalla zona di impatto e più si perde l'informazione riguardante la forza di tale impatto. Ad una distanza di 0.025m, infatti, risulta quasi impossibile riconoscere i valori della CFN2. Negli altri due casi, invece, l'andamento, soprattutto prima del rimbalzo, viene abbastanza seguito.

È anche importante sottolineare come la cella di carico, qualunque sia la sua posizione sul proiettile, non sia mai soggetta a forze talmente elevate da portarla a rottura o da superare il suo range di misura.

Si prova a questo punto, sempre tramite l'utilizzo della forza di inerzia, ad avvicinare ancora di più le curve per ottenere un risultato più attendibile.

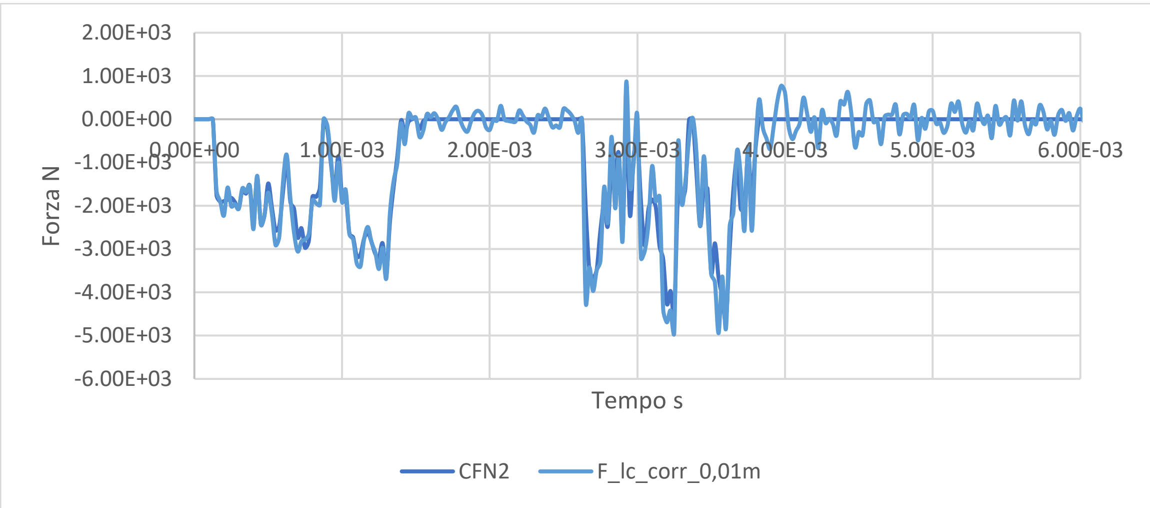


Figura 3.23 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.01m

Nel caso della sezione a 0.01 m la situazione risulta quasi perfetta, soprattutto prima del rimbalzo, a parte delle piccole oscillazioni.

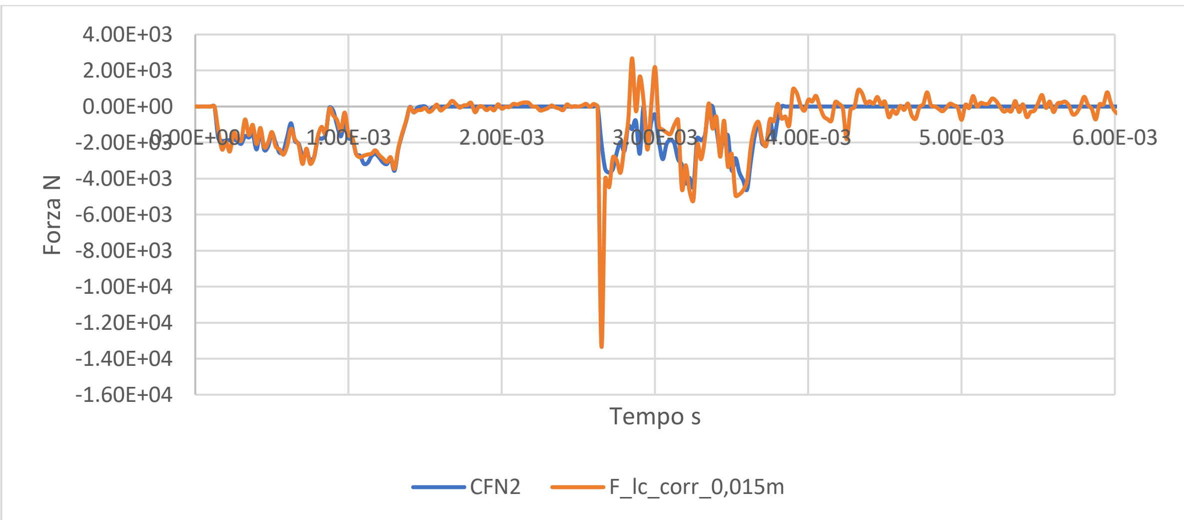


Figura 3.24 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.015m

Anche nel caso della sezione a 0,015 m la situazione viene decisamente migliorata dall'introduzione della forza di inerzia: soprattutto nell'impatto prima del rimbalzo le curve risultano quasi totalmente sovrapposte. È presente però, nel secondo rimbalzo, un picco verso il basso molto evidente che non dovrebbe esserci.

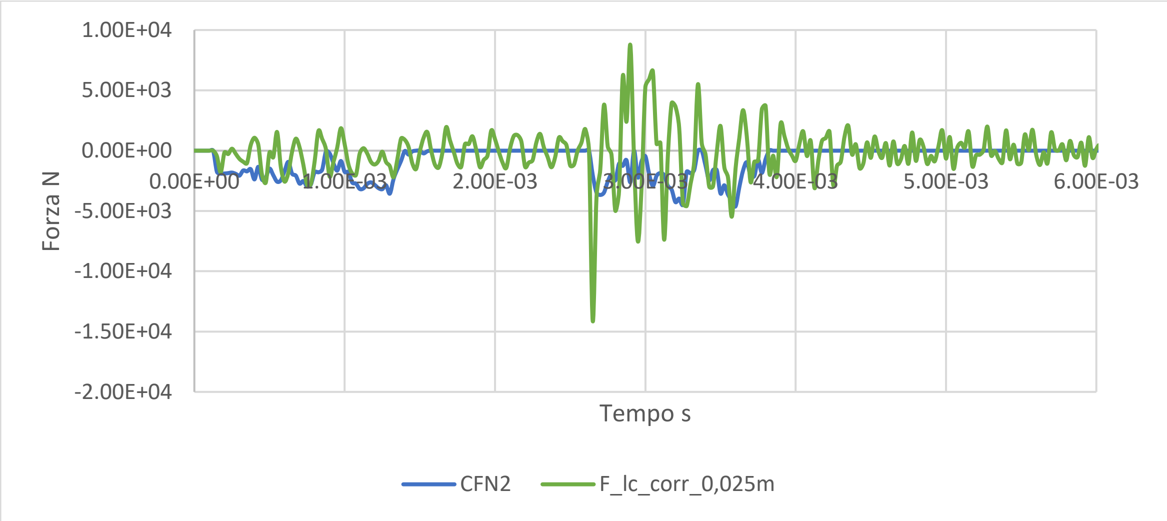


Figura 3.25 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.025m

Nel caso della sezione a 0.025m, invece, come era intuibile, la lontananza dalla zona di contatto è tale che, anche tramite l'aggiunta della forza di inerzia, non sia possibile riuscire ad ottenere due curve che abbiano almeno lo stesso andamento, anzi la situazione sembra allontanarsi ancora di più da quella della CFN2. È lo stesso effetto che si generava nel caso dell'impatto tra target e proiettile cilindrico.

3.1.3 Impatto singolo: proiettile allungato con naso semisferico

Ci si chiede cosa succederebbe realizzando un proiettile con la stessa massa e, di conseguenza, la stessa velocità associata alla stessa energia cinetica, ma con una diversa geometria. In particolare, si vuole diminuire il diametro del proiettile, ma aumentare la sua lunghezza per capire se si riesce ad aumentare la sezione disponibile per posizionare la cella di carico. Ricordando che:

$$m \approx 0.41\ kg$$

$$\rho = 7800\ kg/m^3$$

$$E_k \approx 10\ J$$

$$V \approx 7\,m/s$$

E imponendo che:

$$R = 0.01\,m$$

Si ottiene una lunghezza del corpo del proiettile pari a:

$$m = \rho \cdot Vol = \rho \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 + \pi \cdot R^2 \cdot h\right)$$

$$h = L_c = \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot R^2} - \frac{4}{6} \cdot R = 0.16065\,m => L_c \approx 0.16\,m$$

Ne consegue:

$$m \approx 0.408\,kg$$

$$L = 0.17\,m$$

Il target, così come tutti gli altri aspetti legati alla modellazione in Abaqus, rimangono esattamente invariati rispetto a quelli riportati nel caso precedente. Si può vedere il modello realizzato nelle figure 3.26 e 3.27:

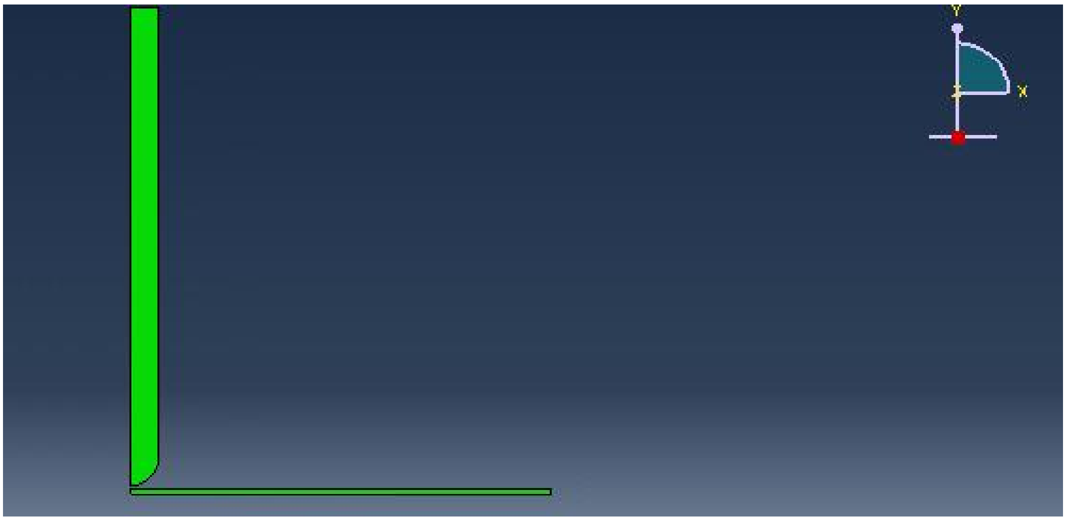


Figura 3.26 Modello bidimensionale impatto singolo con proiettile allungato con naso semisferico

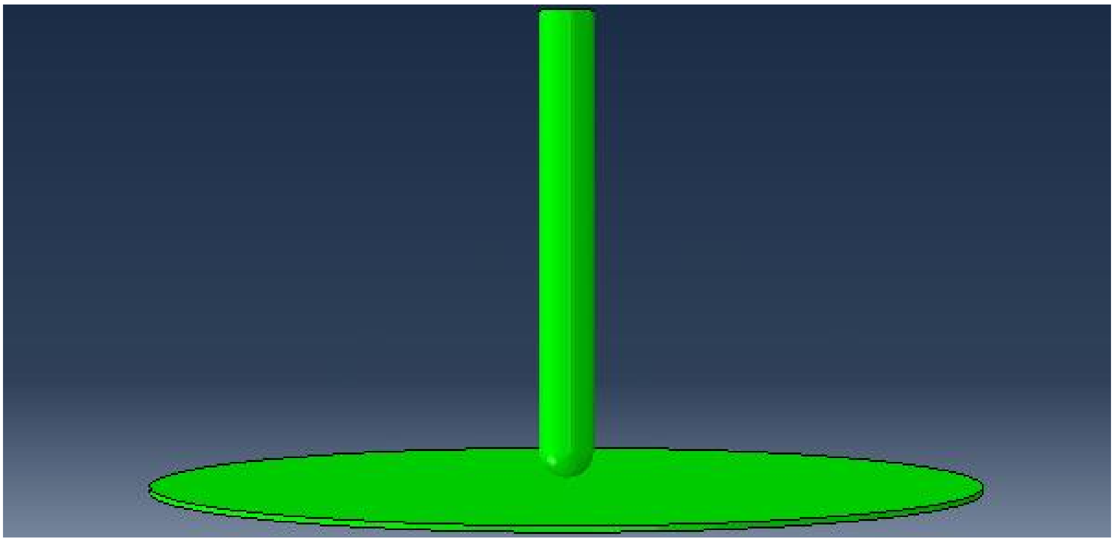


Figura 3.27 Modello tridimensionale impatto singolo con proiettile allungato con naso semisferico

Guardando il grafico, si può fare la prima importante considerazione: le curve della CFN2 per i due casi di impatto singolo con proiettile con naso semisferico (caso 1 proiettile corto e caso 2 proiettile lungo) sono quasi totalmente sovrapposte e presentano quasi gli stessi valori. Questo dipende dal fatto che i due modelli sono realizzati con una diversa geometria, ma con la stessa massa, energia cinetica e velocità del corpo impattante.

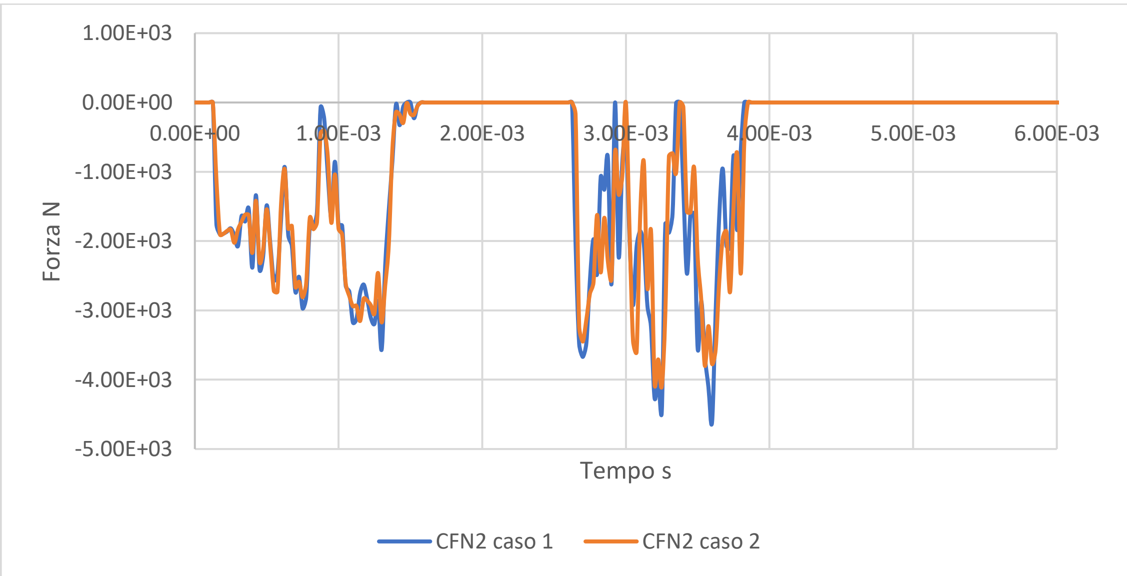


Figura 3.28 Confronto tra la forza di contatto CFN2 nel caso di Impatto singolo con proiettile corto (caso 1) e con proiettile lungo (caso 2)

Si ritorna al caso 2 descritto in questo paragrafo per riportare alcune considerazioni circa i grafici che si possono ottenere, seguendo sempre lo stesso metodo dei modelli precedenti. Viene riportata una figura che rappresenta la sezione considerata e il corrispondente grafico della forza calcolata a partire dallo stress in quella stessa sezione, confrontata volta per volta sempre con il valore della CFN2.

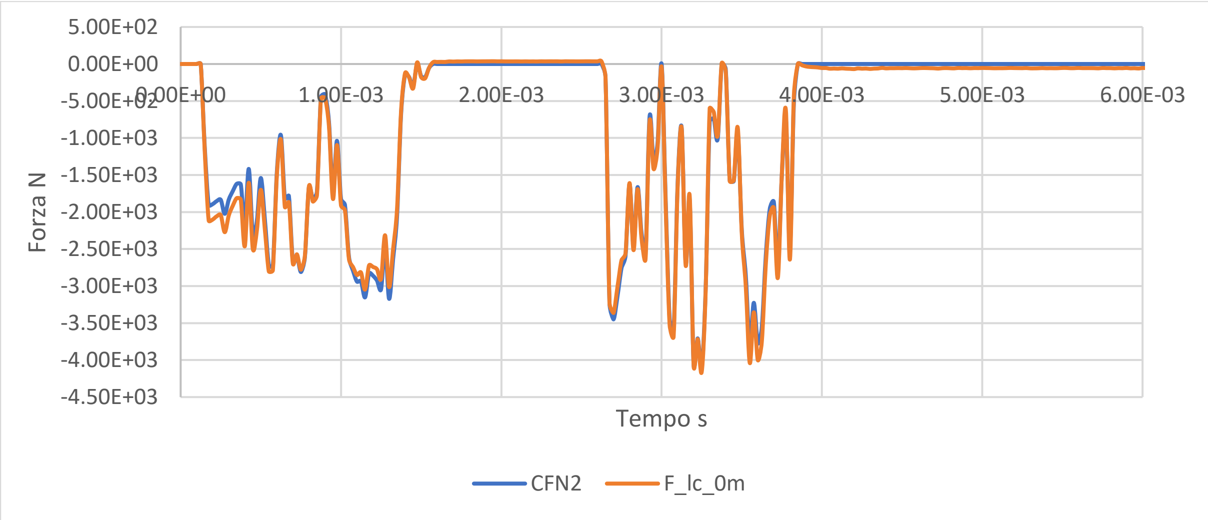


Figura 3.29 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0m

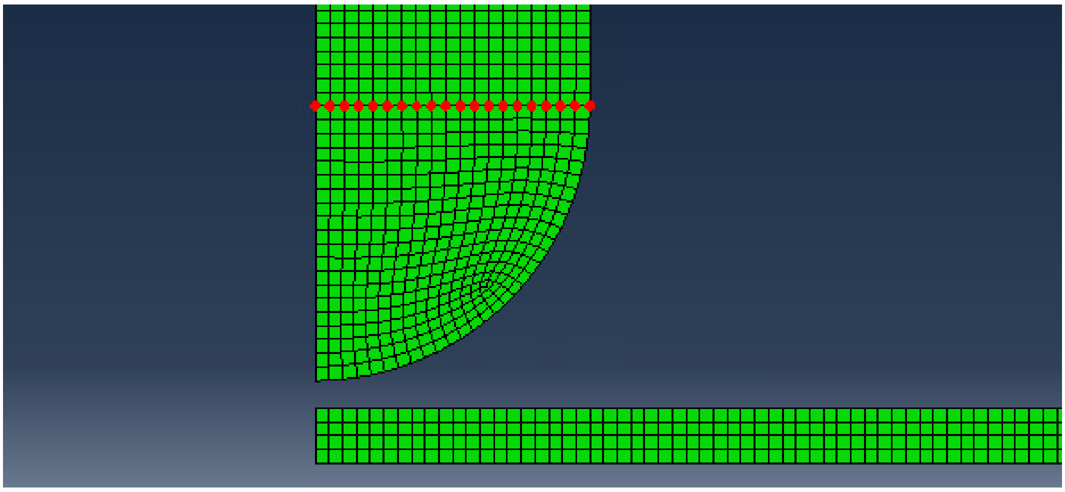


Figura 3.30 Sezione proiettile 0.01m

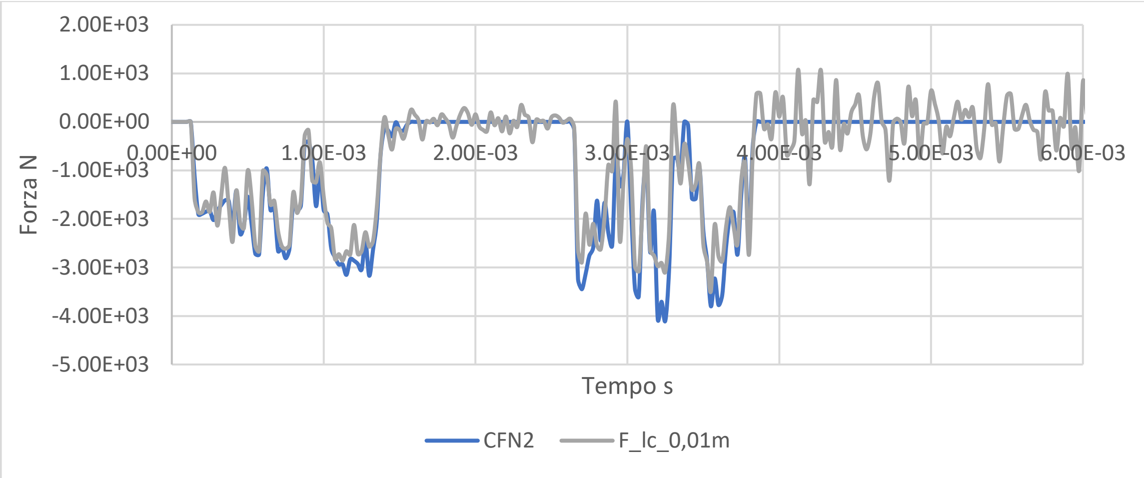


Figura 3.31 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.01m

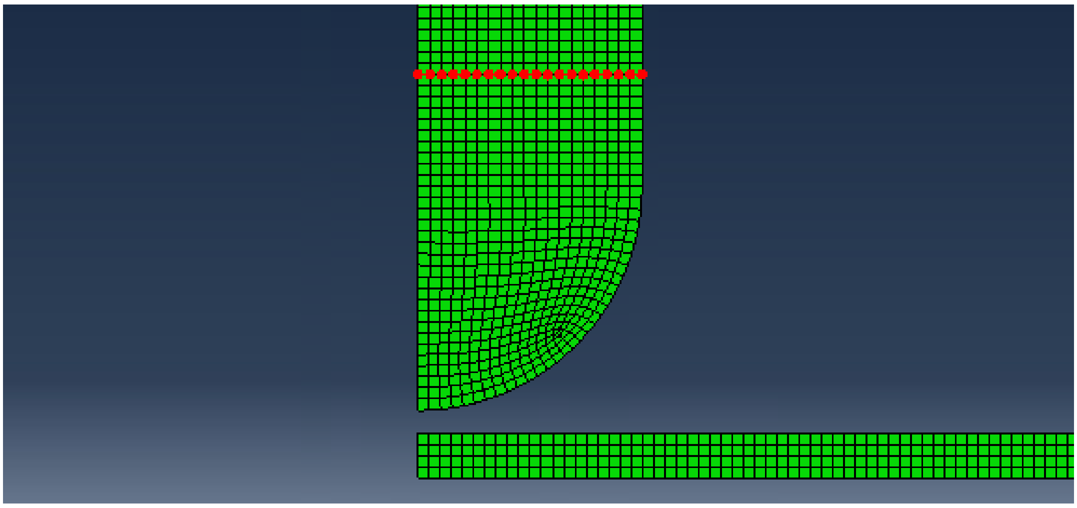


Figura 3.32 Sezione proiettile 0.015m

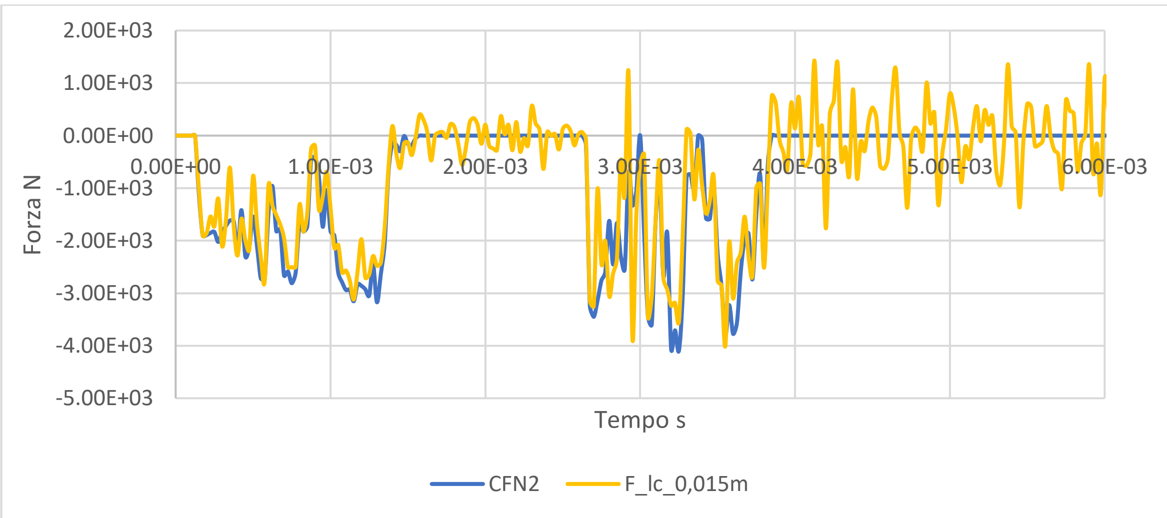


Figura 3.33 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.015m

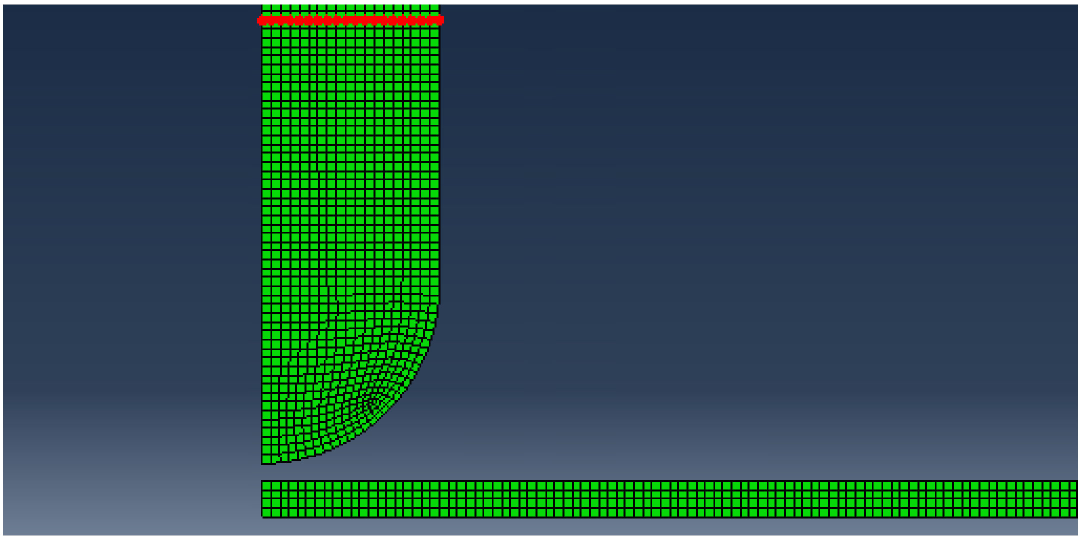


Figura 3.34 Sezione proiettile 0.025m

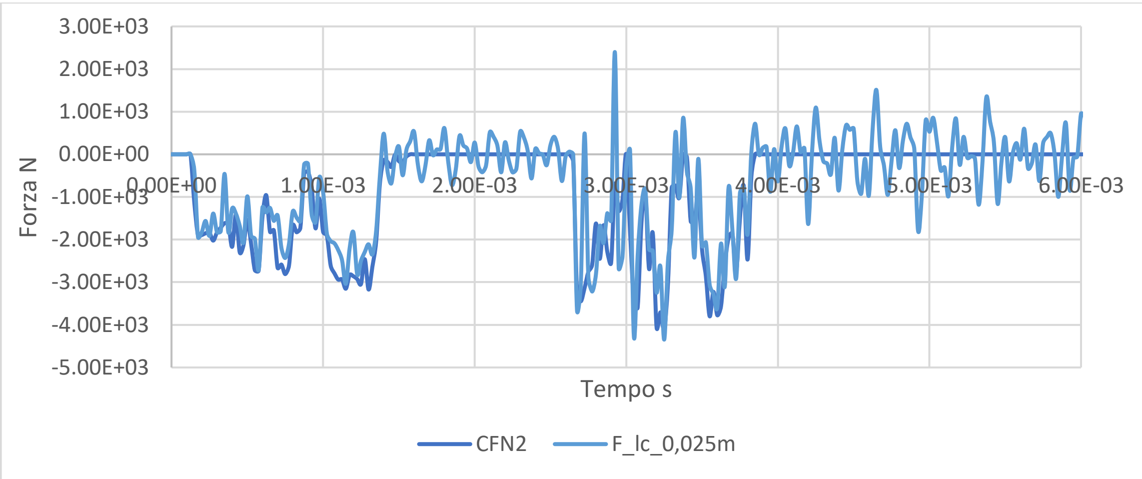


Figura 3.35 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.025m

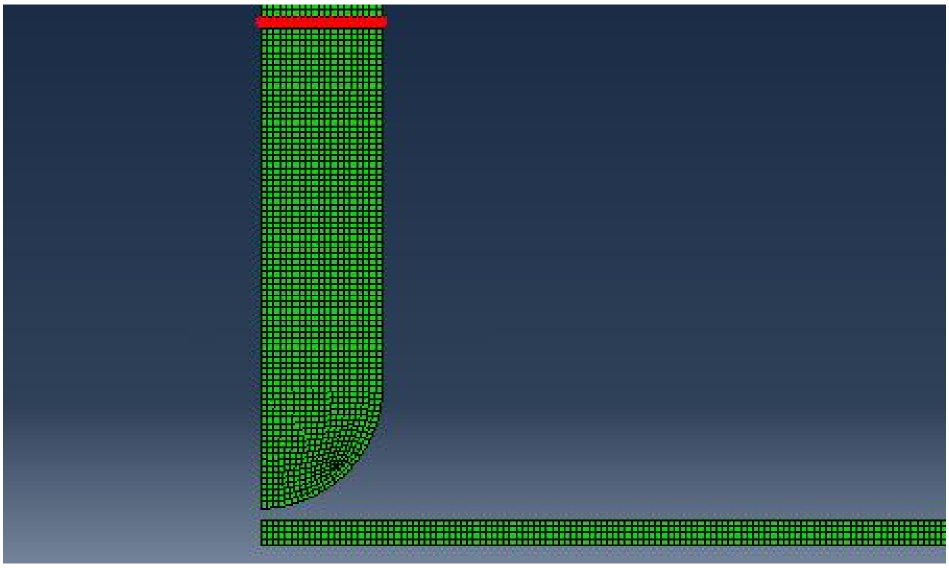


Figura 3.36 Sezione proiettile 0.04m

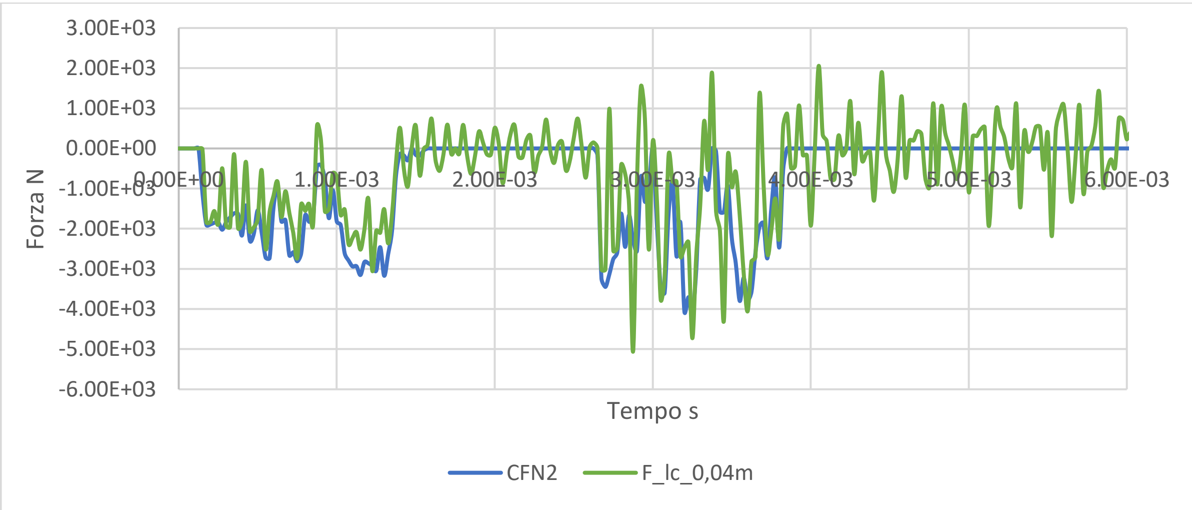


Figura 3.37 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.04m

Come si può notare abbastanza facilmente confrontando tutti i grafici, allontanandosi dal punto di impatto le F_lc della sezione tendono a seguire sempre con minor precisione la curva CFN2. Questo comportamento era stato già osservato in precedenza, ma adesso anche ad una distanza di 0.04m non viene persa l'informazione riguardante l'andamento della forza di impatto.

Come si può notare, anche in questo caso le forze generate sono troppo basse per creare problemi riguardo la resistenza e le prestazioni della cella di carico.

Viene di seguito mostrato l'andamento che si ottiene introducendo la correzione tramite forza di inerzia:

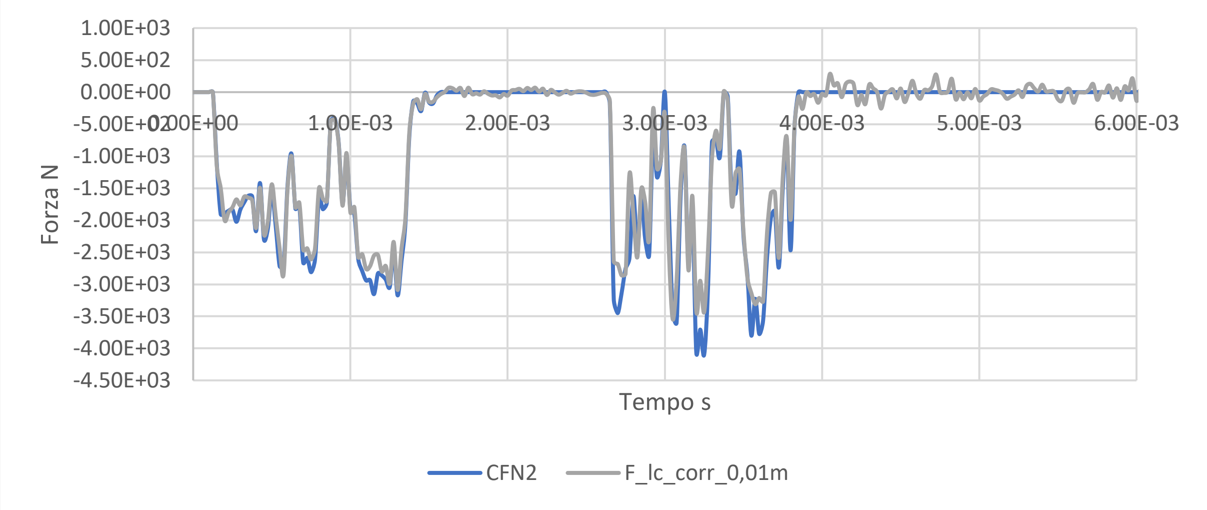


Figura 3.38 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.01m

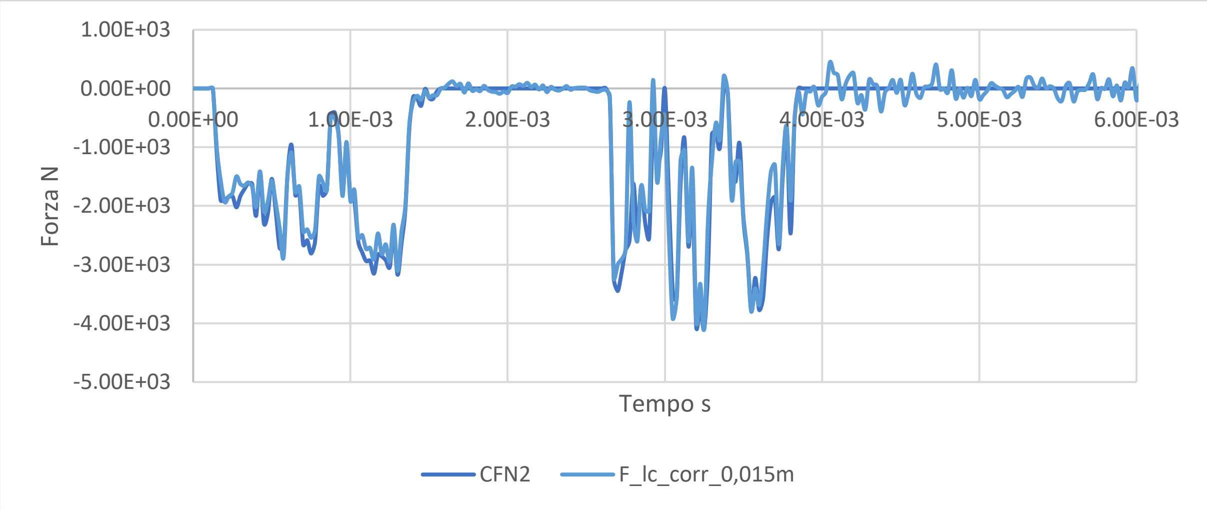


Figura 3.39 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.015m

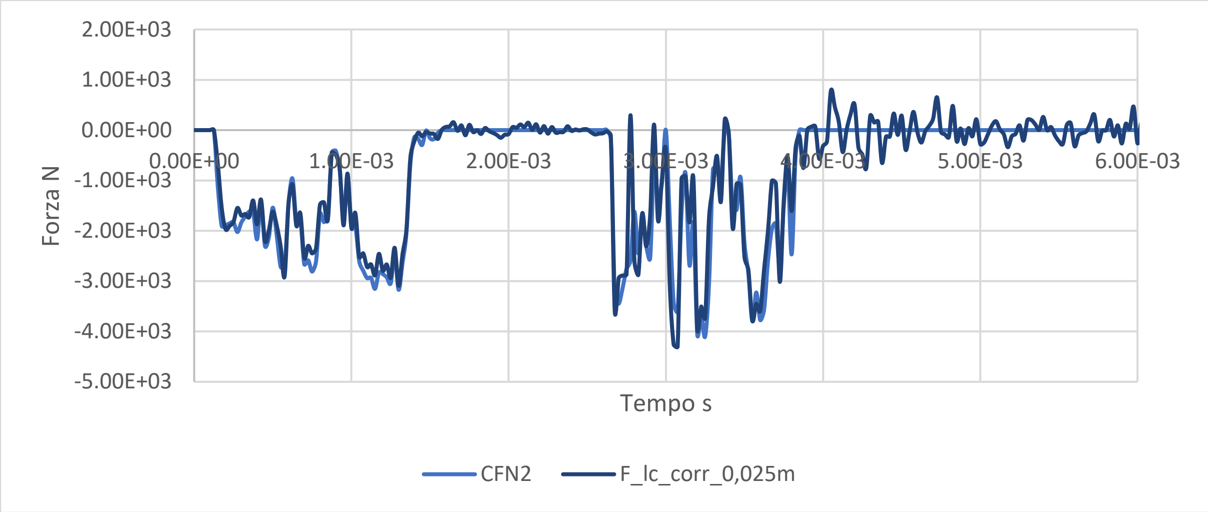


Figura 3.40 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.025m

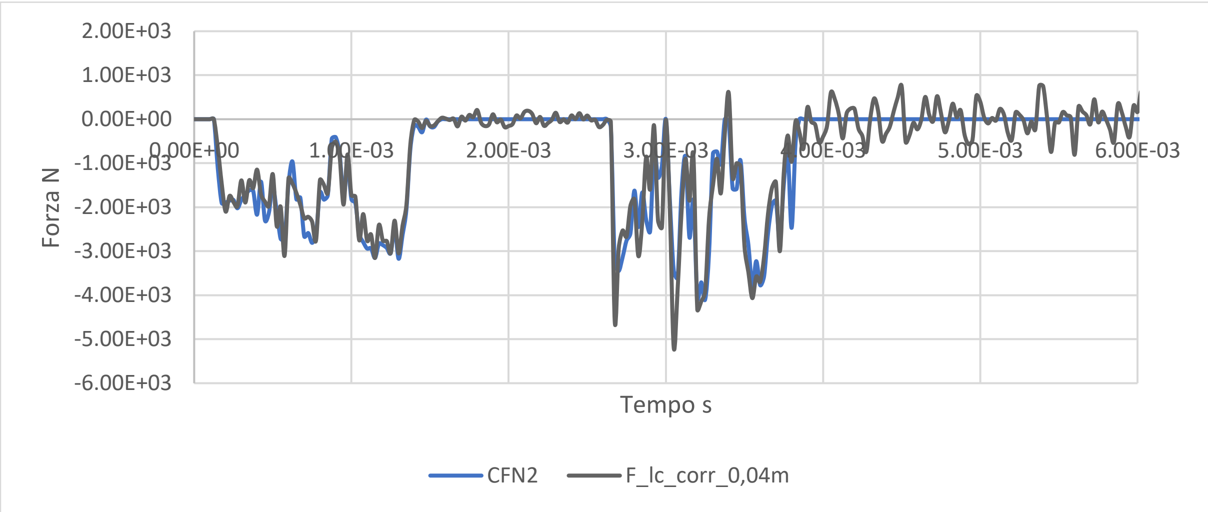


Figura 3.41 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.04m

In tutti i casi riportati, la correzione tramite forza di inerzia permette di ottenere delle curve quasi totalmente sovrapposte, se si tralascia qualche oscillazione. In particolare, sembra che la curva migliore si ottenga ad una distanza di 0.015m. Questa ultima considerazione è puramente teorica e derivante dall'osservazione dei grafici ottenuti nella simulazione, ma nel momento in cui si passerà alla fase sperimentale entreranno in gioco altri aspetti da considerare che potrebbero modificare tale affermazione.

3.1.4 Impatto doppio con energia iniziale 10J

Ci si domanda se sia possibile una misura accurata tramite cella di carico della forza di impatto tra proiettile e target anche nel caso di un sistema come quello riportato nelle figure 3.42 e 3.43.

Figura 3.42 Modello bidimensionale impatto doppio

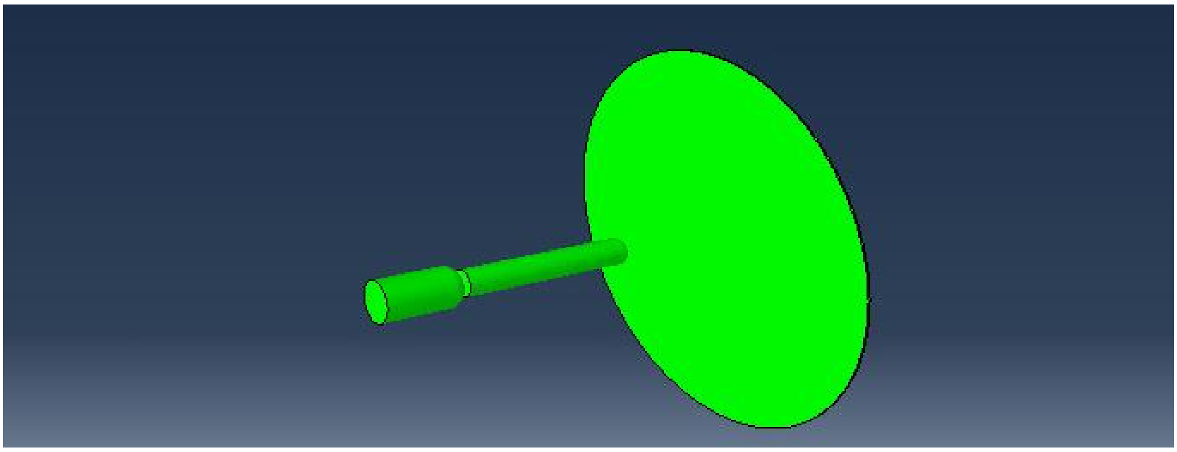


Figura 3.43 Modello tridimensionale impatto doppio

L'idea è quella di posizionare la cella di carico sul proiettile più lungo, inizialmente fermo e inserito all'interno di una guida cilindrica. Il proiettile più corto, invece, che è quello che fuoriesce dal cannone ad aria compressa, è privo di qualsiasi sistema di misura. L'impatto tra i due proiettili, i quali hanno la stessa massa, dovrebbe permettere il trasferimento di energia e quindi di velocità dall'uno all'altro. La forza di impatto misurata, alla fine, dovrebbe risultare la stessa del caso del singolo impatto. Questo sistema consentirebbe di evitare tutti i problemi che si genererebbero a causa della cablatura se si dovesse posizionare la cella di carico sul proiettile inserito nel cannone.

I due proiettili sono gli stessi presentati nei due paragrafi precedenti e non è stata fatta nessun'altra modifica al modello, tranne l'inserimento di una certa distanza tra proiettile strumentato e target per permettere al proiettile di accelerare prima dell'impatto.

L'analisi ha una durata di 0.03s (1 ora nella realtà) e viene realizzata tramite 937508 incrementi; il tempo di incremento stabile calcolato automaticamente da Abaqus risulta di circa 3.2e-8, e l'energia totale del sistema rimane sempre costante e pari a circa 10.1307 J. Anche se l'energia totale rimane la stessa, è facile verificare che parte dell'energia cinetica iniziale viene persa a causa delle deformazioni: se infatti si sommano le energie di deformazione dei due proiettili alle energie cinetiche, si nota che il totale rimane invariato.

Tutte le curve saranno riportate nel solo intervallo temporale del secondo impatto, compreso tra 0.02 s e 0.03s, in quanto il primo impatto non è oggetto di studio. L'unico aspetto importante riguardante anche il primo impatto è la sicurezza di non incorrere in una rottura della cella di carico, cosa che verrà constatata non appena si sceglierà la sua posizione effettiva.

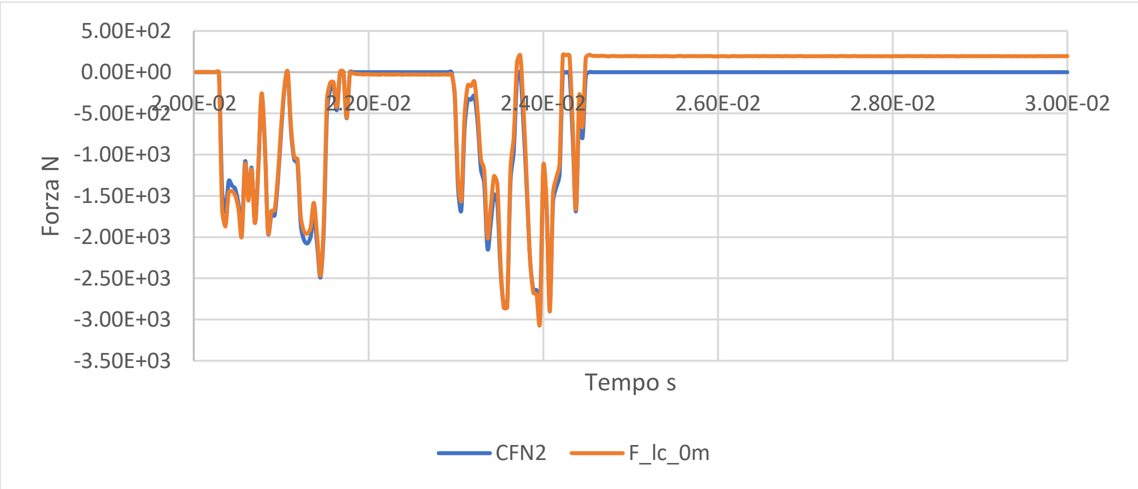


Figura 3.44 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0m

La prima osservazione che si può fare, oltre al fatto che le due curve CFN2 e F_lc nel punto di impatto (0 m) si sovrappongono, è che la forza di contatto risulta inferiore rispetto all'impatto singolo. La spiegazione è molto semplice: durante l'urto tra i due proiettili non solo c'è una perdita di energia cinetica, ma non tutta l'energia cinetica che rimane viene trasferita al proiettile strumentato, come è visibile nel grafico in figura 3.45. Il proiettile strumentato (pro1), infatti, impatta con un'energia dimezzata, ovvero 5J invece che 10J, e una velocità molto minore, ovvero 5 m/s invece che 7 m/s. Nelle pagine successive si cercherà di risolvere questo problema.

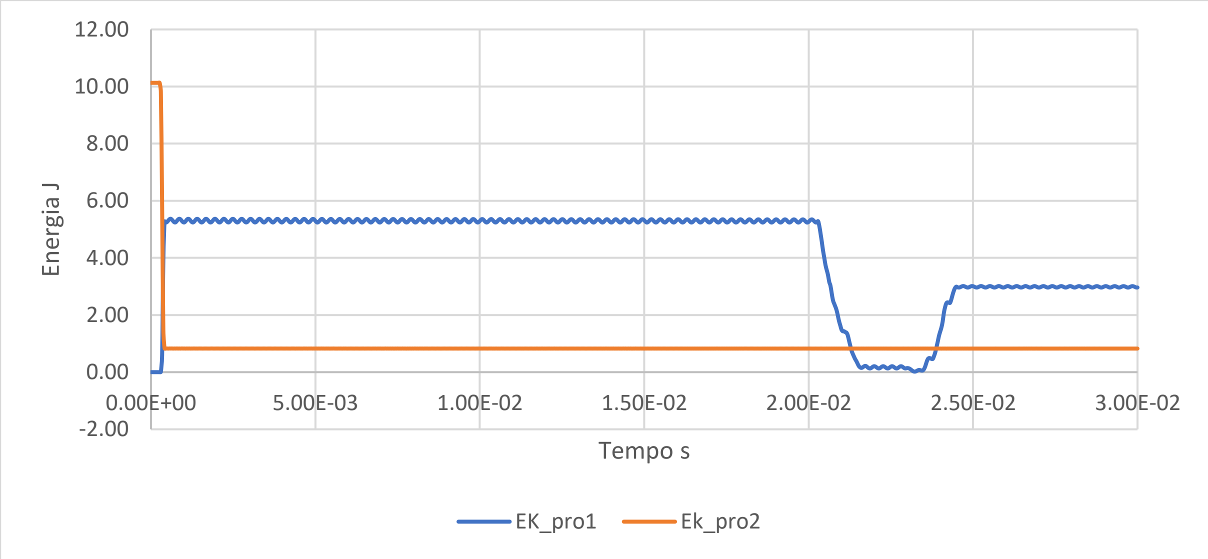


Figura 3.45 Andamento dell'energia cinetica nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

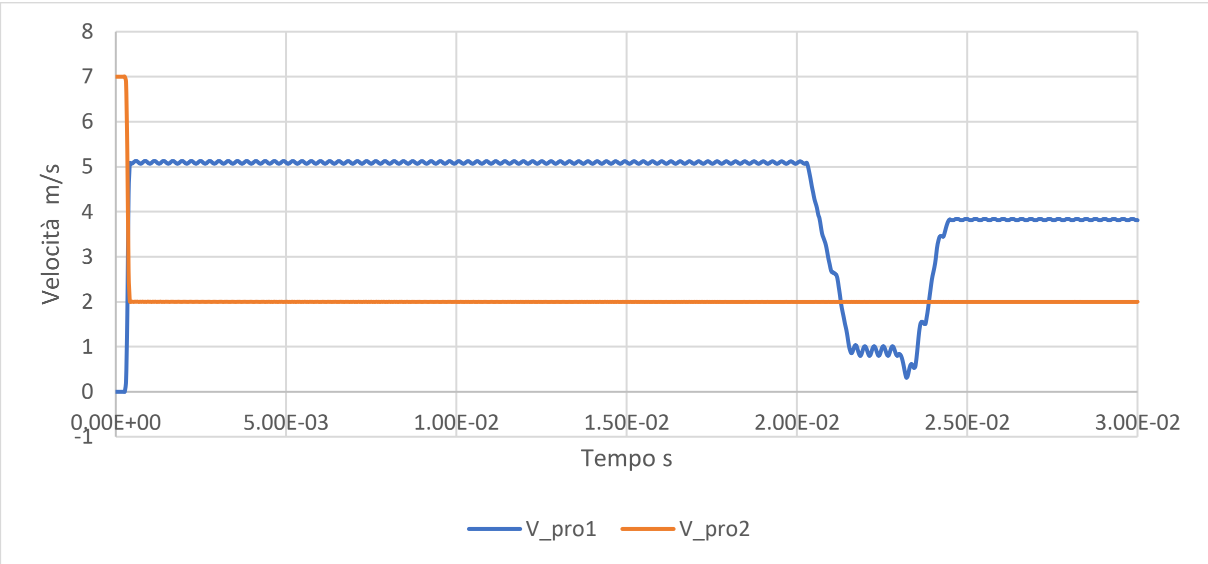


Figura 3.46 Andamento della velocità nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

Prima di procedere con una nuova analisi, però, si riportano le curve della forza derivata dallo stress in varie sezioni per capire se si riuscirebbe a misurare la forza di impatto tramite una cella di carico o se la presenza del primo impatto renda impossibile tale compito. Non si riporta l'immagine delle sezioni, essendo queste le stesse del paragrafo precedente.

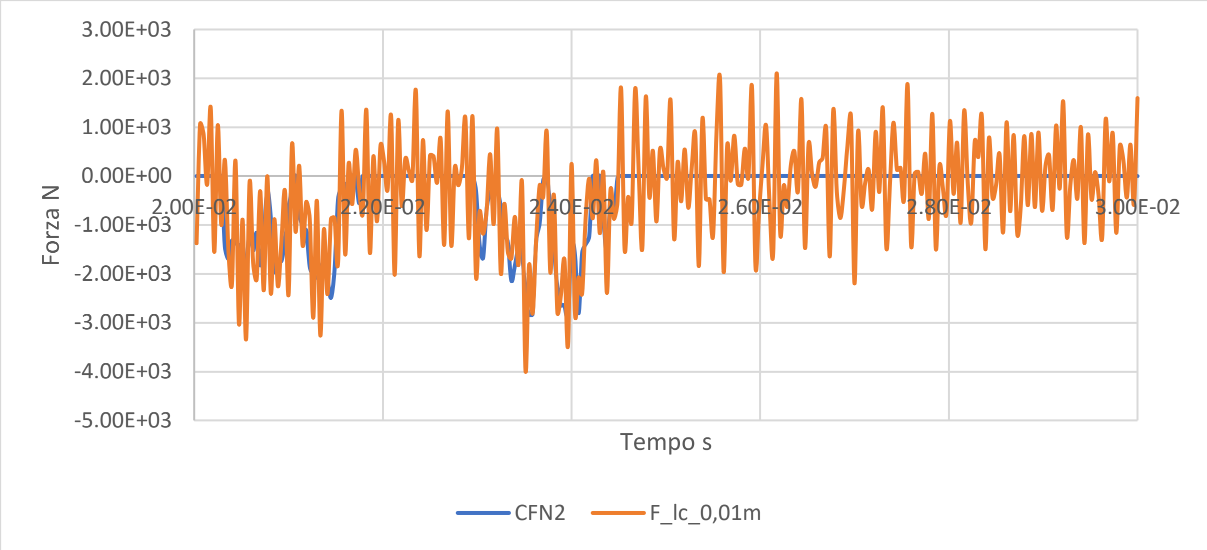


Figura 3.47 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.01m

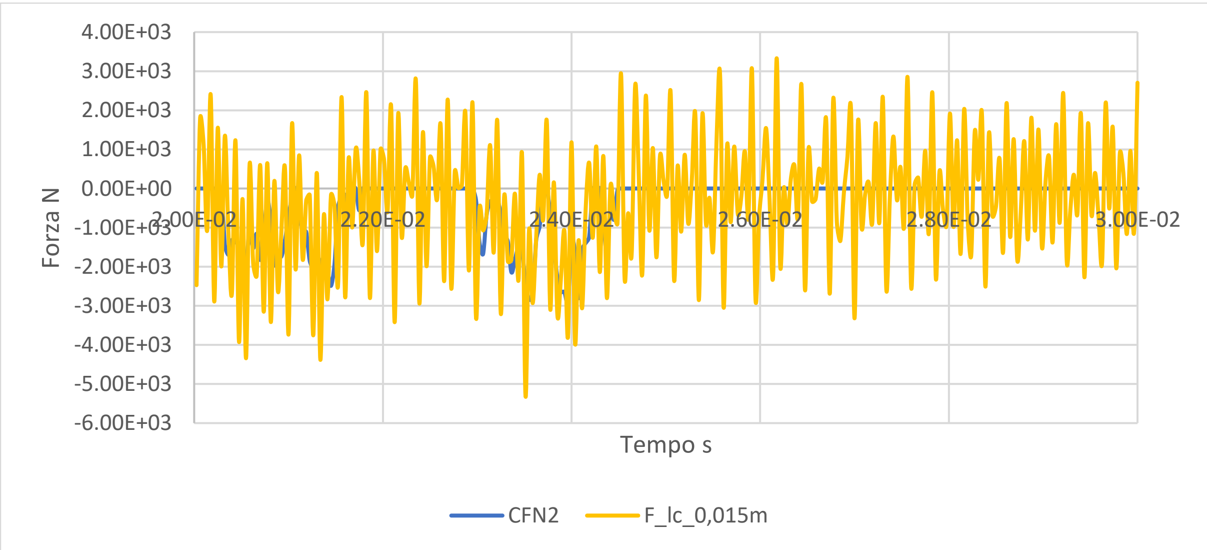


Figura 3.48 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.015m

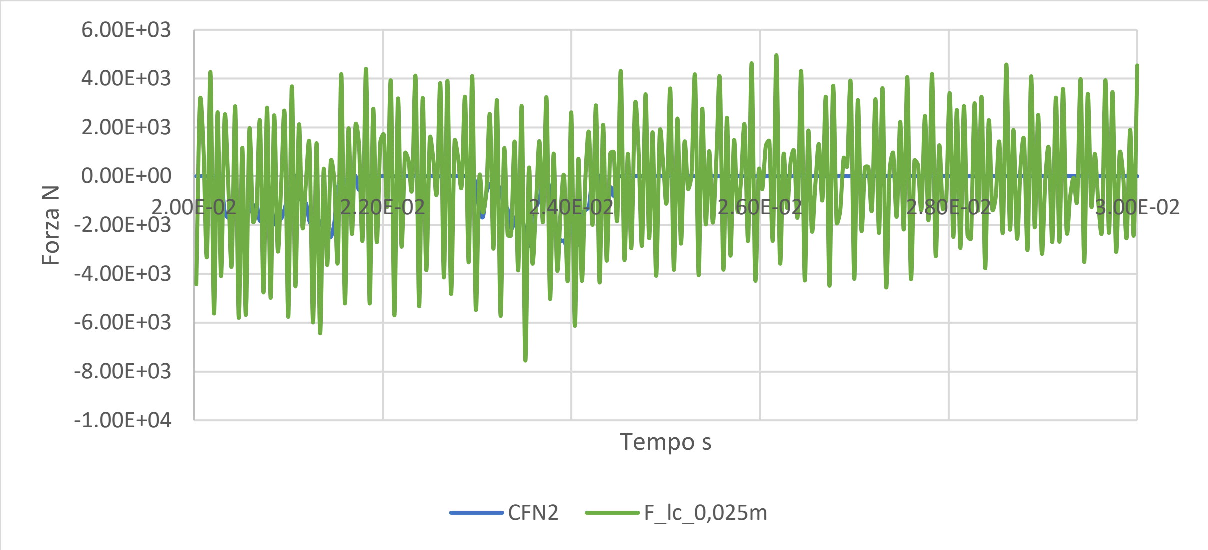


Figura 3.49 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.025m

Sembra che solamente ad una distanza di 0,01m si riesca ad ottenere un andamento della F_lc che segua in maniera accettabile quello della CFN2; negli altri due casi, invece, le oscillazioni paiono essere troppo importanti.

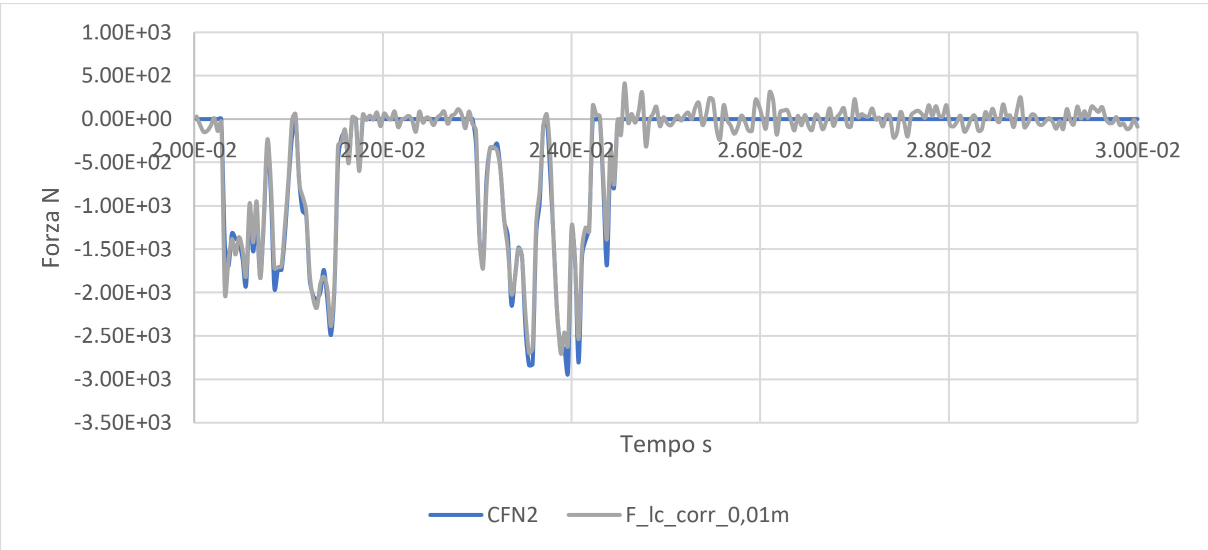


Figura 3.50 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.01m

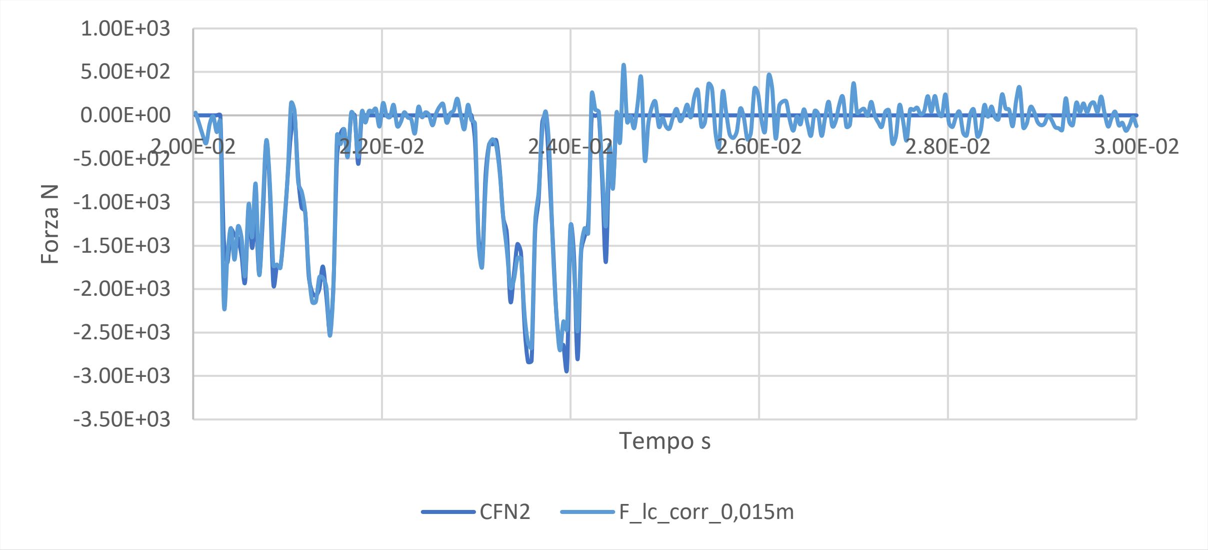


Figura 3.51 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.015m

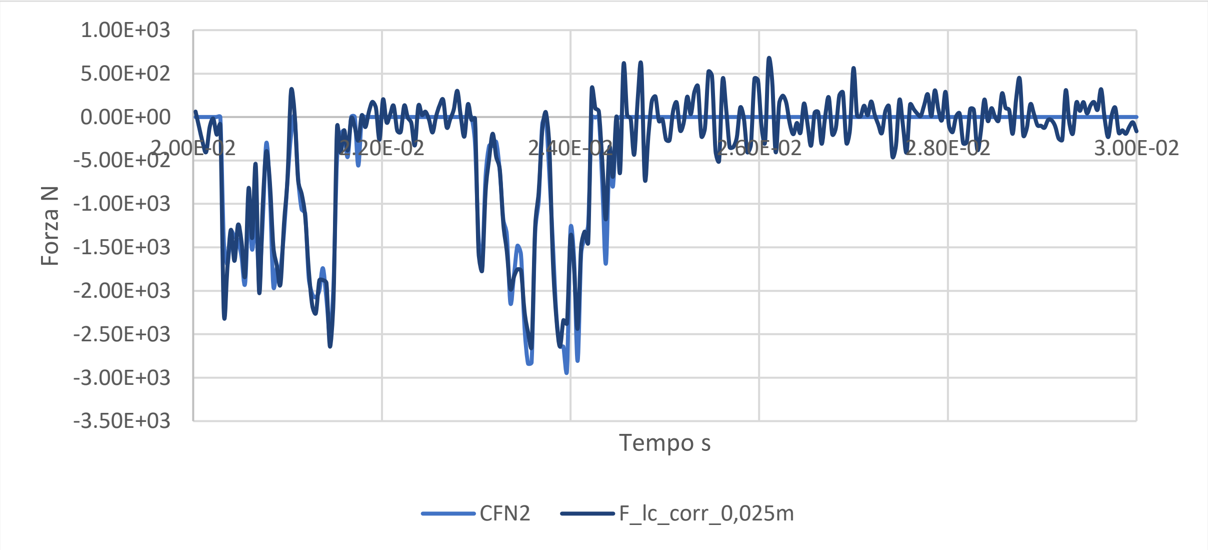


Figura 3.52 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.025m

La correzione della F_lc tramite la forza di inerzia permette di ottenere in tutti e tre i casi una quasi completa sovrapposizione delle curve, eccettuate piccole oscillazioni esterne all'impatto: ne consegue che è possibile la misura della forza tramite la cella di carico. Dovendo scegliere una posizione, conviene inserirla alla base del naso (tra 0,01m e 0,015m), poiché allontanandosi è necessaria una maggiore correzione e rimangono maggiori oscillazioni. Si ribadisce che questa è però un'affermazione prettamente basata sull'osservazione dei grafici.

Avendo a questo punto scelto una plausibile posizione per la cella di carico, si riporta l'andamento delle curve F_lc non corrette a 0,01 m e 0,015 m per l'intera durata dell'analisi (è visibile solo quella a 0,015m perché presenta valori maggiori dell'altra). Si può così dimostrare che, nonostante la forza generata dal primo impatto, anche in questo caso la cella di carico non rischia la rottura.

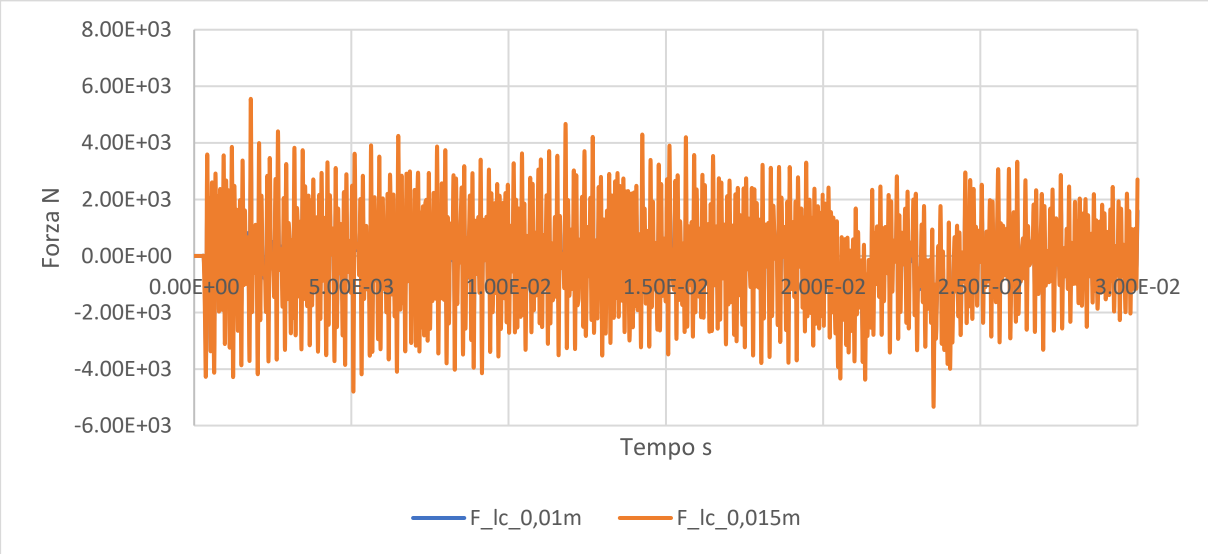


Figura 3.53 Andamento della F_lc non corretta nelle sezioni a 0.01m e 0.015 m durante entrambi gli impatti

È facile, infatti confrontare i massimi delle curve, ovvero circa $\pm 6000N$, con il valore di range massimo di misura riportato nella tabella 3.4, ovvero 88.96 kN, il quale si riferisce alla cella di carico che verrà utilizzata in ambito sperimentale, ovvero il modello M203B della PCB Piezotronics.

	ENGLISH:	SI:	
PERFORMANCE			
Sensitivity (±15 %)	0.25 mV/lb	56.2 mV/kN	
Measurement Range (Compression)	20000 lb	88.96 kN	
Maximum Static Force (Compression)	25000 lb	111.2 kN	
Broadband Resolution (1)	0.4 lb-rms	1.78 N-rms	[2]
Low Frequency Response (-5 %)	0.0003 Hz	0.0003 Hz	[3]
Upper Frequency Limit	60000 Hz	60000 Hz	[4]
Non-Linearity	≤1 % FS	≤1 % FS	[1]

Tabella 3.4 Valori riferiti alla cella di carico modello M203B della PCB Piezotronics

3.1.5 Impatto doppio con energia iniziale 20J

Ritornando al problema relativo all'energia cinetica, si ricorda che:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 => V = \sqrt{\frac{2 \cdot E_k}{m}}$$

Dato che durante il primo impatto c'è stato un dimezzamento dell'Ek iniziale, si dovrebbe poter risolvere il problema raddoppiandola, ovvero portandola a 20J invece che 10J, il che comporta una velocità iniziale del proiettile non strumentato pari a:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 20\,J}{0.41\,kg}} \approx 10\,m/s$$

L'analisi in questo caso ha una durata di 0.021s (34 minuti nella realtà) e viene realizzata tramite 656312 incrementi; il tempo di incremento stabile calcolato automaticamente da Abaqus risulta di circa 3.2e-8, e l'energia totale del sistema rimane sempre costante e pari a circa 20.674 J, mentre parte dell'energia cinetica, come prima, viene persa a causa delle deformazioni.

Come si può facilmente evincere dai due grafici in figura 3.54 e in figura 3.55, in questo modo, nonostante la perdita di energia nella prima interazione, si riesce comunque a realizzare un impatto tra proiettile e target ad una velocità di 7m/s.

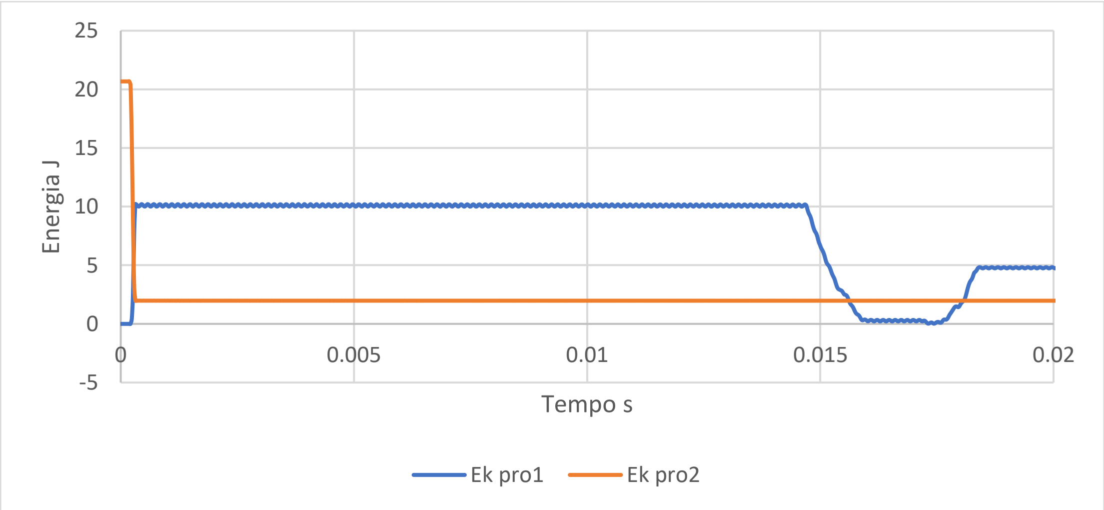


Figura 3.54 Andamento dell'energia cinetica nel tempo per il proiettile strumentato (pro1)

e per quello non strumentato (pro2)

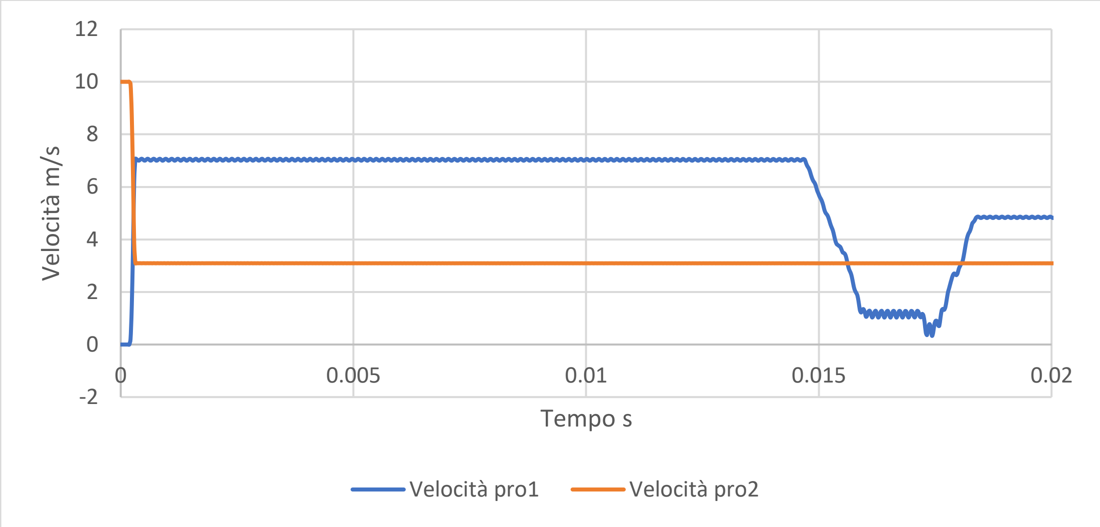


Figura 3.55 Andamento della velocità nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

Di seguito verranno riportati direttamente i grafici della F_lc corretta nelle sezioni che risultano più interessanti, essendo il procedimento identico a quello già descritto in precedenza. Notare che la forza di contatto è uguale al caso di impatto singolo con proiettile allungato con naso semisferico, in quanto l'energia dell'impatto e la geometria risultano identiche.

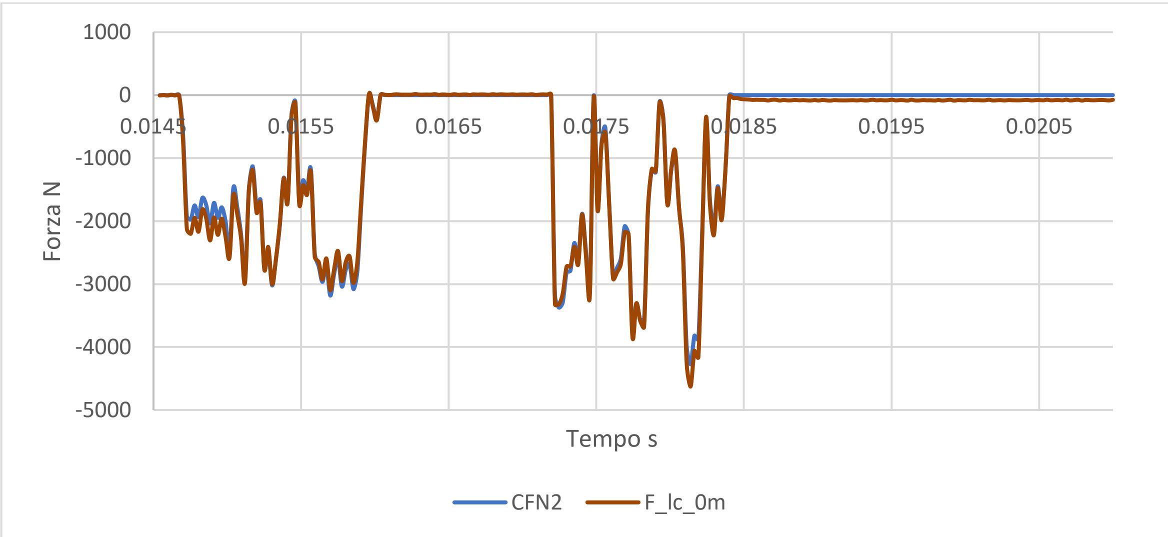


Figura 3.56 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0m

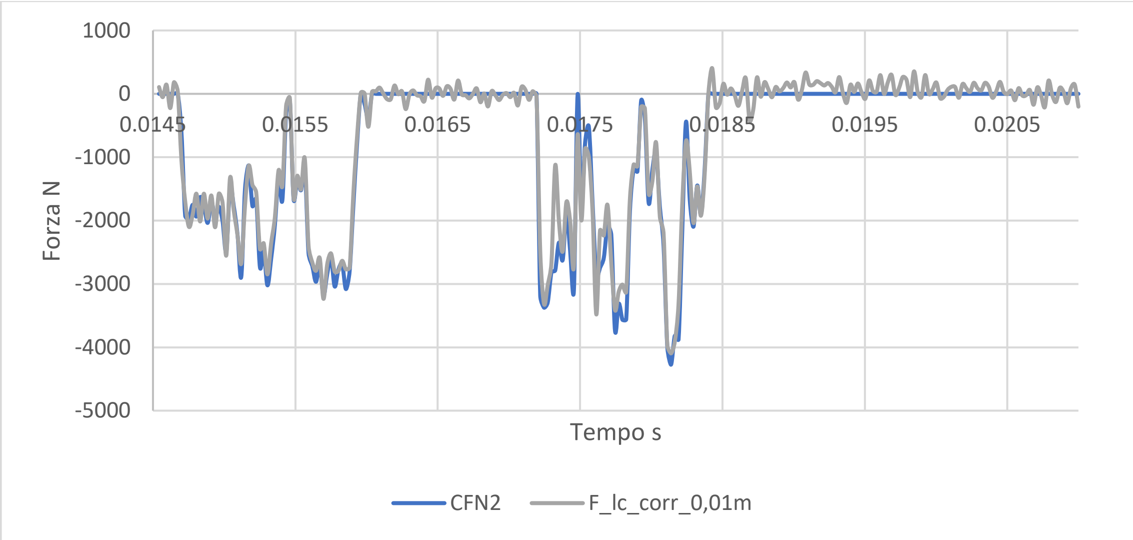


Figura 3.57 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.01m

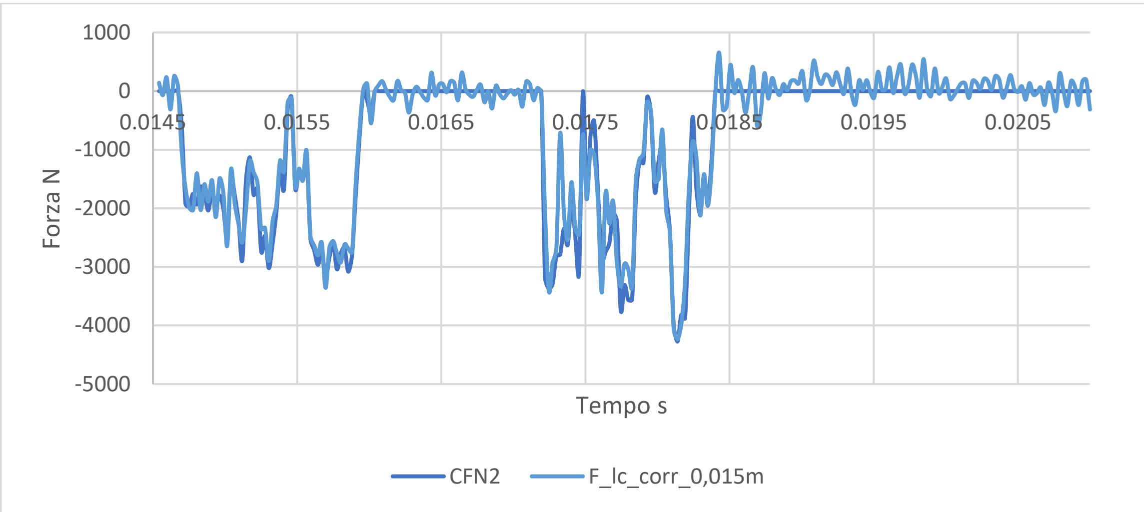


Figura 3.58 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.015m

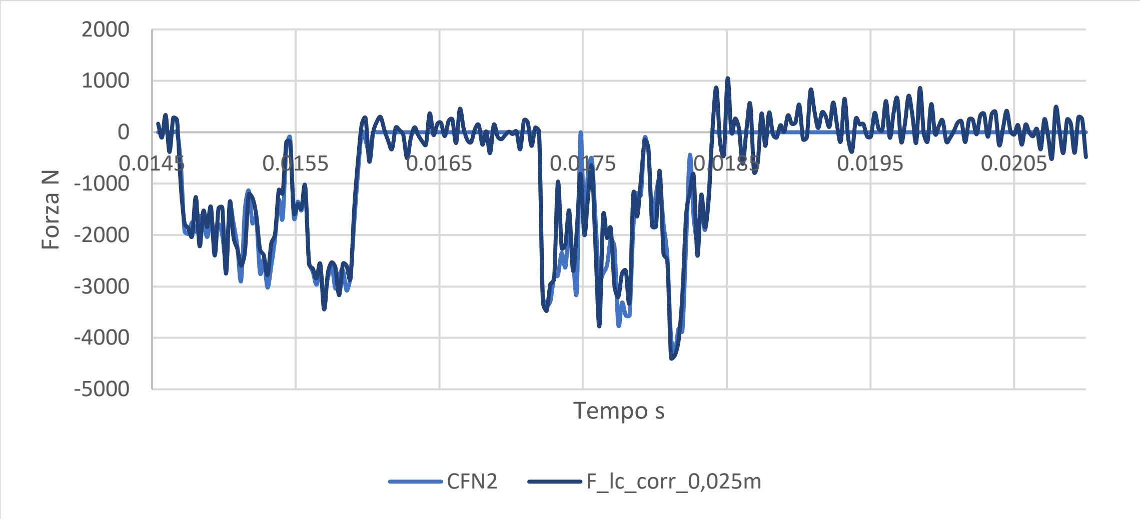


Figura 3.59 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.025m

Tutte le curve risultano abbastanza sovrapposte, il che dimostra che sia possibile, almeno dal punto di vista della simulazione, calcolare la forza di impatto tra proiettile e target tramite una cella di carico posizionata non sul proiettile sparato tramite il cannone ad aria compressa, ma su un secondo proiettile fermo e messo in moto dal primo.

Rimanendo in un intorno della superficie di contatto, la misurazione non viene alterata troppo dalla posizione della cella di carico grazie alla correzione tramite forza di inerzia. Dovendo comunque scegliere una posizione, conviene inserirla alla base del naso, in modo da ottenere minori oscillazioni indesiderate. Anche in questo caso, come si può vedere dal grafico, non c'è nessun rischio di rottura della cella.

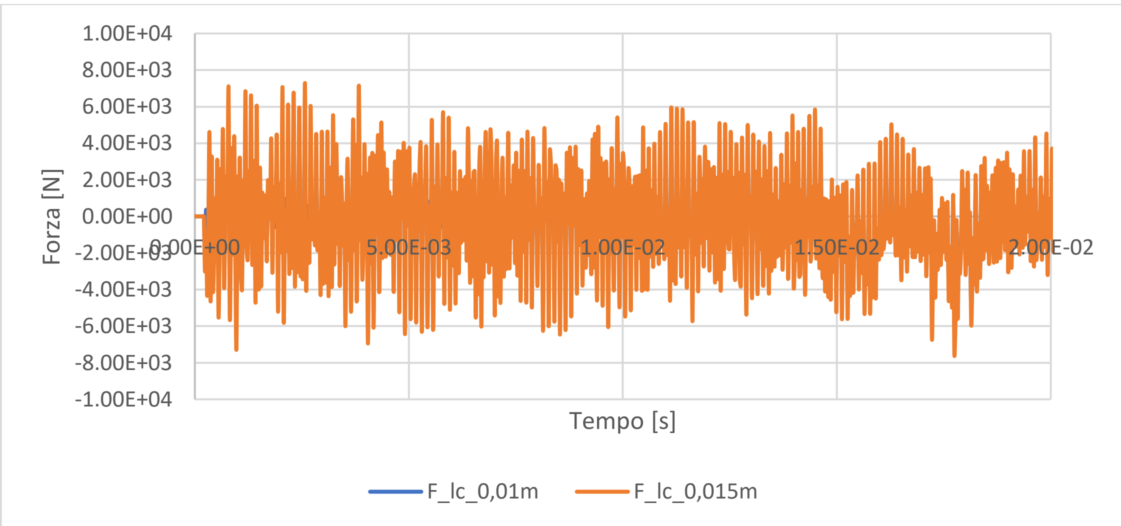


Figura 3.60 Andamento della F_lc non corretta nelle sezioni a 0.01m e 0.015 m durante entrambi gli impatti

Per completezza, si riporta anche l'andamento nel tempo dello stress S22 in direzione y per alcuni elementi posizionati rispettivamente nella zona del naso, nella zona della coda e infine al centro del proiettile, ricordando che i valori reali di stress di snervamento e rottura in trazione per il materiale acciaio risultano essere:

$$\sigma_{snerv\_reale} = 3.507x10^8$$

$$\sigma_{rott\_reale} = 4.83x10^8$$

In nessuna di queste posizioni viene raggiunto il valore di snervamento o di rottura in trazione del materiale.

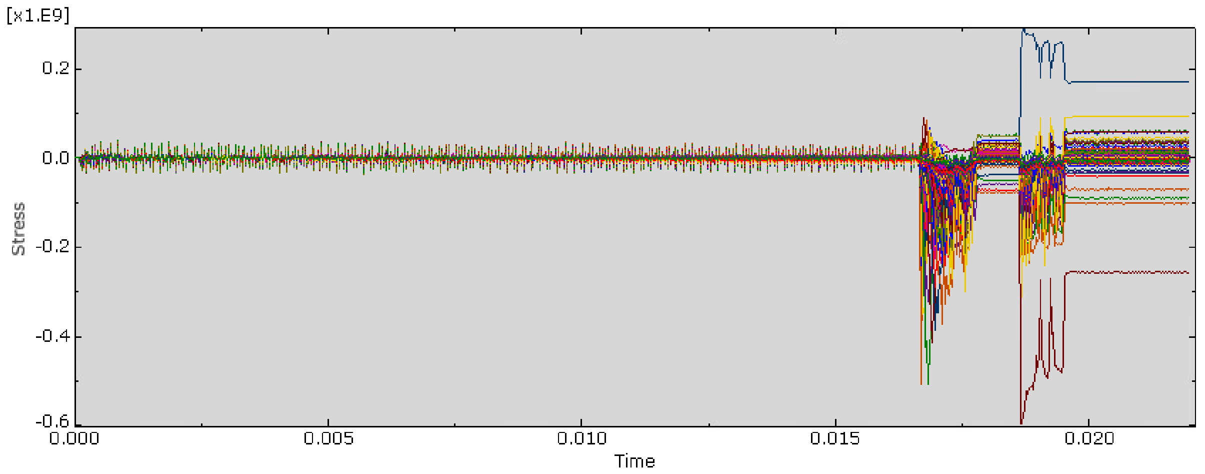


Figura 3.61 Stress S22 in direzione y sul naso del proiettile

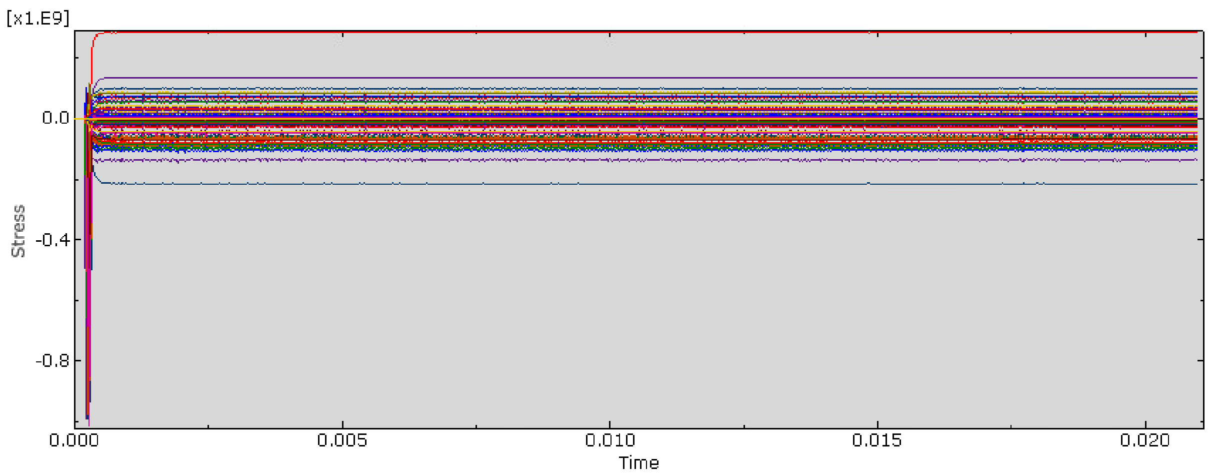


Figura 3.62 Stress S22 in direzione y sulla coda del proiettile

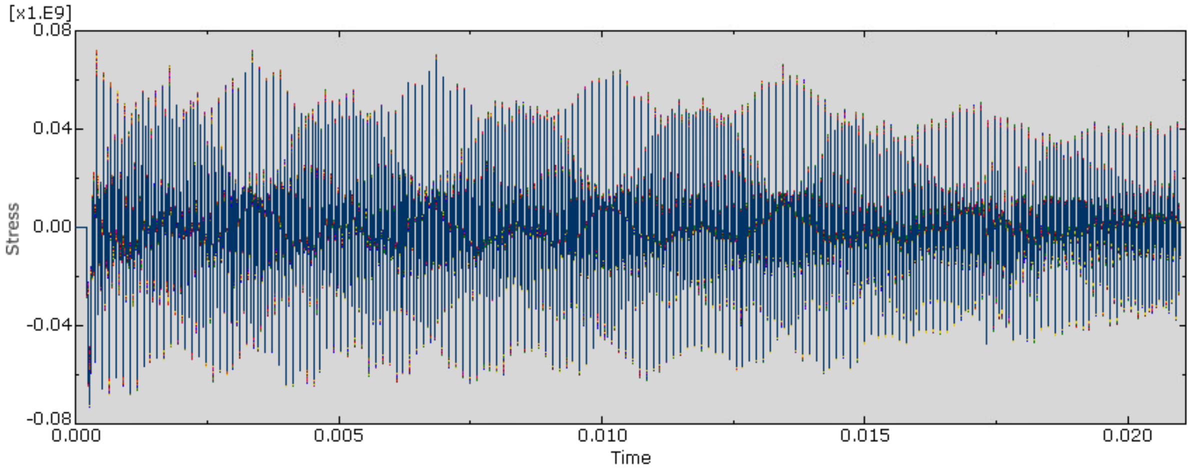


Figura 3.63 Stress S22 in direzione y al centro del proiettile

3.1.6 Impatto doppio con proiettile 2 piatto

Nel caso in cui, per semplicità, si pensasse di realizzare il proiettile non strumentato con forma cilindrica e quindi con superficie di impatto piatta, come raffigurato nella figura 3.64 e 3.65, non si riuscirebbe, neanche tramite la correzione, ad ottenere delle curve accettabili.

Figura 3.64 Doppio impatto con proiettile non strumentato cilindrico

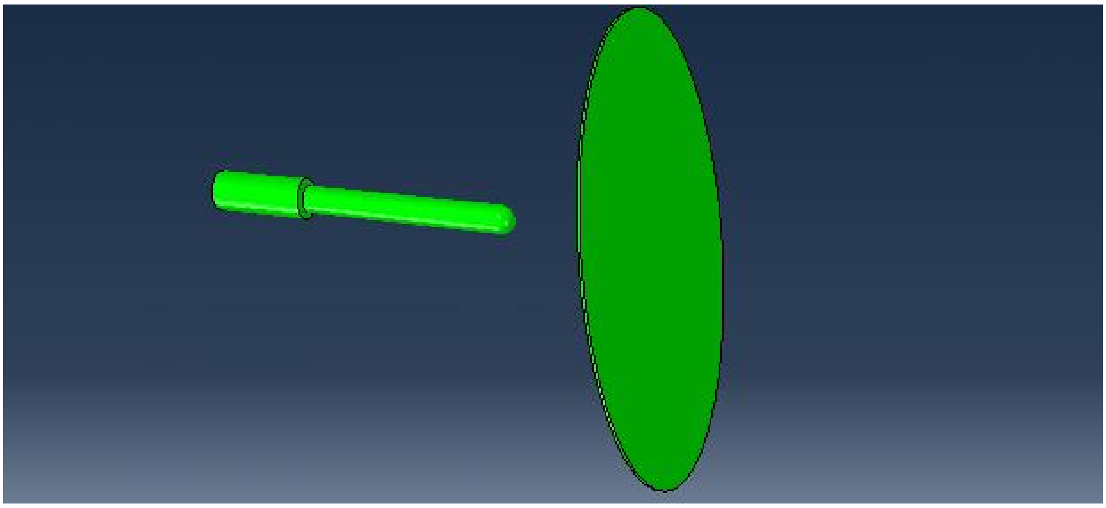


Figura 3.65 Doppio impatto con proiettile non strumentato cilindrico

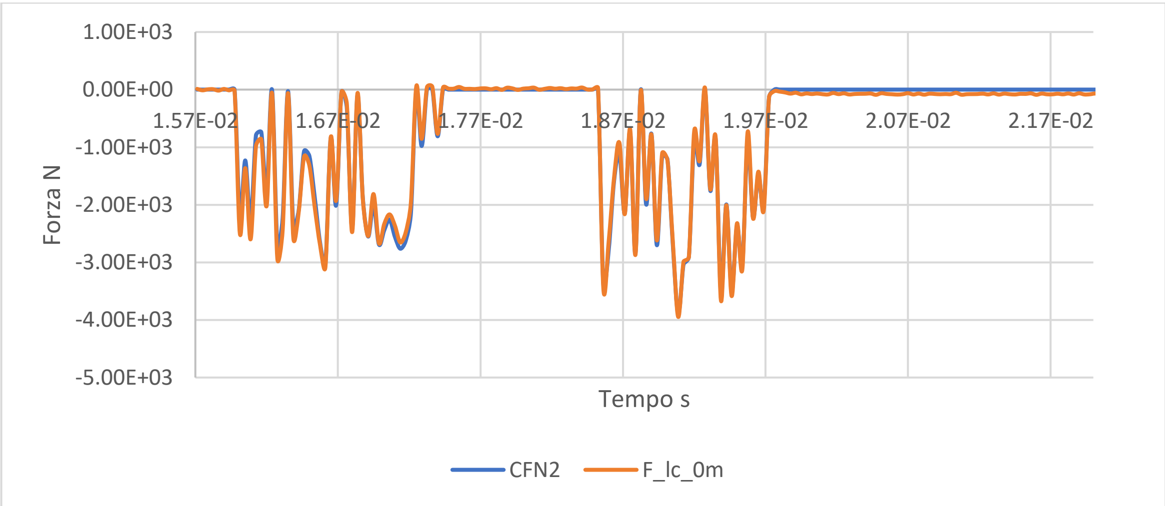


Figura 3.66 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0m

Escludendo, infatti, la curva riportata nella figura 3.66, in tutte le altre si può notare facilmente come l'impatto tra i due proiettili risulti troppo forte e generi una serie di oscillazioni molto importanti che rendono difficile la sovrapposizione tra la curva CFN2 e le varie curve F_lc e F_lc corrette, tanto più quanto ci si allontana dalla zona di impatto.

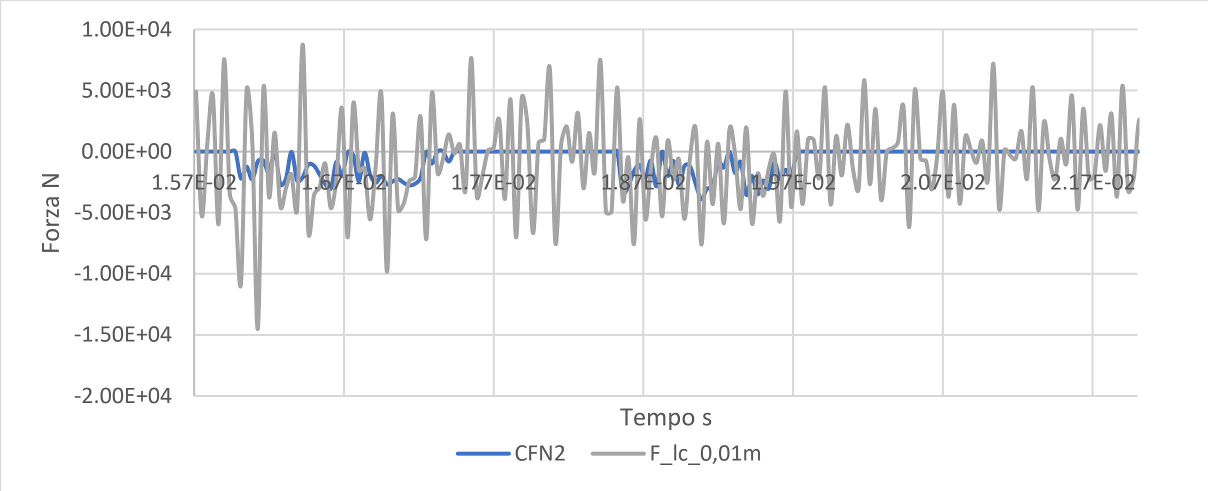


Figura 3.67 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.01m

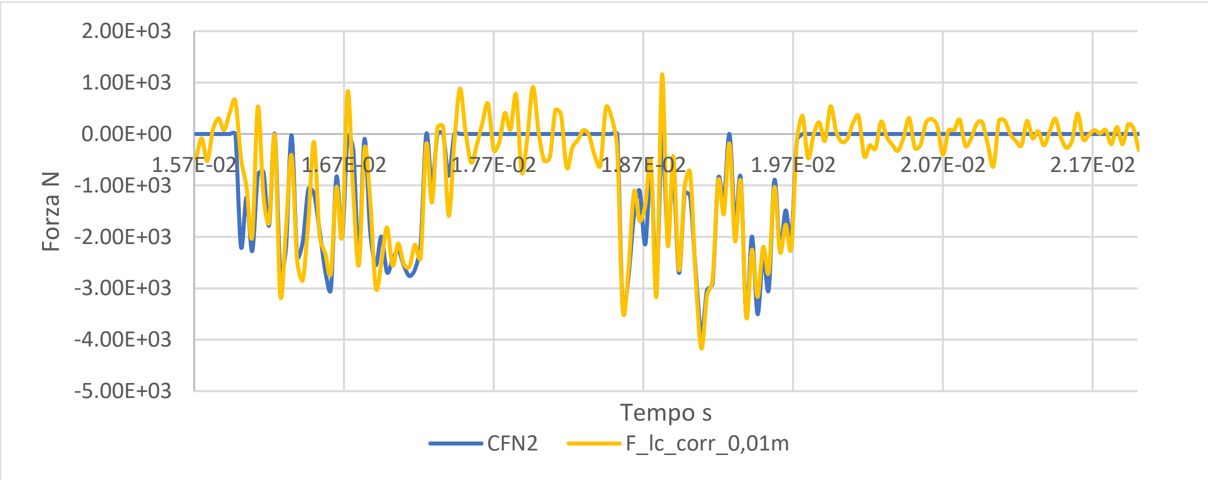


Figura 3.68 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.01m

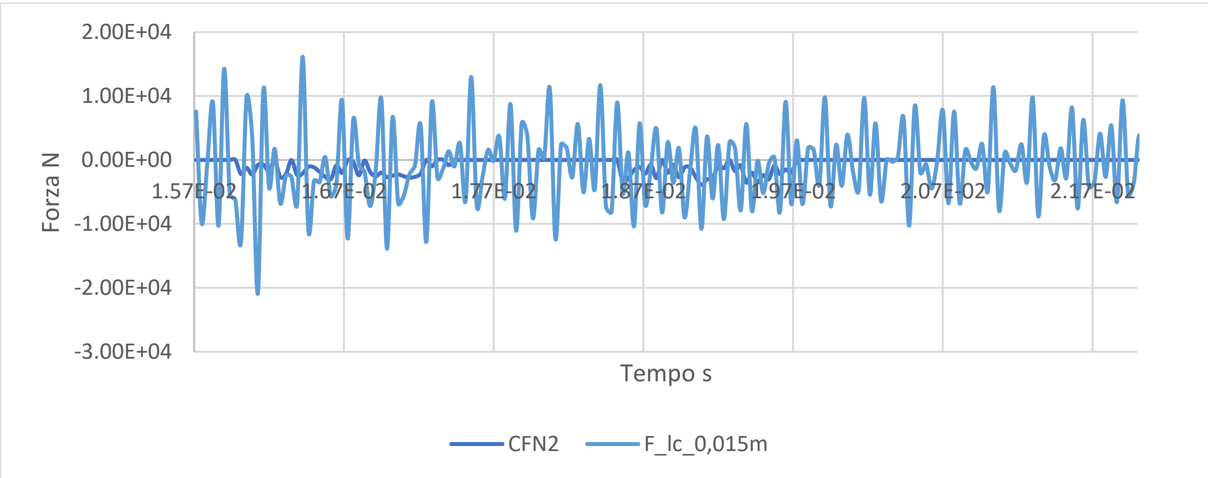


Figura 3.69 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.015m

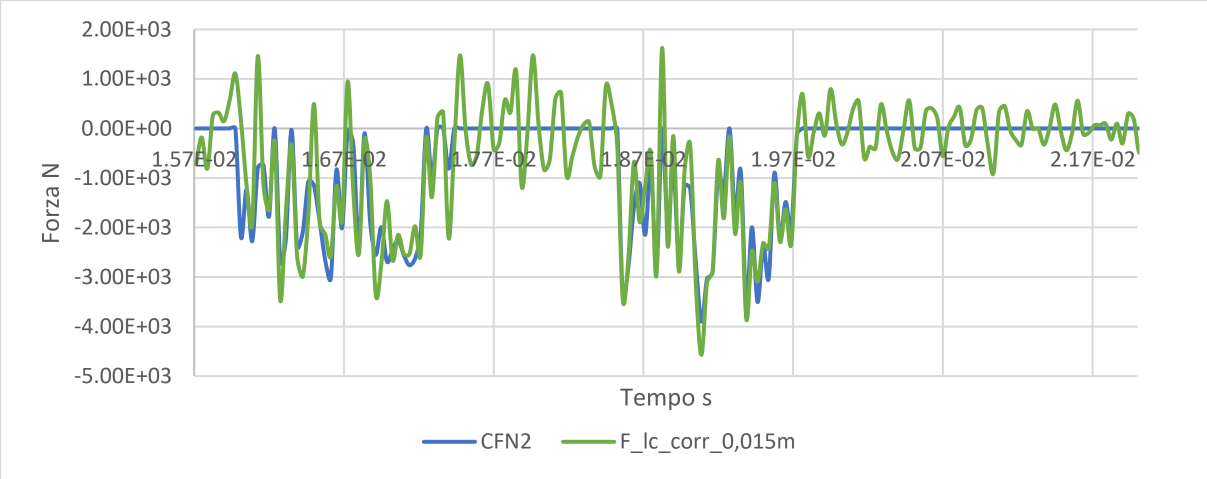


Figura 3.70 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con inerzia nella sezione a 0.015m

Bisogna comunque sottolineare che anche in questo caso particolare la cella di carico riuscirebbe tranquillamente a misurare l'ordine di grandezza della forza di impatto, pur perdendo in precisione e con l'obbligo di non posizionarla più lontano di 0.01m-0.015m dal punto di impatto, cosa che vedremo essere un problema nella fase sperimentale; registrerebbe, tuttavia, anche dei picchi di forza non realistici. Durante il primo impatto, inoltre, risentirebbe di valori di forza molto elevati, fino a 30 kN, ma comunque non pericolosi.

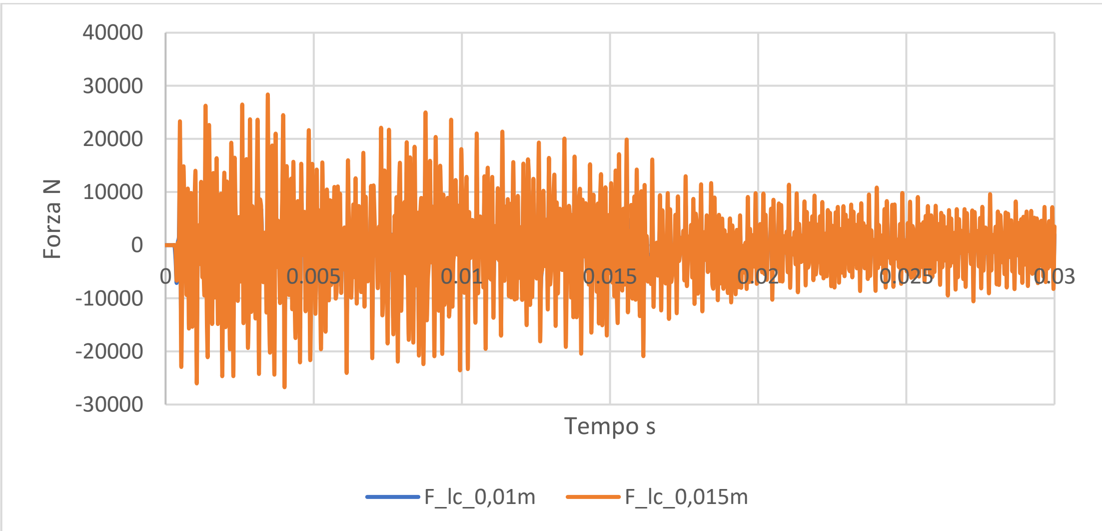


Figura 3.71 Andamento della F_lc non corretta nelle sezioni a 0.01m e 0.015 m durante entrambi gli impatti

Nel momento in cui si aumentasse ancora di più il diametro del proiettile cilindrico non strumentato, nel tentativo di diminuirne la lunghezza, le oscillazioni generate dalla prima interazione diventerebbero sempre più importanti: si riuscirebbe ancora a individuare l'andamento della forza generata dal secondo impatto, ma i picchi lontani dal valore effettivo della CFN2 diventerebbero molto più numerosi.

Come lato positivo, tuttavia, si noti che con questa geometria non si ha una perdita tanto elevata di energia cinetica: non risulta quindi necessario un aumento di velocità del proiettile non strumentato.

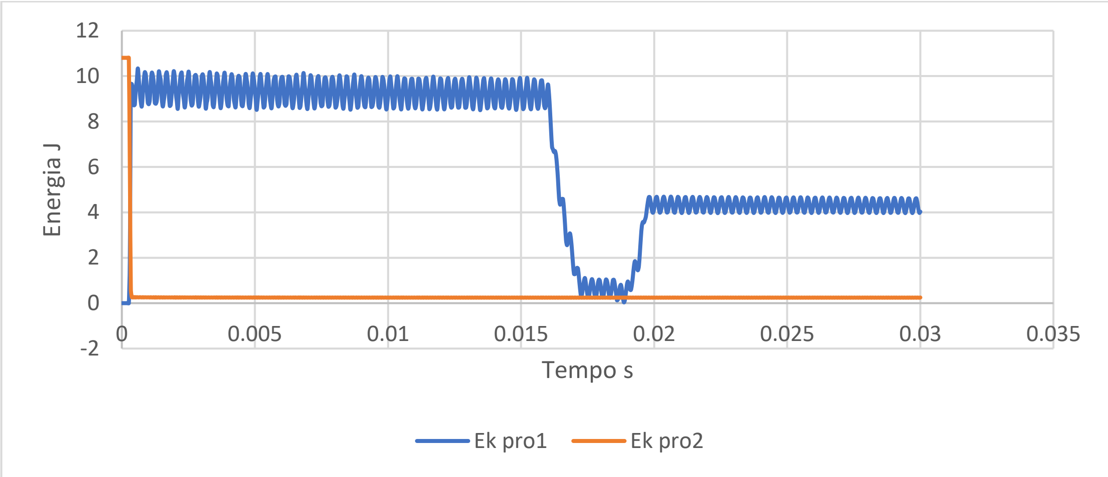


Figura 3.72 Andamento dell'energia cinetica nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

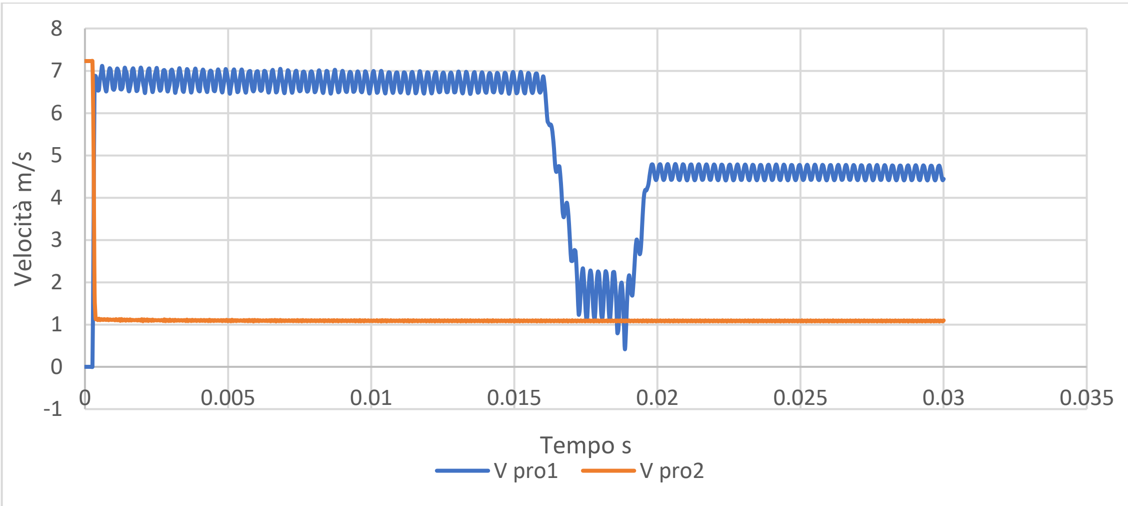


Figura 3.73 Andamento dell'energia cinetica nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

3.2 Proiettile con energia 100 J e velocità 22 m/s

Vengono in questo paragrafo realizzate su Abaqus CAE delle simulazioni di impatto doppio identiche a quelle riportate in precedenza, con stesse dimensioni, forme e materiali per i due proiettili e per il target. Si modifica solo la velocità iniziale del proiettile non strumentato e, di conseguenza, si aumenta anche la distanza tra il proiettile impattante, che ha bisogno di un maggiore spazio per stabilizzare il suo moto, e il target. L'idea è quella di realizzare l'impatto con un'energia pari a 100J: si imposta prima di tutto una velocità iniziale di 22m/s e si riportano le curve dell'andamento dell'energia cinetica e della velocità nel tempo per i due proiettili.

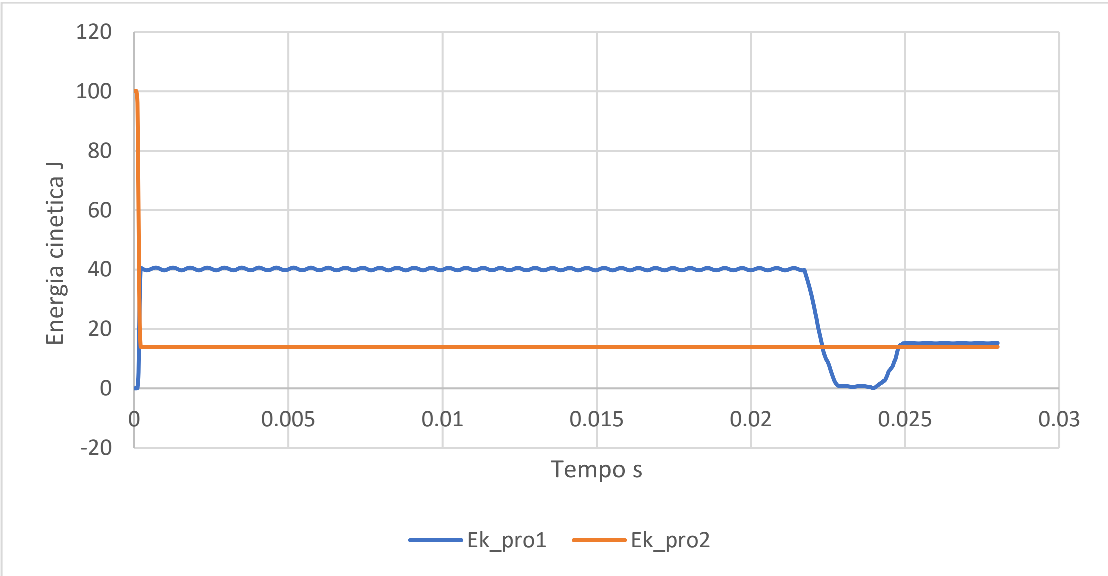


Figura 3.74 Andamento dell'energia cinetica nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

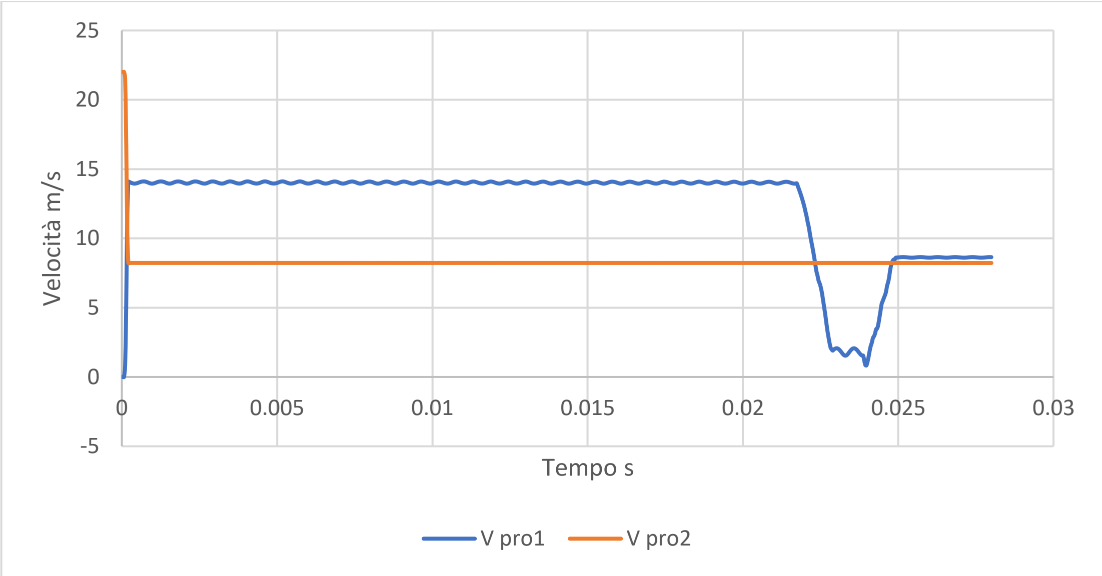


Figura 3.75 Andamento della velocità nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

Come si può notare, anche in questo caso c'è una perdita di energia cinetica dai 100J del proiettile 2 ai 40J del proiettile 1, ovvero il valore finale risulta 2/5 di quello che si vorrebbe ottenere. Si prova allora a portare l'energia iniziale a un valore di 250J tramite una velocità di:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 250\, J}{0.41\, kg}} \approx 35\, m/s$$

Muovendo il target e realizzando quindi una nuova analisi con una velocità pari a 35m/s per il proiettile 2, lasciando invariato tutto il resto del modello, si ottengono degli andamenti nel tempo di energia cinetica e velocità molto vicini ai valori desiderati:

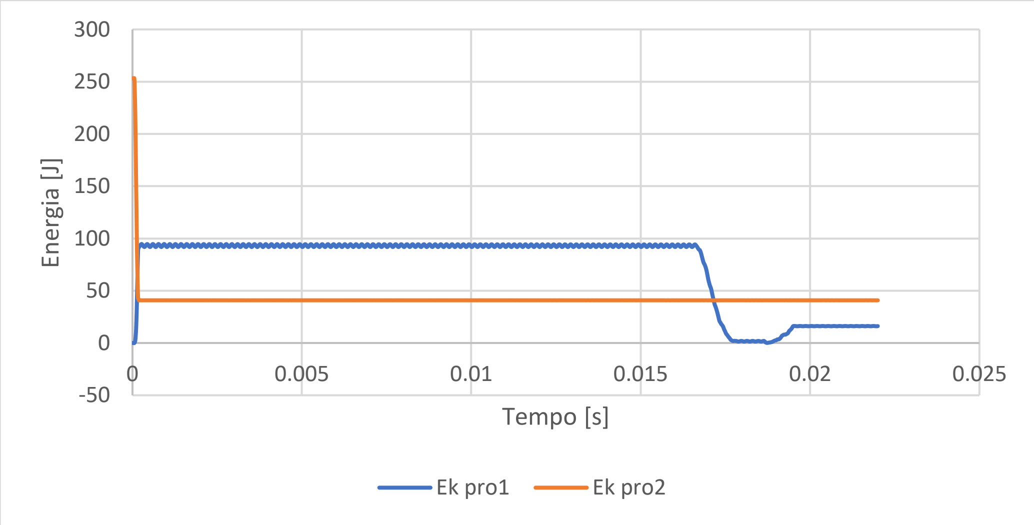


Figura 3.76 Andamento dell'energia cinetica nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

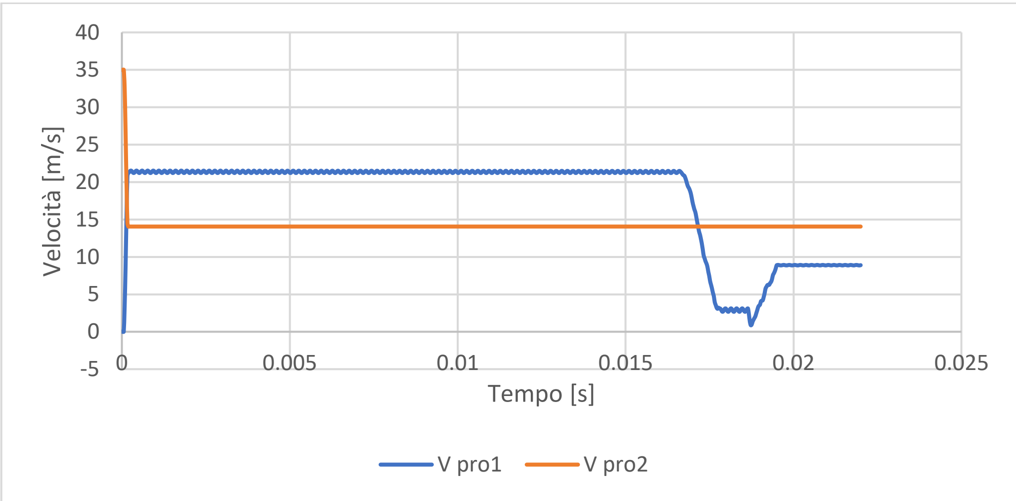


Figura 3.77 Andamento della velocità nel tempo per il proiettile strumentato (pro1) e per quello non strumentato (pro2)

Si riporta di seguito l'andamento della forza di contatto CFN2 confrontata direttamente con i valori della F_lc corretta nelle sezioni a 0.01m, 0.015m e 0.025m.

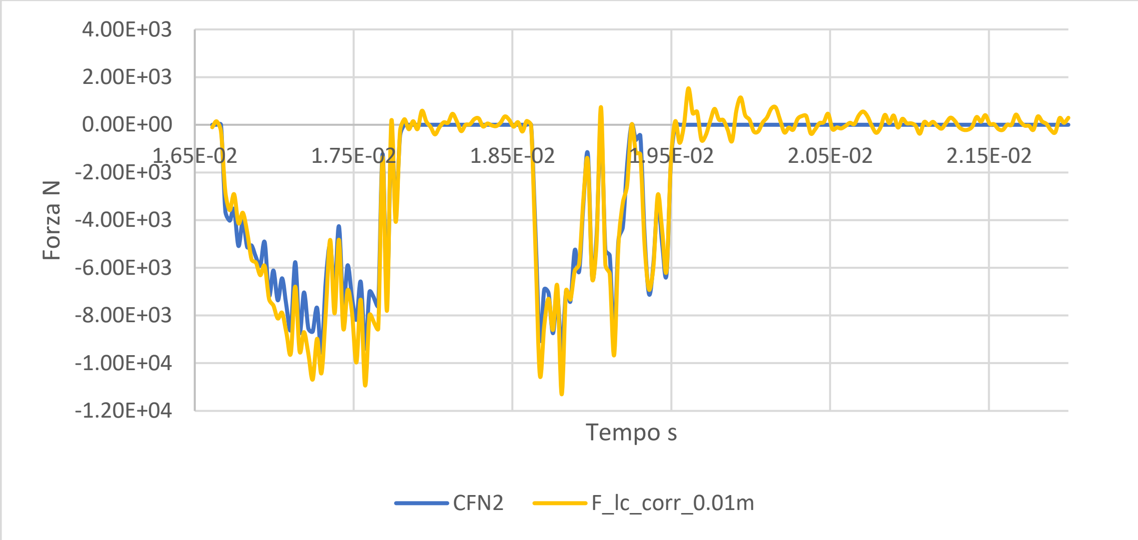


Figura 3.78 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.01m

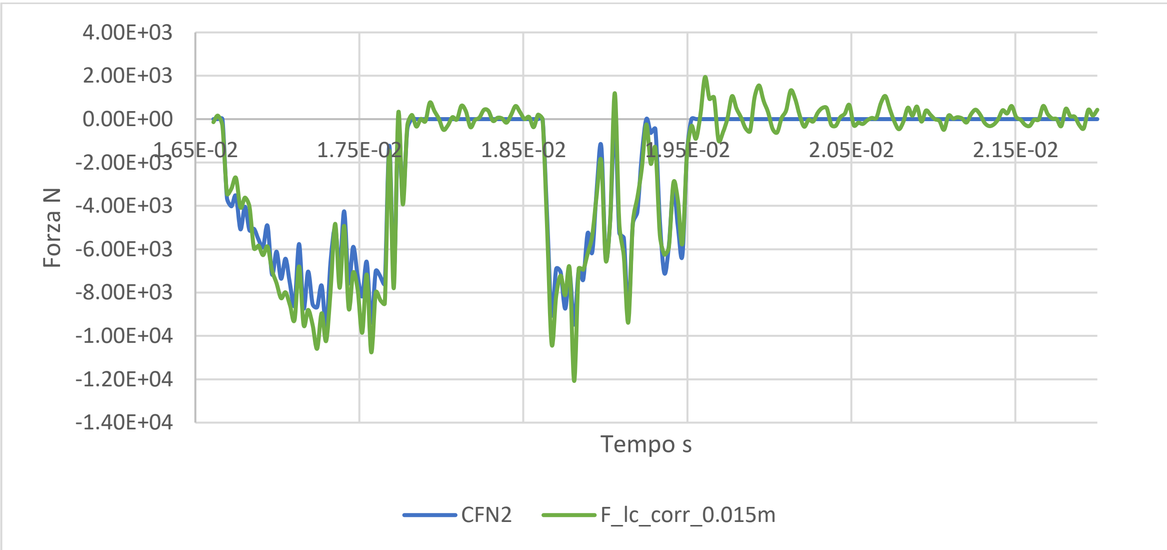


Figura 3.79 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.015m

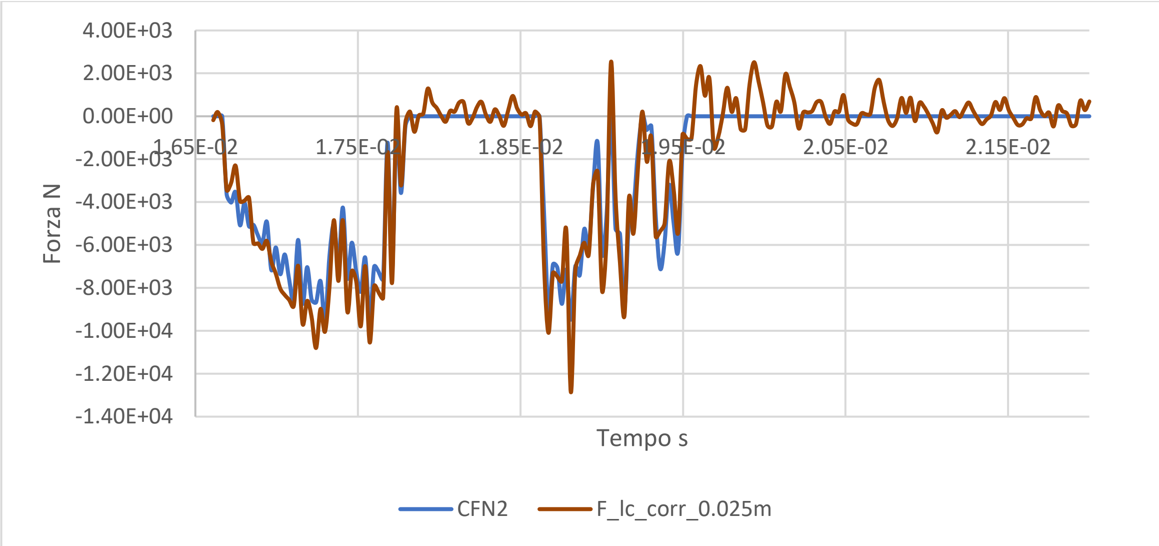


Figura 3.80 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta con l'inerzia nella sezione a 0.025m

Le curve sono sufficientemente sovrapposte per poter affermare che, anche a velocità più elevate, sia possibile il calcolo della forza di impatto tra proiettile e target tramite la cella di carico posta sul proiettile inizialmente fermo.

Anche in questo caso, come si può verificare dal grafico in figura 3.81, non c'è nessun rischio di rottura della cella, in quanto il massimo valore di forza che viene raggiunto in quella che dovrebbe essere la sua posizione indicativa è $30\ kN$ (viene per semplicità riportata nuovamente la tabella delle caratteristiche della cella di carico).

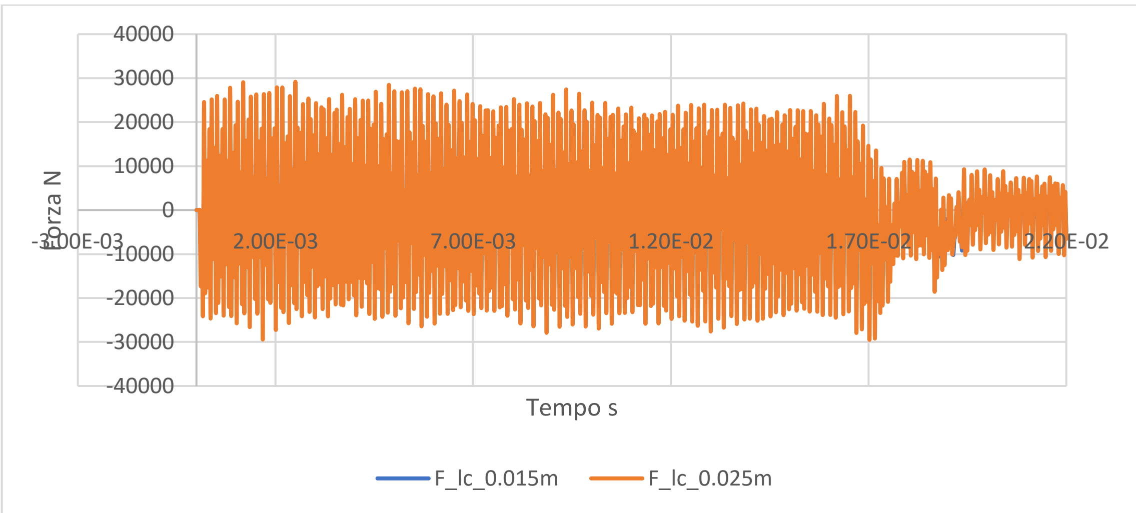


Figura 3.81 Andamento della F_lc non corretta nelle sezioni a 0.015m e 0.025 m durante entrambi gli impatti

	ENGLISH:	SI:	
PERFORMANCE			
Sensitivity (±15 %)	0.25 mV/lb	56.2 mV/kN	
Measurement Range (Compression)	20000 lb	88.96 kN	
Maximum Static Force (Compression)	25000 lb	111.2 kN	
Broadband Resolution (1)	0.4 lb-rms	1.78 N-rms	[2]
Low Frequency Response (-5 %)	0.0003 Hz	0.0003 Hz	[3]
Upper Frequency Limit	60000 Hz	60000 Hz	[4]
Non-Linearity	≤1 % FS	≤1 % FS	[1]

Tabella 3.5 Valori riferiti alla cella di carico modello M203B della PCB Piezotronics

Come fatto in precedenza, si riporta anche l'andamento di S22 nelle tre zone del proiettile (rispettivamente naso, coda e centro), con i valori reali di stress di snervamento e rottura a trazione per il materiale acciaio che sono sempre:

$$\sigma_{snerv\_reale} = 3.507x10^8$$
$$\sigma_{rott\_reale} = 4.83x10^8$$

Il valore dello snervamento viene raggiunto solamente in un elemento che si trova sulla base del proiettile e lungo l'asse, in quanto quest'area è soggetta all'impatto tra i due proiettili, che risulta essere abbastanza forte; in ogni caso, il materiale non dovrebbe mai andare incontro a rottura perché rimane sempre molto distante da tale valore limite.

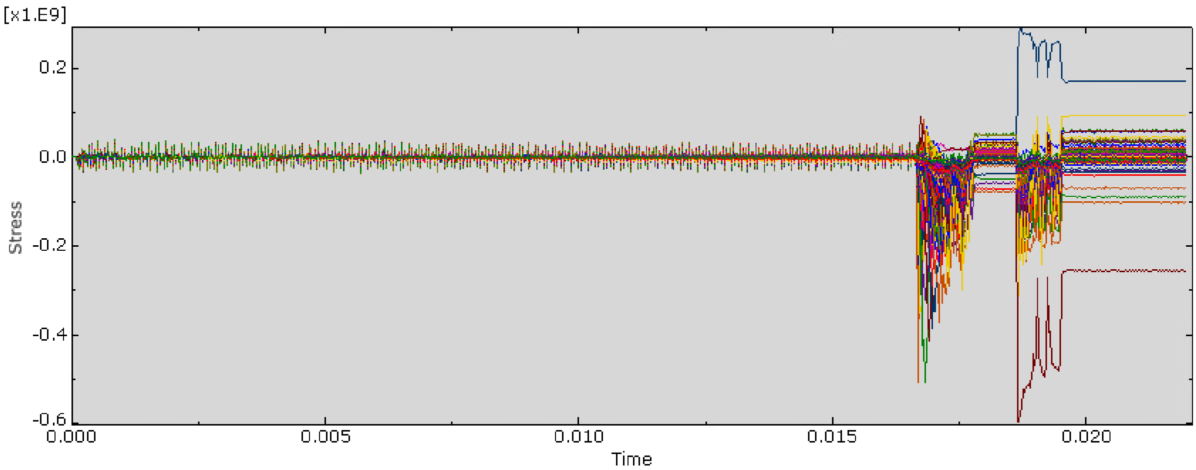


Figura 3.82 Stress S22 in direzione y sul naso del proiettile

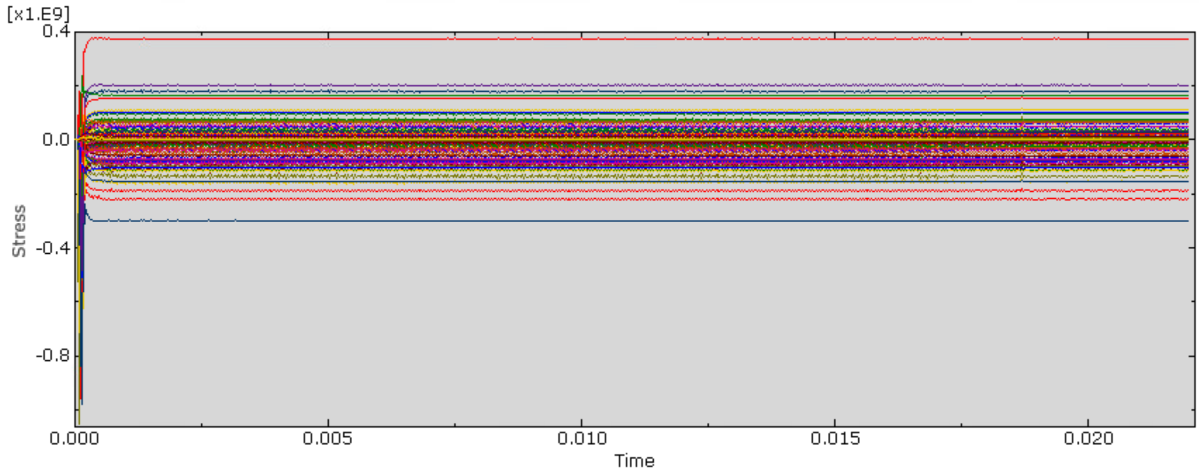


Figura 3.83 Stress S22 in direzione y sulla coda del proiettile

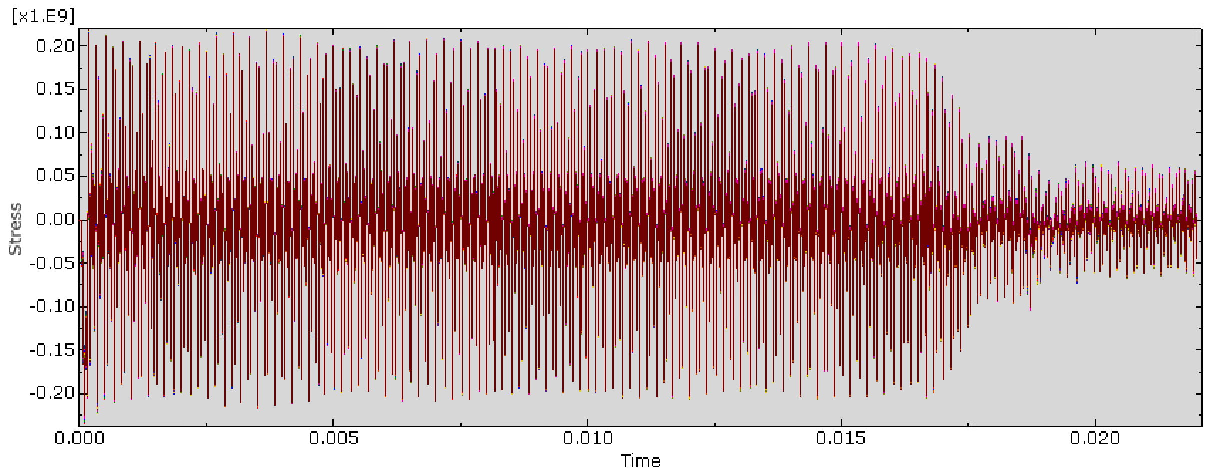


Figura 3.84 Stress S22 in direzione y nella zona centrale del proiettile

4 Modello semplificato

In questo capitolo viene elaborato un modello semplificato con lo scopo di ottenere dei risultati indicativi da confrontare con quelli ricavati tramite le simulazioni su Abaqus e con quelli che verranno ottenuti nelle successive prove sperimentali. Come accennato in precedenza e come verrà descritto meglio nei successivi capitoli, tali prove sono realizzate con l'utilizzo di due proiettili, di cui uno non strumentato che viene sparato utilizzando un cannone ad aria compressa e che impatta contro un altro proiettile fermo attrezzato con una cella di carico. L'idea finale è quella di misurare la forza di impatto utilizzando il proiettile strumentato, ma eliminando il problema relativo ai cablaggi. Questo proiettile, infatti, acquisirà in parte o totalmente la velocità del precedente, ma senza essere inserito all'interno della canna e percorrendo una distanza molto più limitata.

Nella figura 4.1 viene riportato uno schema di massima del proiettile strumentato, il quale è formato da:

- una parte che va a impattare con il target;
- la cella di carico piezoelettrica;
- una massa intercambiabile che serve ad adattare l'oggetto alle diverse esigenze, in quanto l'energia cinetica del proiettile dipende anche dalla massa oltre che dalla velocità.

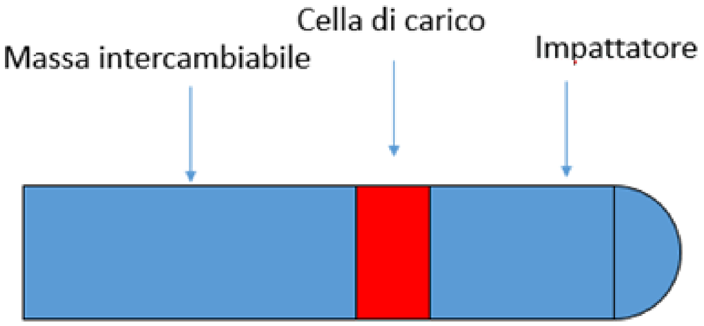


Figura 4.1 Schema generale del proiettile strumentato

Il modello che verrà elaborato dovrà descrivere le tre fasi che caratterizzano questo approccio:

1. l'urto tra i due proiettili, quello strumentato M1 e quello non strumentato M2, che verrà descritto utilizzando un modello molto semplificato di urto;
2. la frazione di tempo che intercorre tra l'urto e l'impatto, ovvero il movimento del proiettile M1 verso il target. Questa fase non necessita di particolari descrizioni in quanto il proiettile, che rimane sempre all'interno della guida in cui è inserito, percorre una distanza molto breve prima dell'impatto, calcolata in base al tempo che esso impiega per stabilizzare la sua velocità;

3. l'impatto tra il proiettile M1 e il target, ovvero il focus principale di questo lavoro di tesi. Verranno presentati diversi modelli e si cercherà di capire se qualcuno di questi risulta applicabile nel caso in esame.

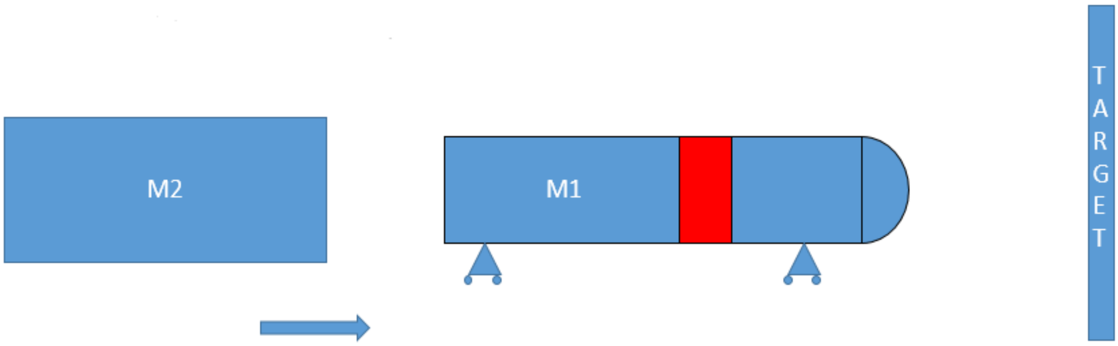


Figura 4.2 Rappresentazione semplificata dei sistema elaborato

4.1 L'urto

Quando due punti materiali entrano in contatto e interagisco per un tempo trascurabile rispetto al tempo di osservazione del sistema si parla di urto [14]. Nell'urto si sviluppano forze molto intense e di brevissima durata, chiamate impulsive, che modificano la quantità di moto dei due corpi; queste forze, però, sono interne al sistema costituito dai due corpi che interagiscono. In un sistema di due corpi che urtano, rispetto all'elevata intensità delle forze impulsive, deve considerarsi trascurabile ogni eventuale azione esterna, ad esempio quella della gravità o delle forze normali del piano di appoggio. In assenza di forze esterne, quindi, durante un urto le particelle esercitano un impulso uguale e contrario l'una sull'altra, e la quantità di moto complessiva si conserva. Se si indicano con $v_{1,in}$ e $v_{2,in}$ le velocità dei due punti, con masse m_1e m_2, prima dell'urto, e con $v_{1,fin}$ e $v_{2,fin}$ le corrispondenti velocità dopo l'urto, la conservazione della quantità di moto P si può scrivere come:

$$P_{in} = m_1 v_{1,in} + m_2 v_{2,in} = m_1 v_{1,fin} + m_2 v_{2,fin} = P_{fin}$$

Per quanto riguarda l'energia cinetica del sistema, vi sono degli urti, detti elastici, in cui questa si conserva: i due corpi durante l'urto subiscono delle deformazioni elastiche, riprendendo la configurazione iniziale a urto concluso. Questo è l'unico caso in cui valgano contemporaneamente le due leggi di conservazione:

$$P_{in} = P_{fin}$$
$$E_{k_{in}} = E_{k_{fin}}$$

Quando viceversa tale conservazione energetica non ha luogo, l'urto si dice anelastico: parte dell'energia viene dispersa a causa di una deformazione o rottura dei corpi. In particolare, un urto in cui i corpi rimangono attaccati formando un unico corpo con massa $m_1 + m_2$ è detto completamente anelastico.

Si consideri l'urto tra il proiettile m_2 inizialmente in movimento e il proiettile m_1 inizialmente fermo. Per semplicità entrambi i proiettili vengono trattati come masse puntiformi. La massa m_1 dovrebbe essere data dalla somma della massa del proiettile più quella della cella di carico, ma al momento si consideri solo quella del proiettile.

$$V_{1i} = 0$$
$$V_{2i} \neq 0$$
$$m_1 = m_{proiettile1} + m_{cella} \approx m_{proiettile1}$$

Essendo garantita la conservazione della quantità di moto, si può scrivere che:

$$m_1 V_{1i} + m_2 V_{2i} = m_1 V_{1f} + m_2 V_{2f}$$

Da cui, considerando i dati riportati sopra, si ricava la formula generale per la velocità dopo l'urto del proiettile inizialmente fermo:

$$V_{1f} = \frac{m_2 V_{2i} - m_2 V_{2f}}{m_1}$$

Si vuole definire il valore del rapporto di massa tale che dopo l'urto il proiettile di massa m_2 si fermi o torni indietro.

$$V_{2f} \leq 0$$
$$V_{2f} = \frac{m_2 V_{2i} - m_1 V_{1f}}{m_2} = V_{2i} - \frac{m_1}{m_2} V_{1f} \leq 0$$

Supponiamo di voler trasmettere al corpo di massa $m_1$la stessa velocità che apparteneva a quello di massa m_2.

$$V_{2i} = V_{1f}$$

Si ottiene:

$$\frac{m_1}{m_2} \geq \frac{V_{2i}}{V_{1f}} = 1$$

$$m_1 \geq m_2$$

Nel caso in cui si pone $m_1 = m_2$, si ottiene un urto elastico in quanto l'energia cinetica si conserva:

$$\frac{1}{2} m_1 V_{1f}^2 = \frac{1}{2} m_2 V_{2i}^2$$

Nel caso in cui, invece, si pone $m_1 > m_2$, si ottiene che l'energia cinetica finale risulta maggiore di quella iniziale:

$$\frac{1}{2} m_1 V_{1f}^2 > \frac{1}{2} m_2 V_{2i}^2$$

Questa possibilità non esiste dal punto di vista fisico in quanto dopo un urto non si può ottenere un aumento di energia, ma solo una sua diminuzione o, al massimo, una sua conservazione.

È possibile imporre che le due masse siano diverse solo nel caso in cui si consideri che:

$$V_{1f} \neq V_{2i}$$

$$V_{2f} \neq 0$$

ovvero il corpo m_1 entra in moto con una velocità diversa rispetto a quella di m_2, il quale dopo l'urto non ha velocità nulla.

Si possono considerare due casi; nel caso in cui

$$m_1 > m_2$$

$$V_{1i} = 0$$

la sfera di massa m_2 rimbalza e torna indietro, comportamento che è accettabile nel caso in analisi.

Ricordando che:

$$v_{cm} = \frac{m_1 V_{1,in} + m_2 V_{2,in}}{m_1 + m_2}$$

Si può scrivere che:

$$V_{2f} = \frac{2m_1 V_{1i} + (m_2 - m_1)V_{2i}}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} V_{2i}$$

$$V_{1f} = \frac{(m_1 - m_2)V_{1_i} + 2m_2 V_{2_i}}{m_1 + m_2} = \frac{2m_2 V_{2_i}}{m_1 + m_2}$$

Invece, nel caso in cui:

$$m_2 > m_1$$

$$V_{1i} = 0$$

La sfera di massa m_2 continua ad avanzare, ma a velocità ridotta. Nel caso in esame questo comportamento è accettabile, ma solo se la velocità V_{2f} è molto bassa rispetto a V_{1f}, in quanto non si può rischiare che il proiettile non strumentato interferisca con il moto di quello strumentato e di conseguenza con le misure che si ottengono dalla cella di carico nel momento dell'impatto.

Riassumendo, per la fase dell'urto sono possibili tre casi:

1. $m_1 = m_2 \ \rightarrow V_{1f} = V_{2i}$ e il proiettile impattante si arresta;
2. $m_1 > m_2 \ \rightarrow V_{1f} \neq V_{2i}$ e il proiettile impattante rimbalza all'indietro;
3. $m_1 < m_2 \ \rightarrow V_{1f} \neq V_{2i}$ e il proiettile impattante continua ad avanzare ma con velocità minore.

Nella pratica, si cercherà sempre di fare in modo che le masse $m_1$ed m_2 dei due proiettili più tutti gli strumenti ad essi associati risultino il più simili possibile, in modo che la velocità trasmessa al proiettile strumentato sia la stessa che viene generata tramite il cannone ad aria compressa sul proiettile non strumentato, anche se si è visto dalle simulazioni che è sempre presente una certa perdita di energia cinetica.

Di seguito vengono riportate alcune importanti considerazioni:

- si ricorda che nell'urto è trascurabile qualsiasi azione esterna, compresa la forza d'attrito, in quanto la forza impulsiva dell'urto è molto più elevata;
- l'urto è stato trattato come elastico in quanto l'urto anelastico non può essere affrontato a meno di conoscere la frazione di energia che i corpi hanno perduto. Potrebbe essere trattato l'urto completamente anelastico, ma nel caso in esame non è accettabile che i due corpi dopo l'urto procedano attaccati;
- i proiettili nell'urto sono stati trattati come corpi puntiformi;
- si è considerato che l'urto avvenga esattamente all'uscita del cannone ad aria compressa, cosa che effettivamente accadrà in fase sperimentale, in modo da garantire la conoscenza di V_{2i}e di conseguenza la conoscenza di V_{1f}.

Dopo l'urto, essendo la velocità V_{1f} in gioco molto elevata e la distanza tra il proiettile e il target molto limitata, nel punto di impatto la velocità ha solo una componente orizzontale con valore $V = V_{1f}$.

4.2 L'impatto

Il problema della risposta di target sottoposti a un impatto da parte di un proiettile è molto complesso in quanto sono coinvolti fenomeni diversi e la modifica di uno o più parametri può modificare drasticamente i risultati ottenuti. L'impatto del proiettile produrrà, infatti, deformazioni generate dalla propagazione di onde elastiche, plastiche e idrodinamiche che coinvolgono sollecitazioni normali, di flessione e di taglio, da effetti di attrito, da innesco, propagazione e arresto di cricche. L'analisi di questi processi è più semplice per le condizioni di impatto in cui il proiettile non si deforma, ma il proiettile è soggetto agli stessi meccanismi di rottura.

In particolare, quando si affrontano gli impatti a basse velocità, si seguono una serie di fasi, che partono dal cercare di ottenere informazioni riguardanti la risposta della struttura e la time history dell'impatto, passando poi per l'analisi della struttura impattata per comprenderne il danneggiamento e la degradazione, per poi studiare le proprietà residue della stessa. In questo lavoro di tesi ci si sta concentrando sulla prima fase e, in particolare, sulla forza che si genera tra proiettile e bersaglio, che risulta essere uno dei parametri che giocano un ruolo chiave nello studio del fenomeno.

È molto importante decidere con quale precisione e con quale metodo modellare il target e l'impattatore: il secondo, di solito, viene o considerato come una semplice massa concentrata o simulato con grande precisione tramite un software a elementi finiti. In secondo luogo, bisogna scegliere la legge che meglio descriva la forza di contatto nel caso che si sta esaminando.

Di seguito verranno presentati diversi modelli:

- un modello base semplificato basato sulla sola energia cinetica del proiettile;
- tre modelli che utilizzano la legge di contatto Hertziana e che modellano il proiettile come un corpo rigido;
- un modello che considera il danno prodotto nel target da un proiettile rigido nel caso di profondità di penetrazione abbastanza elevate.

Si ricorda che l'obiettivo dei modelli qui riportati è quello di convalidare il metodo sperimentale che si vuole testare e avere un'idea preliminare della forza di contatto che dovrebbe essere calcolata dalla cella di carico, confrontandola con quella trovata tramite le simulazioni a elementi finiti.

4.2.1 Modello basato sull'energia cinetica

Nel seguente modello [15] si eguaglia l'energia cinetica posseduta dal proiettile nell'instante appena prima dell'impatto con il prodotto della forza di impatto per la distanza su cui la forza stessa è distribuita:

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 V^2 = F\, d \cos\theta$$

θ è l'angolo dell'impatto, che si assume in questa trattazione nullo. L'energia cinetica è conosciuta in quanto scelta a priori, e di conseguenza è nota anche la velocità del proiettile impattante.

Si ottiene in questo modo una stima approssimativa della forza di impatto in gioco:

$$F = \frac{m_1 V_{1f}^2}{2d}$$

Si noti come la forza di impatto sia direttamente proporzionale alla massa e al quadrato della velocità del proiettile. La massa *m* può eventualmente essere esplicitata come $m = \rho V$. Il termine *d* individua la distanza su cui la forza è distribuita, che nel caso di target deformabile dipende molto dalla forma e dall'estensione della deformazione. Nel caso di impattatore sferico, si potrebbe assumere che *d* sia pari al raggio della sfera, ma anche questa sarebbe un'assunzione troppo approssimata. Per conoscere il valore di *d* in modo abbastanza preciso bisognerebbe realizzare delle misure durante un impatto sperimentale. Si può quindi concludere che l'applicazione di questo modello risulta poco utile in quanto vengono ignorati troppi aspetti legati al fenomeno dell'impatto.

4.2.2 Modelli basati sulla legge di contatto Hertziana

Le legge di contatto Hertziana alla base di questi modelli [16][17][18][19] definisce la forza di contatto F_c che si genera tra due corpi isotropi di rivoluzione quando entrano staticamente in contatto come:

$$F_c = k_c \delta^{3/2} \qquad (1)$$

Tale legge è valida anche per impatti a basse velocità e per impatti su piastre, come nel caso in esame, ed eventualmente anche piastre realizzate in composito.

kc è la rigidezza di contatto, la quale dipende dal materiale e dalle proprietà geometriche di target e impattatore. La sua espressione per un impattatore isotropo sferico o con naso semisferico e un target di tipo piastra anch'esso isotropo è:

$$k_c = \frac{4}{3}\sqrt{R_i}\,\frac{E_i' E_s'}{E_i' + E_s'}$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2}$$

Le costanti E e ν sono rispettivamente il modulo di Young e il modulo di Poisson, R si riferisce al raggio, il pedice *i* indica le grandezze relative all'impattatore, il pedice *s* quelle relative al target.

Ritornando all'equazione (1), δ è chiamata indentazione e misura di quanto decresce la distanza tra due punti appartenenti uno al target e l'altro all'impattatore, i quali sono inizialmente separati da una distanza infinita.

Di seguito vengono presentati tre modelli di impatto, i quali si differenziano per la modalità con cui viene considerato il target, mentre la legge di contatto e la definizione dell'impattatore risultano coincidenti.

L'impattatore, infatti, è considerato come una massa concentrata m_i che viaggia alla velocità iniziale v_0 e il cui spostamento è indicato con w_i. La porzione di questo corpo che impatta con il target è sferica e presenta un raggio di curvatura indicato con R_i. L'impattatore viene considerato come un corpo rigido: la sua deformazione in seguito all'impatto è trascurata. Dal diagramma di corpo libero del proiettile, è possibile ottenere la sua semplice equazione del moto, che è comune a tutti e tre i modelli:

$$m_i \ddot{w}_i + F_c = 0$$

Con condizioni iniziali:

$$w_i(0) = 0$$

$$\dot{w}_i(0) = v_0$$

La legge di contatto F_C è semplicemente quella riportata in precedenza nell'equazione (1), con l'indentazione che può essere espressa come:

$$\delta = w_i - w_s \quad (11)$$

Esistono due diversi tipi di risposte per un impatto, che dipendono dalla velocità e dalla massa dell'impattatore e dalle dimensioni e dalle proprietà del target:

- *Wave-controlled* se la deformazione del target è localizzata nella zona attorno al punto di impatto perché i bordi non vengono raggiunti dalle onde che si propagano. La massima forza di contatto e la risposta del target non sono mai in fase. Un caso particolare è l'impatto *half-space*, che non viene qui considerato perché richiederebbe un target abbastanza pesante o abbastanza rigido da non deflettersi per niente durante l'impatto.

- *Boundary-controlled* se le onde vengono riflesse dai bordi e quindi tutto il target si deforma durante l'impatto. Un caso particolare è l'impatto *quasi-statico*, che si ha quando il tempo di contatto risulta molto maggiore del periodo del modo di vibrazione minore: in questo specifico caso, la forza di contatto e la risposta del target sono in fase.

Di seguito vengono presentati tre modelli semplici, ovvero quello massa-molla, quello basato sul bilancio dell'energia e quello di Zener, che risultano più o meno validi in base al comportamento di impatto del sistema considerato.

1. Modello massa molla: si considera la risposta del target come quella di un sistema massa-molla a un grado di libertà con la stessa rigidezza e la stessa frequenza fondamentale del target stesso. Di conseguenza, questa semplificazione risulta corretta se il target si comporta prevalentemente seguendo il suo primo modo, cosa che accade in un impatto quasi-statico. Se, invece, non è presente nessuna riflessione dai bordi il modello non è in grado di catturare lo spostamento del target, ma essendo in questo caso tale spostamento molto piccolo rispetto a quello dell'impattatore, la soluzione

risulta comunque corretta. Con questo modello è possibile ottenere una buona approssimazione dell'andamento nel tempo delle quantità principali dell'impatto.

2. Modello basato sul bilancio dell'energia: è un caso particolare di modello massa-molla per $\mu = m_i/m_s \rightarrow \infty$ ed è valido solo per valori di $\mu \geq 10$, quando gli impatti sono quasi-statici. Con questo modello è possibile ottenere la forza di impatto massima, lo spostamento massimo del target e la penetrazione massima dell'impattatore.

3. Modello di Zener: valido se l'impatto termina prima che le onde vengano riflesse dai bordi, è caratterizzato dal fatto che la soluzione è influenzata da un unico parametro λ. Ottimo nel caso di singolo impatto, quando gli impatti sono multipli riesce a catturare quello che succede durante il primo

In tutte le altre modalità di comportamento, che sono dei casi intermedi tra l'impatto dominato localmente e quello quasi-statico, è necessario l'utilizzo di un modello FEM perché gli errori connessi all'utilizzo dei modelli semplificati non sono più trascurabili.

4.2.2.1 Modello massa-molla

Il modello massa-molla è basato sull'idea di rappresentare l'impattatore e il target come due masse rigide m_i e m_s rispettivamente e rappresentare le loro deformazioni tramite delle molle. È stato studiato che la massa effettiva m_e che contribuisce agli effetti inerziali nel caso di target tipo piastra impattata al centro e semplicemente supportata è un quarto della massa totale:

$$m_e = \frac{1}{4} m_s$$

Le due masse sono collegate tramite una molla Hertziana e il comportamento di carico-deformazione trasversale del target è rappresentato da una combinazione di molle: una flessionale, una a taglio e una membranale. Vengono trascurati lo smorzamento del materiale, i danni alla piastra e l'attrito superficiale. Le rigidezze in gioco nel seguente modello sono quindi:

$$k_m = rigidezza\ membranale\ del\ target$$

$$k_b = rigidezza\ flessionale\ del\ target$$

$$k_s = rigidezza\ di\ taglio\ del\ target$$

$$k_c = rigidezza\ di\ contatto\ hertziana$$

Le espressioni per k_b e k_m per quattro diverse condizioni al contorno del target sono riportate nella figura 4.3. Nel caso in esame verrà considerato il target come semplicemente appoggiato. Le formule sono molto generali, ma si ricorda che nel caso di target omogeneo isotropo, si possono scrivere modulo di Young, modulo di taglio e modulo di Poisson come:

$$E_r = E_z = E_s$$

$$G_r = G_{zr} = G_s$$

$$\nu_r = \nu_{zr} = \nu_s$$

Boundary conditions	Edge conditions	Bending stiffness, K_b	Membrane stiffness parameters, K_m
Clamped*	Immovable	$\frac{4\pi E_r h^3}{3(1 - \nu_r^2)a^2}$	$\frac{(353 - 191\nu_r)\pi E_r h}{648(1 - \nu_r)a^2}$
	Movable	$\frac{4\pi E_r h^3}{3(1 - \nu_r^2)a^2}$	$\frac{191\pi E_r h}{648a^2}$
Simply supported**	Immovable	$\frac{4\pi E_r h^3}{3(3 + \nu_r)(1 - \nu_r)a^2}$	$\frac{\pi E_r h}{(3 + \nu_r)^4 a^2}\left\{\frac{191}{648}(1 + \nu_r)^4 + \frac{41}{27}(1 + \nu_r)^3 + \frac{32}{9}(1 + \nu_r)^2 + \frac{40}{9}(1 + \nu_r) + \frac{8}{3} + \frac{1}{(1 - \nu_r)}\left[\frac{(1 + \nu_r)^4}{4} + 2(1 + \nu_r)^3 + 8(1 + \nu_r)^2 + 16(1 + \nu_r) + 16\right]\right\}$
	Movable	$\frac{4\pi E_r h^3}{3(3 + \nu_r)(1 - \nu_r)a^2}$	$\frac{\pi E_r h}{a^2(3 + \nu_r)^4}\left[\frac{191}{648}(1 + \nu_r)^4 + \frac{41}{27}(1 + \nu_r)^3 + \frac{32}{9}(1 + \nu_r)^2 + \frac{40}{9}(1 + \nu_r) + \frac{8}{3}\right]$

*From reference 13.
**Derived using Babuno-Galerkin variational method, as reported in reference 13.

Figura 4.3 Espressioni della rigidezza flessione e membranale del target impattato al centro per quattro diverse condizioni al contorno.
Da "K. N. Shivakumar et al.,Prediction of impact force and duration during low velocity impact on circular composite laminates".

La rigidezza di taglio k_s, ricavata [16] dalla relazione stress-deformazione per un carico trasversale su un target circolare, risulta essere:

$$k_s = \frac{4\pi G_{zr} h}{3}\left(\frac{E_r}{E_r - 4\nu_{rz} G_{zr}}\right)\left(\frac{1}{\frac{4}{3} + \log(a/a_c)}\right)$$

dove h è lo spessore del target, a è il raggio del target e a_c è il raggio di contatto tra impattatore e target, il quale, dipendendo dalla forza di contatto F_c che non è nota a priori, può essere inizialmente definito come $a_c = h/2$.

L'effettiva rigidezza dovuta a flessione e taglio viene indicata con k_{bs}, esprimibile come:

$$k_{bs} = rigidezza\ equivalente\ taglio - flessionale\ del\ target = \frac{k_b k_s}{k_b + k_s}$$

Per target sottili, essendo la rigidezza flessione abbastanza bassa, si può scrivere che:

$$k_{bs} = \frac{k_b k_s}{k_b + k_s} \approx k_b$$

Considerando il diagramma di corpo libero del target e dell'impattatore e assumendo il secondo sempre in contatto con il primo, si possono scrivere le equazioni di equilibrio del sistema massa-molla a due gradi di libertà:

$$m_e \ddot{w}_s + k_{bs} w_s + k_m w_s^3 - k_c (w_i - w_s)^{1.5} = 0$$
$$m_i \ddot{w}_i + k_c (w_i - w_s)^{1.5} = 0$$

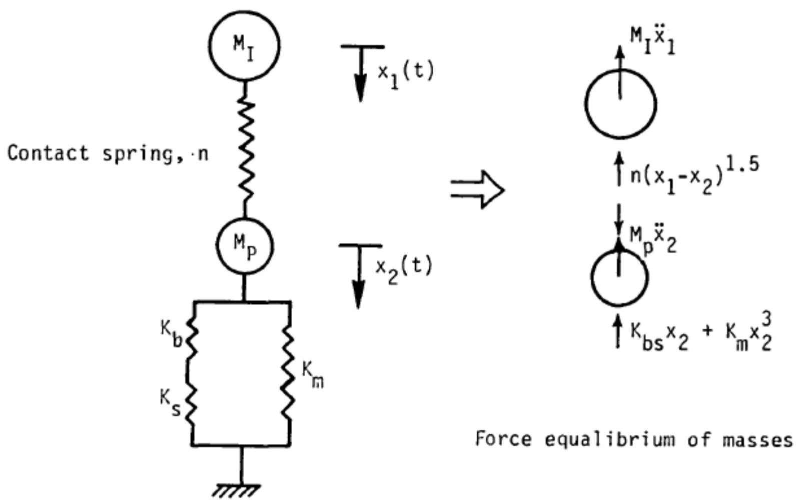


Figura 4.4 Il modello massa-molla a due gradi di libertà.
Da "K. N. Shivakumar et al.,Prediction of impact force and duration during low velocity impact on circular composite laminates".

Queste due equazioni possono essere risolte insieme alle seguenti condizioni iniziali:

$$w_i(0) = 0$$

$$\dot{w}_i(0) = v_0$$

$$w_s(0) = 0$$

$$\dot{w}_s(0) = 0$$

È sempre possibile ricondurre un'equazione di ordine m ad un sistema di m equazioni del primo ordine. Riscrivendo, infatti, le equazioni sostituendo $y_1 = w_i$ e $y_3 = w_s$, si ottiene il seguente sistema:

$$y_1' = y_2$$

$$y_2' = -\frac{1}{m_i} k_c (y_1 - y_3)^{1.5}$$

$$y_3' = y_4$$

$$y_4' = -\frac{1}{m_e} [k_{bs} y_3 + k_m y_3^3 - k_c (y_1 - y_3)^{1.5}]$$

Che può essere risolto tramite Matlab con il risolutore numerico ODE45 utilizzando le seguenti condizioni iniziali:

$$y_1(0) = 0$$

$$y_2(0) = v_0$$

$$y_3(0) = 0$$

$$y_4(0) = 0$$

Anche il modello molla-massa, tuttavia, non verrà applicato in quanto, data la natura delle semplificazioni che compie, viene usato solitamente per il caso particolare di un impattatore che rimane attaccato alla struttura durante l'evento di impatto, cosa che non accade nel caso in esame.

4.2.2.2 Modello basato sul bilancio dell'energia

Un impatto quasi statico si ha quando la struttura raggiunge la sua massima deflessione nel momento stesso in cui l'impattatore raggiunge la massima penetrazione: questo è vero soprattutto quando la massa dell'impattatore è grande rispetto a quella del target. Il metodo del bilancio energetico, infatti, è tanto più corretto quanto $\mu = m_i/m_s$ è crescente. Se queste assunzioni sono valide, si può utilizzare il principio di conservazione dell'energia totale per il sistema target-impattatore:

$$K_i = E_{bs} + E_m + E_c$$

Al tempo t=0, l'unica energia presente è quella cinetica dell'impattatore, il quale viaggia inizialmente a una velocità v_0:

$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_o^2$$

Al tempo $t = t_m$, momento nel quale si ha la massima deflessione del target e il massimo spostamento dell'impattatore, l'energia del sistema è la somma dell'energia di deformazione del target (taglio-flessionale E_{bs} e membranale E_m) e dell'energia di contatto E_c. Vengono trascurate le perdite di energia dovute allo smorzamento del materiale, all'attrito superficiale e alle vibrazioni di modo più elevato.

$$E_{bs} = \int_0^{w_{smax}} F_{bs} dw_s = \frac{1}{2} k_{bs} w_{smax}^2$$

$$E_m = \int_0^{w_{smax}} F_m dw_s = \frac{1}{4} k_m w_{smax}^4$$

$$E_c = \int_0^{\delta_{max}} F_c d\delta = \frac{2}{5} k_c \delta_{max}^{5/2} = \frac{2}{5} \frac{F_{cmax^{5/3}}}{k_c^{2/3}}$$

Dove:

$$F_{bs} = k_{bs} w_s$$

$$F_m = k_m w_s^3$$

$$F_c = k_c \delta^{3/2}$$

Se si considera il diagramma di corpo libero del target utilizzato nel modello massa-molla e lo si scrive al tempo $t = t_m$ si ottiene:

$$F_{cmax} = m_e \ddot{w}_s(t_m) + F_{bsmax} + F_{mmax}$$

E considerando trascurabile l'inerzia del target:

$$F_{cmax} \approx F_{bsmax} + F_{mmax} = k_{bs} w_{smax} + k_m w_{smax}^3$$

Si può quindi scrivere l'equazione finale:

$$\frac{1}{2} m_i v_o^2 = \frac{1}{2} k_{bs} w_{smax}^2 + \frac{1}{4} k_m w_{smax}^4 + \frac{2}{5} \frac{(k_{bs} w_{smax} + k_m w_{smax}^3)^{5/3}}{k_c^{2/3}}$$

Questa equazione può essere risolta in funzione di w_{smax}, implementando il metodo di bisezione su Matlab; è poi possibile calcolare

$$F_{cmax} = k_{bs} w_{smax} + k_m w_{smax}^3$$

Questo modello non è applicabile nel caso in esame in quanto risulta valido solo quando l'impattatore ha una massa molto maggiore rispetto al target. Per cui è necessario che:

$$\mu = \frac{m_i}{m_s} \geq 10$$

Mentre nel caso trattato in questa tesi risulta essere il contrario, ovvero:

$$m_i \approx 0.408\ kg$$

$$m_s = \rho_s \pi a^2 t = 8000 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot (0.15m)^2 \cdot 0.002m \approx 1.131\ kg$$

$$\mu = \frac{m_i}{m_s} = \frac{0.408\ kg}{1.131} \approx 0.361 < 10$$

4.2.2.3 Modello di Zener

Questo modello viene elaborato basandosi sulla solita teoria approssimata delle piastre sottili, nella quale si assume che il raggio di curvatura della piastra sia ovunque grande rispetto al suo spessore. Quando un target di questo tipo è sottoposto ad una forza normale impulsiva, il punto dove l'impulso agisce rimane stazionario fino a quando il disturbo, riflesso dai bordi, non torna indietro. Nel frattempo, il centro si comporta come se la piastra sia perfettamente anelastica. In ogni caso, si può definire lo spostamento del punto di applicazione della forza e quindi il moto della piastra nella zona di contatto come:

$$w_s = \alpha F_c$$

Che può essere anche scritto come:

$$w_s = \alpha \int_0^t F_c \, dt$$

Questo w_s si riferisce allo spostamento del piano medio della piastra.

F_c è la forza di contatto Hertziana, definita in precedenza, che si sa essere funzione solamente dello spostamento relativo di impattatore e target:

$$F_c = k_c \delta^{3/2}$$

$$\delta = w_i - w_s$$

Con il moto w_i dell'impattatore espresso con l'equazione:

$$\ddot{w}_i = -\frac{1}{m_i} F_c$$

La costante di proporzionalità α nel caso di target tipo piastra può essere espressa come:

$$\alpha = \left(\frac{3\rho_s}{E_s'}\right)^{1/2} \Big/ 16\rho_s h^2$$

Dove ρ_s è la densità della piastra, $2h$ il suo spessore (attenzione poiché h in questo modello è il semi spessore) e E_s' è legato al modulo di Young e al modulo di Poisson del target stesso:

$$E_s' = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$$

Differenziando due volte l'equazione del moto del target rispetto al tempo e sottraendola all'equazione del moto dell'impattatore, si ottiene una singola equazione nella sola variabile dipendente δ:

$$\ddot{\delta} + \frac{1}{m_i} F_c(\delta) + \alpha \frac{dF_c(\delta)}{dt} = 0$$

Che può essere riscritta sostituendo la forza:

$$\ddot{\delta} + \frac{1}{m_i} k_c \delta^{3/2} + \alpha k_c \frac{3}{2} \delta^{1/2} \dot{\delta} \ = 0$$

Con le due condizioni al contorno al tempo zero:

$$\delta(0) = 0$$

$$\dot{\delta}\ (0) = v_0$$

Con v_0 velocità con cui il proiettile impatta sul target.

Si possono adimensionalizzare il tempo t e lo spostamento δ nel seguente modo:

$$\delta = T v_0 \delta^*$$

$$t = T\tau$$

Dove:

$$T = \left(\frac{m_i}{k_c v_0^{1/2}} \right)^{2/5}$$

Introducendo il parametro λ, chiamato parametro di inelasticità, dato da:

$$\lambda = \frac{\alpha m_i}{T}$$

si possono scrivere le equazioni sopra come:

$$\frac{d^2\delta^*}{d\tau^2} + \delta^{*3/2} + \frac{3}{2}\lambda\delta^{*1/2}\frac{d\delta^*}{d\tau} = 0$$

$$\delta^*(0) = 0$$

$$d\delta^*/d\tau\,(0) = 1$$

È possibile risolvere questo sistema tramite Matlab con il risolutore numerico ODE45, riconducendo l'equazione riportata sopra al seguente sistema di equazioni del primo ordine, come fatto nel caso del modello massa-molla. In particolare, si sostituiscono $y_1 = \delta^*$ e $y_2 = \dot{\delta}^*$, ottenendo:

$$y_1' = y_2$$

$$y_2' = -y_1^{\frac{3}{2}} - \frac{3}{2}\lambda y_1^{1/2} y_2$$

Con condizioni iniziali:

$$y_1(0) = 0$$

$$y_2(0) = 1$$

Dopo aver risolto il sistema e aver trovato il valore di $y_1 = \delta^*$, è possibile ricavare facilmente $f_c^* = \delta^{*3/2}$ e:

$$F_c = F f_c^* = (k_c^2(m_i v_0^2)^3)^{1/5} f_c^*$$

Questo modello non si basa su nessuna ipotesi che non venga rispettata nel caso in esame: tra tutti quelli visti fino ad ora e che verranno presentati in seguito, è l'unico da cui ci si aspetta di ottenere una soluzione abbastanza realistica. La sua applicazione verrà eseguita nel capitolo successivo.

4.2.3 Modello con proiettile rigido

Di seguito viene proposta una formula generale basata sul “dynamic cavity expansion model” per prevedere la forza resistente assiale che il target esercita sul naso del proiettile durante un impatto normale [20][21].

L'approccio “cavity expansion” è infatti un metodo approssimativo che consente di descrivere l'interazione che avviene localmente nei punti della superficie di contatto target-proiettile e quindi consente di determinare la forza di interazione locale istantanea tra i due corpi. Bisogna però risolvere due problemi fondamentali.

Il primo problema è determinare una legge per descrivere l'espansione di una cavità, generalmente a partire da un raggio iniziale pari a zero, all'interno del target, cosa che viene di solito fatta nei casi con simmetria assiale o sferica. Esiste una grande molteplicità di formulazioni, ma solitamente si distinguono tre classi di modelli:

- i modelli statici o quasi statici, che descrivono le sollecitazioni sulla superficie di una cavità in uno stato statico;
- i modelli quasi dinamici, che descrivono le sollecitazioni sulla superficie della cavità in funzione della velocità costante di aumento del raggio della cavità stessa;
- i modelli dinamici, che tengono conto dell'accelerazione della superficie della cavità.

Il secondo problema è giustificare l’utilizzo di un determinato approccio mettendolo in relazione con il particolare problema che si deve affrontare. Nel caso in esame, per esempio, si può utilizzare quello che viene chiamato approccio “cylindrical cavity expansion” (CCE), in quanto si utilizza la soluzione assialsimmetrica; se venisse utilizzata una soluzione sfericamente simmetrica, si parlerebbe di “spherical cavity expansion” (SCE).

La formula qui riportata, la quale dipende da due numeri adimensionali, mostra un buon accordo con i test di penetrazione su metallo per una gamma molto varia di forme di naso e di velocità di impatto [20], ma solo nel caso in cui la profondità di penetrazione risulti maggiore del diametro del proiettile e della lunghezza del naso del proiettile stesso. Viene introdotta una funzione geometrica generale che definisce le caratteristiche del corpo impattante e penetrante, il quale rimane rigido senza deformazioni e danni evidenti.

Si inizia considerando un proiettile con una forma del naso arbitraria, il quale impatta un target normalmente con una velocità V_0 e procede penetrando il bersaglio alla velocità di corpo rigido V.

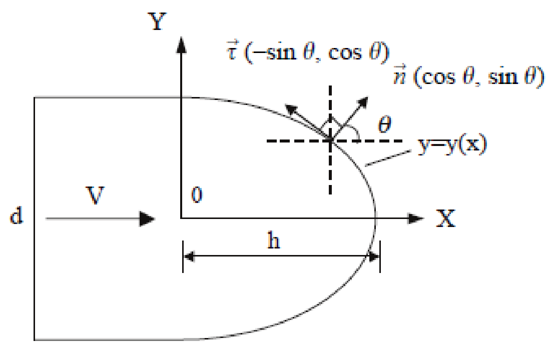


Figura 4.5 Forma del naso arbitraria. Da "X.W. Chen et al., Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics"

Il modello permette di definire la seguente relazione tra la sollecitazione normale di compressione σ_n che si genera sul naso del proiettile e la velocità normale di espansione v:

$$\sigma_n = AY + B\rho v^2$$

dove Y è lo stress di snervamento del materiale del target e ρ la sua densità. A e B sono due costanti adimensionali del materiale. La velocità v è legata alla velocità di corpo rigido V dalla relazione:

$$v = V \cos\theta$$

Lo stress tangenziale sul naso è invece legato al coefficiente di attrito μ_m:

$$\sigma_t = \mu_m \sigma_n$$

Dalle sollecitazioni normale e tangenziale si può quindi ottenere la forza assiale risultante sul naso del proiettile, la quale può essere espressa come:

$$F_x = \frac{\pi d^2}{4}(AYN_1 + B\rho V^2 N_2)$$

dove d è il diametro del proiettile.

La forza resistiva è composta da due parti: una forza quasi statica AYN_1(termine legato alla forza del target) e una forza dinamica $B\rho V^2 N_2$ (termine inerziale). Forrestal et al. e Frew et al. hanno scoperto che l'effetto del termine inerziale è molto piccolo per velocità di impatto al di sotto di 460 m / s [22][23]. Inoltre, Rosenberg e Dekel a seguito di una serie di simulazioni

[24] hanno dichiarato che, per diversi proiettili con varie forme del naso (ogiva, sferica, conica e piatta) e per diversi tipi di bersaglio (alluminio e acciaio), la forza resistiva è costante e indipendente dalla velocità d'impatto per velocità al di sotto di 1,5 km/s.

N1 e N2 sono due parametri adimensionali relativi rispettivamente alla forma del naso e all'attrito. Andando a rappresentare la forma del naso tramite una funzione y=y(x), si può scrivere che:

$$N_1 = 1 + \frac{8\mu_m}{d^2}\int_0^h y\,dx$$

$$N_2 = N^* + \frac{8\mu_m}{d^2}\int_0^h \frac{yy'^2}{1+y'^2}\,dx$$

$$N^* = \frac{8}{d^2}\int_0^h \frac{yy'^3}{1+y'^2}\,dx$$

dove h è l'altezza del naso, come mostrato nella figura 4.5.

In generale, un proiettile non deformabile è caratterizzato in prima approssimazione dal diametro d, dalla massa M e dalla funzione y=y(x) del naso. In particolare, la massa del proiettile, rappresentata di solito come densità di calibro M/d^3, è il parametro fondamentale per la penetrazione.

Nell'appendice II sono riportate le formule di N1 ed N2 nel caso delle forme più comuni di naso dei proiettili.

Per quanto riguarda le costanti A e B, è stato dimostrato che il parametro B ha un intervallo ristretto ed è generalmente pari a B=1.10 per un target in alluminio e B=1.5 per materiali incomprimibili elasto-plastici. Poiché la soluzione plastica per un materiale comprimibile è invece molto complicata, è necessaria una procedura numerica e B si ottiene tramite un fit delle curve dei risultati dell'espansione della cavità sferica. [25]

La costante A presenta un'ampia gamma di valori e, nel caso di materiali elastici-perfettamente plastici, sia nel caso incomprimibile (Poisson $\gamma = 1/2$) che comprimibile ($\gamma \neq 1/2$), può essere ottenuto dall'espansione quasi statica della cavità sferica [20]:

$$A = \frac{2}{3}\left\{1 + \ln\left[\frac{E}{3(1-\gamma)Y}\right]\right\}$$

Ricordando che per le velocità in gioco nel caso in esame si può considerare solo il termine legato alla forza del target e sapendo che la formula generale per la forza è:

$$F_x = m_1 a = \frac{\pi d^2}{4} AYN_1$$

è possibile conoscere il valore dell'accelerazione del proiettile e, di conseguenza, anche il valore del tempo della penetrazione:

$$a = \frac{F_x}{m} = \frac{\pi d^2}{4m_1} AYN_1$$

$$t = \frac{V_0}{a} = \frac{V_{1f}}{a} = \frac{V_{1f}}{AYN_1} \frac{4m_1}{\pi d^2}$$

Il modello che considera un impatto con proiettile rigido, seguendo il "dynamic cavity expansion model" risulta però valido solo nel caso di penetrazione profonda, ovvero nel caso in cui la profondità di penetrazione sia maggiore del diametro del proiettile e della lunghezza del naso del proiettile. Nel caso in esame, il target risulta troppo sottile ($t = 0.002\ m$) per riuscire a realizzare una profondità di penetrazione che sia maggiore del diametro 0.02 m e della lunghezza del naso 0.01 m. Di conseguenza, è meglio tralasciare anche questo modello perché non attendibile.

5 Applicazione numerica

Dovendo applicare il modello di Zener descritto nel capitolo precedente, può essere utile fare un veloce riepilogo delle caratteristiche riguardanti sia il target che i proiettili riportate in precedenza.

Si ricorda che le dimensioni e le proprietà del target sono:

$$a = 150\,mm = 0.15\,m$$

$$h = 2\,mm = 0.002\,m$$

$$\rho_s = 8000\,kg/m^3$$

$$E_s = 1.93x10^{11}Pa = 193\,GPa = 1.93x10^{11}N/m^2$$

$$\sigma_y = 2.9x10^8 Pa = 290\,MPa = 2.9x10^8 N/m^2$$

$$\sigma_r = 5.8x10^8 Pa = 580\,MPa = 5.8x10^8 N/m^2$$

$$Allungamento\ percentuale\ a\ rottura = 50\%$$

$$\nu_s = 0.30$$

Il proiettile non strumentato cilindrico ha dimensioni

$$R = 1.5\,cm = 0.015\,m$$

$$L = 8\,cm = 0.08\,m$$

$$L_c = 6.5\,cm = 0.065\,m$$

$$m_2 \approx 0.41\,kg$$

e viene sparato tramite un cannone ad aria compressa con una velocità iniziale di:

$$V_{2i} \approx \begin{cases} 7\,\dfrac{m}{s} & [E_k = 10\,J] \\ 22\,\dfrac{m}{s} & [E_k = 100\,J] \end{cases}$$

Il secondo proiettile, cilindrico e con naso semisferico, fermo e strumentato, presenta invece le seguenti caratteristiche fisiche:

$$R = 0.01\,m$$

$$L = 0.17\, m$$

$$L_c = 0.16\, m$$

$$m_1 \approx 0.408\, kg$$

$$V_{1i} = 0\, m/s$$

Entrambi i proiettili sono realizzati in acciaio generico:

$$\rho_i = 7850\, kg/m^3$$

$$E_i = 2.0x10^{11}Pa = 2.0x10^{11}N/m^2$$

$$\nu_i = 0.29$$

$$\sigma_y = 350\, MPa = 3.5\, x10^8 Pa$$

$$\sigma_r = 420\, MPa = 4.2\, x10^8 Pa$$

$$Allungamento\ percentuale\ a\ rottura = 15\%$$

Si ricorda che la massa m_1 è, in realtà, data dalla massa effettiva del proiettile strumentato sommata a quella della cella di carico installata, così come la massa m_2 è data dalla somma della massa del proiettile non strumentato più quella dell'adattatore che permette di inserirlo nella canna del cannone. In entrambi i casi, però, si considerano questi componenti trascurabili in quanto non sono stati presi in considerazione neanche nell'analisi FEM.

$$m_1 = m_{proiettile} + m_{cella} \approx m_{proiettile}$$

$$m_2 = m_{proiettile} + m_{adatt} \approx m_{proiettile}$$

Si ottiene, come visto in precedenza, un urto elastico con conservazione sia di quantità di moto che di energia e, di conseguenza, in teoria il proiettile non strumentato impattando si arresta e trasferisce tutta la sua velocità V_{2i} a quello strumentato ($V_{1f} = V_{2i}$).

Si suppone che non sia presente nessun tipo di attrito in quanto l'impatto avviene non appena il proiettile non strumentato giunge al fondo della canna del cannone; il proiettile strumentato, invece, è inserito in una guida, che tuttavia presenta al suo interno un cuscinetto che ne annulla l'attrito.

Il proiettile strumentato dopo l'urto raggiunge il target con velocità V:

$$V = V_{1f} = V_{2i} \approx \begin{cases} 7\,\dfrac{m}{s} & [E_k = 10\,J] \\ 22\,\dfrac{m}{s} & [E_k = 100\,J] \end{cases}$$

Queste sono le velocità che verranno prese in considerazione nel modello di impatto di Zener.

Prima di tutto, si calcola tramite il software Matlab la rigidezza alla base della legge di contatto Hertziana; successivamente, sempre tramite Matlab, viene risolto il sistema adimensionale riportato in precedenza tramite un risolutore ODE45 e il codice generato è visibile nell'appendice I. Una volta trovati i valori adimensionali, si può ricavare e plottare nel tempo il valore dimensionale della forza di contatto per le due diverse velocità, rispettivamente 7m/s e 22m/s:

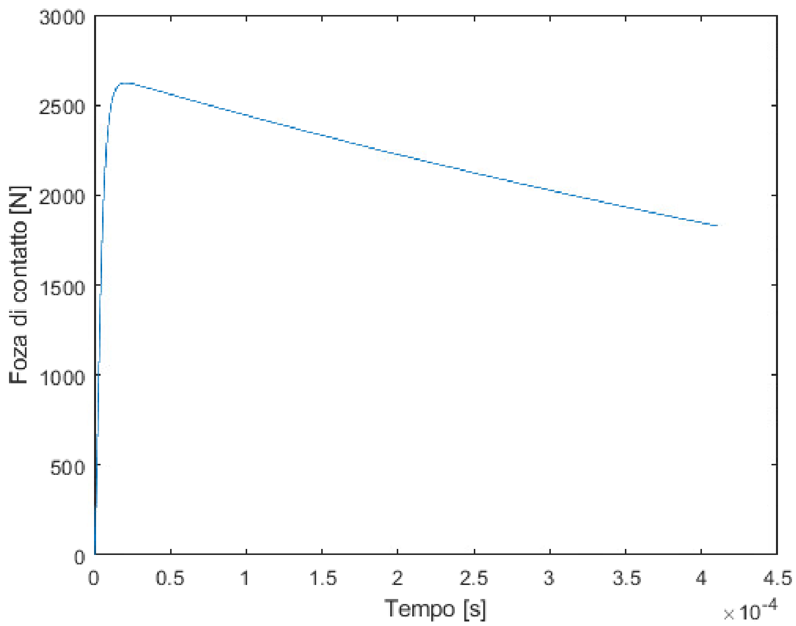


Figura 5.1 Valore della forza di contatto ottenuto tramite il modello di Zener per una velocità di 7 m/s

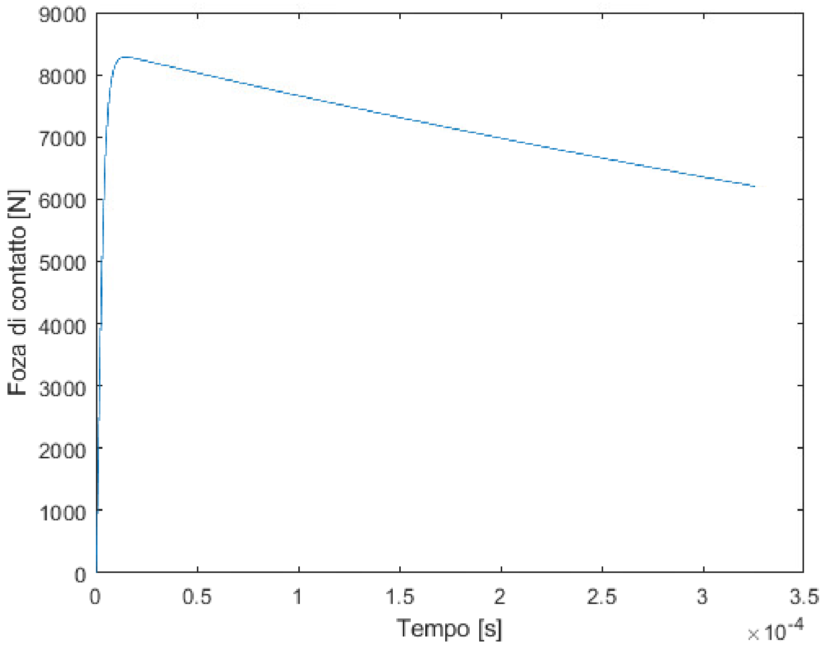


Figura 5.2 Valore della forza di contatto ottenuto tramite il modello di Zener per una velocità di 22 m/s

Come si può notare, i due grafici raggiungono molto rapidamente il valore di forza massima per poi decrescere molto lentamente nel tempo. Questo avviene in quanto più aumenta il valore di λ, più la curva risulta bassa e asimmetrica, con il valore massimo della forza di contatto spostato nella parte sinistra; nel caso in esame, il valore di λ è abbastanza alto, $\lambda \approx 26$, e questo spiega la forma particolare del grafico. La curva continua a decrescere nel tempo, ma il grafico è stato interrotto prima per permettere di visualizzare meglio il picco iniziale.

Come ci si aspettava, il modello di Zener riesce all'incirca a cogliere il valore generale della forza di contatto ottenuta con l'utilizzo dei solutori FEM: si ricorda che è comunque estremante semplificato, motivo per cui non si può riuscire ad ottenere un andamento complesso come quello delle simulazioni.

6 Metodi di misura della forza di contatto in letteratura

Si è già parlato dell'importanza di affiancare prove sperimentali alle analisi tramite software ad elementi finiti quando si vuole studiare in maniera approfondita l'impatto e questo è evidente dalla grande mole di lavoro svolto in quest'area e dalla quantità di tecniche diverse sviluppate negli anni. Sebbene sia abbastanza semplice riuscire a misurare la massima deflessione e l'eventuale danno o rottura del target a seguito di un esperimento di impatto, risulta tuttavia molto complicato misurare la quantità di forza di contatto che si genera nella zona limitrofa al punto di contatto senza interferire con l'impatto stesso. Tale misurazione è generalmente realizzata tramite celle di carico posizionate davanti al target, cosa che può provocare danni allo strumento in seguito a test ripetitivi, oppure dietro il target, ottenendo in questo modo solo la forza di reazione invece della forza di contatto. Lo scopo di questa sezione, quindi, è quello di fornire una panoramica di alcuni metodi di misurazione della forza di contatto reperibili in letteratura utilizzati o studiati fino ad ora e delle problematiche ad essi associati.

6.1 Trasduttore dinamico di misurazione della forza

Il primo metodo che viene riportato [26] consiste in un trasduttore dinamico di misurazione della forza (FMT) personalizzato, mostrato nella figura 6.1, il quale è stato utilizzato per misurare la forza generata dall'impatto di un chicco di grandine simulato con una sfera; questo sistema è stato utilizzando in combinazione con la fotografia su pellicola ad alta velocità per osservare il comportamento cinematico del ghiaccio durante l'evento. Il componente chiave è un trasduttore di forza dinamico ad anello, posizionato tra una piastra in titanio e una piastra in acciaio; viene serrato un dado sul perno in Nylon, in modo da applicare un precarico di compressione e far sì che durante l'urto i singoli componenti del sistema non oscillino, perdendo contatto tra di loro.

Questa tecnica è efficace nel caso in cui sia necessaria una calibrazione, in quanto permette di conoscere la forza che si ottiene se si spara un certo proiettile a una data velocità. Il target che si considera, però, è strumentato e non reale: il calcolo potrebbe non essere corretto perché potrebbe presentare una differenza in termini di rigidezza.

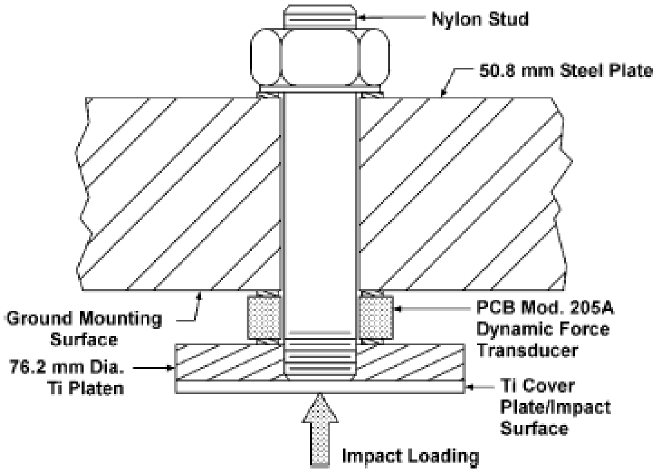


Figura 6.1 Trasduttore di misurazione della forza (FMT) montato sul target. Da "Hyonny Kima et al., Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels".

6.2 Proiettile con cristallo piezoelettrico

Viene di seguito riportato un secondo metodo [27], nel quale il sistema di misurazione della forza è costituito da un cristallo piezoelettrico e da una massa inerziale. Il cristallo si presenta come un disco di quarzo, il quale viene inserito tra la base del proiettile e la massa inerziale, ovvero un disco di acciaio fissato con colla conduttiva. Per conferire una maggiore resistenza e durata, il cristallo e la parte inferiore della massa sono ricoperti con resina epossidica.

Non appena la punta del proiettile tocca il bersaglio e il proiettile inizia quindi a decelerare, la massa inerziale inizia ad esercitare una forza sul cristallo, producendo in questo modo una carica che genera una tensione proporzionale alla forza di impatto, la quale viene registrata tramite un oscilloscopio.

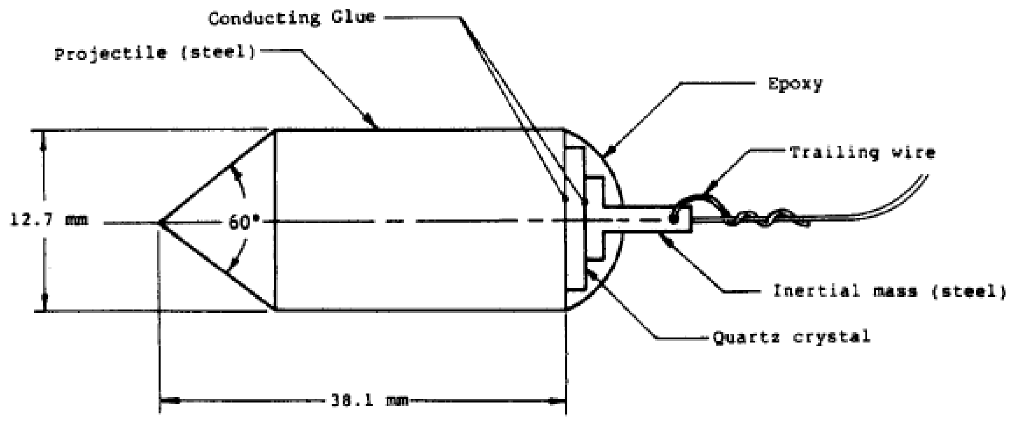


Figura 6.2 Schema del proiettile strumentato.
Da "S.P. Virostek et al., Direct Force Measurement in normal and oblique impact of plates by projectiles".

Il concetto alla base di questo metodo è molto simile a quello che verrà in parte utilizzato in questo lavoro di tesi, seppur con una cella di carico strumentata commerciale. Tuttavia, con le alte velocità e quindi le alte energie coinvolte nella misurazione, sia la cella di carico che i cablaggi collegati ad essa risentono di sollecitazioni troppo elevate che potrebbero portare in primo luogo a una rottura del sistema stesso e in secondo luogo a risultati non attendibili.

6.3 Enhanced Laser Velocity System (ELVS)

L'ELVS [2] consente la misurazione continua dello spostamento del proiettile prima e durante un evento di impatto.

Si faccia riferimento alla figura 6.3. Un laser a diodi (1) emette un foglio di luce laser che diverge sia nel piano orizzontale che in quello verticale, passando poi attraverso due lenti piano-cilindriche, la prima delle quali (2) collima il foglio sul piano orizzontale e la seconda (5) sul piano verticale. Tra le due lenti sono posizionate un'apertura (3) e un filtro (4), utili rispettivamente a bloccare i bordi del foglio e a ridurne l'intensità complessiva, in modo da ottenere un foglio di luce laser con larghezza, spessore e intensità uniformi. Questo foglio viene poi focalizzato tramite una lente collettrice convessa simmetrica (6) su un fotorilevatore PIN di silicio (7), il quale legge l'intensità del foglio laser, che viene quindi registrata come tensione tramite un oscilloscopio. Tutti questi componenti sono montati su una guida ottica per consentire un allineamento ottimale.

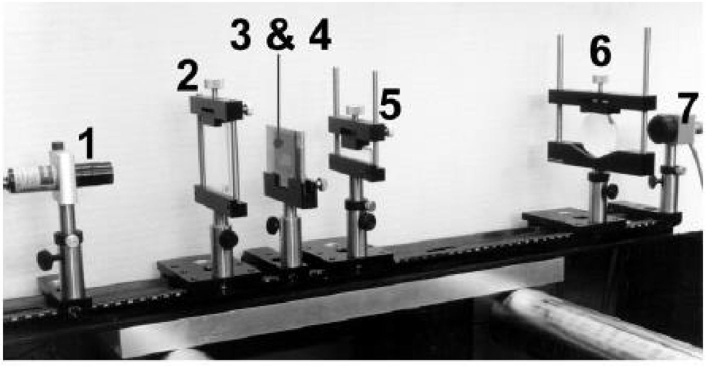


Figura 6.3 I componenti dell'Enhanced Laser Velocity System (ELVS).
Da "Darlene Starratt et al., An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments".

Il principio di base del metodo è mostrato nella figura 6.4, dove è visibile il movimento del proiettile, e nella figura 6.5, che riporta la curva tensione-tempo di un test di impatto effettivo.

- Quando il proiettile si trova all'esterno del foglio (fino alla posizione A), l'oscilloscopio mostra la massima tensione, definita come intensità luminosa massima.
- Quando il proiettile si sposta da A a B, inizia a bloccare il foglio e l'intensità diminuisce proporzionalmente alla quantità di luce bloccata; la tensione minima, definita come intensità luminosa minima, si ottiene quando la lastra è completamente bloccata.
- Poiché il proiettile è più lungo del foglio in questo caso, continua a bloccarlo totalmente fino a C, ovvero il punto in cui la base del proiettile raggiunge la parte anteriore del foglio: in questo periodo l'intensità del foglio rimane costante al valore minimo.
- Segue un aumento dell'intensità del foglio e quindi della tensione corrispondente quando il proiettile esce, ovvero da C ad E.
- La posizione D è il punto in cui si verifica l'impatto.

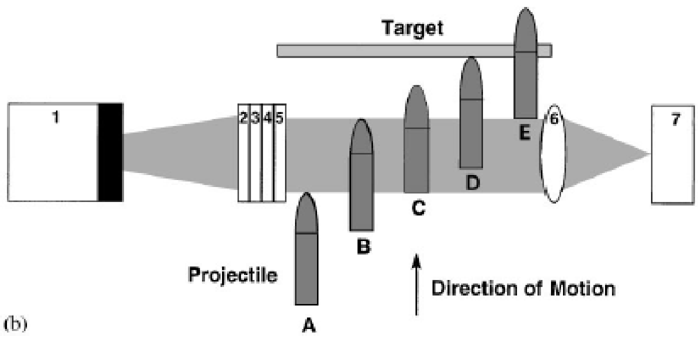


Figura 6.4 Moto del proiettile all'interno dell'ELVS.
Da "Darlene Starratt et al., An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments".

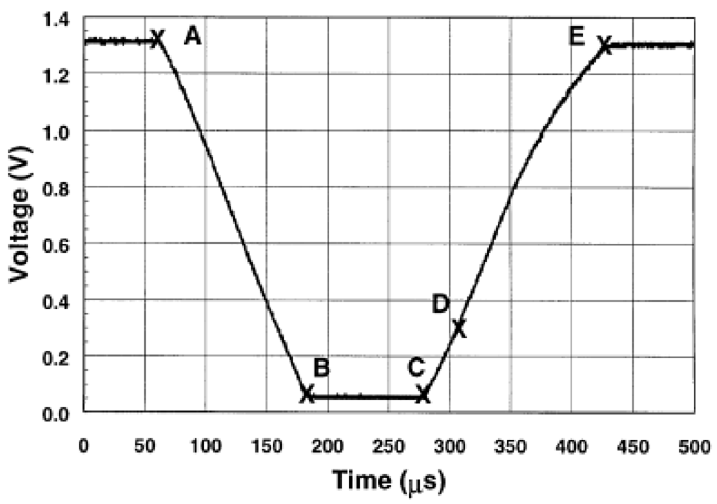


Figura 6.5 Curva tensione-tempo di un test di impatto effettivo su un target in composito. Da "Darlene Starratt et al., An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments".

Per convertire le misurazioni di tensione nei corrispondenti valori di spostamento, bisogna eseguire una calibrazione, ovvero una serie di test senza target, per trovare la relazione tensione-spostamento. Una volta ottenuto l'andamento dello spostamento, è possibile determinare la velocità e quindi calcolare i valori di accelerazione e quindi forza ed energia.

L'ELVS è un sistema ottimale, in quanto permette di ottenere il valore dello spostamento del proiettile e, di conseguenza, della forza di impatto continuamente durante tutto l'intervallo temporale e anche in caso di velocità molto elevate del proiettile; richiede tuttavia l'uso di diversi componenti specifici per riuscire ad effettuare la misurazione.

6.4 Dispositivo tubolare

Per il calcolo della forza di contatto a seguito di un impatto è stato costruito [8] anche un dispositivo all'interno del quale è stato simulato realisticamente il modello fisico della massa concentrata collegata alla molla, in modo da poter desumere la time history della forza di contatto a partire dall'andamento nel tempo dello spostamento di tale massa. La forza di contatto F_c, infatti, può essere espressa come la somma della forza di reazione F_r, calcolata a partire dalla retrazione della molla posteriore, e della forza di inerzia F_i generata all'interno del target, calcolata tramite le accelerazioni dell'oggetto stesso:

$$F_c(t) = F_i(t) + F_r(t) = m_2\ddot{x}_2(t) + k_2x_2(t)$$

Utilizzando l'apparato in figura 6.6, è stato dimostrato che la maggior parte della forza di contatto è legata alla forza di inerzia del target, mentre il contributo della forza di reazione risulta molto minore.

Sono stati condotti esperimenti sia a velocità molto modeste, utilizzando un dispositivo a tubo di caduta, sia a velocità decisamente maggiori tramite una pistola a gas. Al sistema sono stati affiancati un sensore di velocità per misurare la velocità incidente dell'impattatore, un sensore laser per misurare lo spostamento del target e un accelerometro per misurare l'accelerazione della massa concentrata fittizia. Questo sistema, in ogni caso, risulta molto utile per confermare l'applicabilità del modello massa-molla, ma non è utilizzabile per simulazioni realistiche di eventi di impatto.

Figura 6.6 A sinistra, il dispositivo a tubo di caduta e a destra la pistola a gas.
Da "J Sun et al., Estimating and measuring impact forces by projectiles".

7 Descrizione dell’esperimento

Nelle prove di laboratorio non è stato utilizzato nessuno dei metodi sopra descritti in quanto tutti, anche se per motivi diversi, risultavano incompatibili con gli scopi di questo lavoro di tesi. Come già accennato nei capitoli precedenti, si è pensato di utilizzare una semplice cella di carico montata quanto più vicino possibile al naso del proiettile per calcolare la forza di impatto con il target, risolvendo i problemi relativi ai cablaggi tramite un doppio impatto. Il proiettile strumentato, infatti, non è lo stesso che fuoriesce dal cannone, ma si utilizza un secondo proiettile non strumentato che, appena fuori dalla canna, impatta con il primo e lo mette in moto.

In questo capitolo verranno descritti nel dettaglio gli strumenti utilizzati per le prove sperimentali, come queste si sono svolte e quali risultati hanno permesso di ottenere. Verrà poi fatto un confronto con i valori ricavati tramite le simulazioni.

7.1 Il cannone ad aria compressa

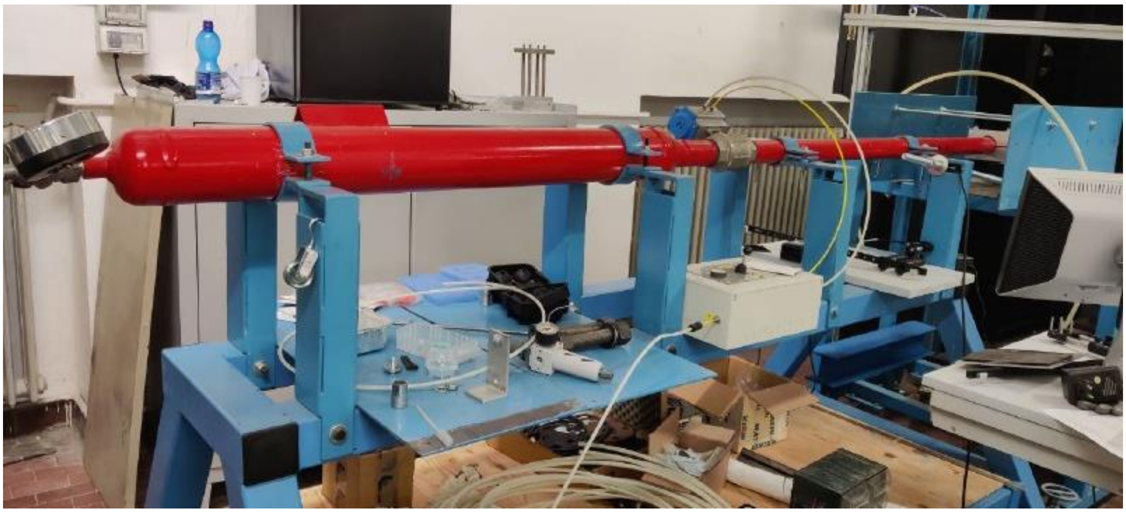


Figura 7.1 Il cannone ad aria compressa utilizzato per le prove sperimentali

Il cannone ad aria compressa, come si può vedere anche nella figura 7.1, è formato da due parti, ovvero il serbatoio e la canna, connesse tra di loro tramite una valvola, l’apertura e chiusura della quale può essere o comandata manualmente oppure impostata automaticamente tramite un timer. Essa viene tenuta sempre chiusa e viene aperta per pochi istanti nel momento dello sparo per permettere la fuoriuscita dell’aria dal serbatoio.

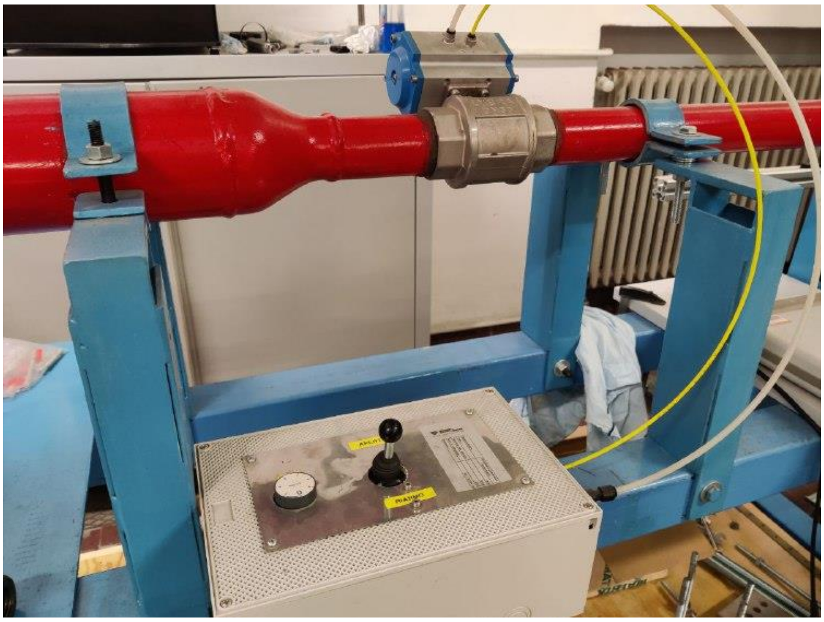


Figura 7.2 La valvola che separa il serbatoio dalla canna e il suo dispositivo di apertura-chiusura

Il serbatoio, a sua volta, viene controllato tramite due manopole, una più grossolana e l'altra di precisione, che permettono di scegliere la pressione del gas, il valore della quale viene visualizzato sia un manometro analogico posto vicino alle manopole sia su uno digitale. In questo modo, modificando la pressione del gas, è possibile modificare molto facilmente la velocità del proiettile in uscita.

Figura 7.3 Le manopole per il controllo della pressione e il manometro analogico

Figura 7.4 Il manometro digitale

7.2 I proiettili

I proiettili utilizzati nella prova sperimentale sono stati già ampiamente descritti, tanto per la geometria quanto per il materiale, nei capitoli precedenti. Di seguito viene riportata la loro rappresentazione con le dimensioni che li caratterizzato. Si noti in primo luogo come sia il naso che il corpo del proiettile più lungo presentino dei fori filettati che permettono l'installazione della cella di carico tramite un perno filettato alle estremità. Proprio per questo motivo è stato necessario montare la cella ad una distanza dal naso maggiore rispetto a quanto visto in precedenza, ovvero ad una distanza di 30 mm, poiché l'ingombro del perno non poteva essere ignorato.

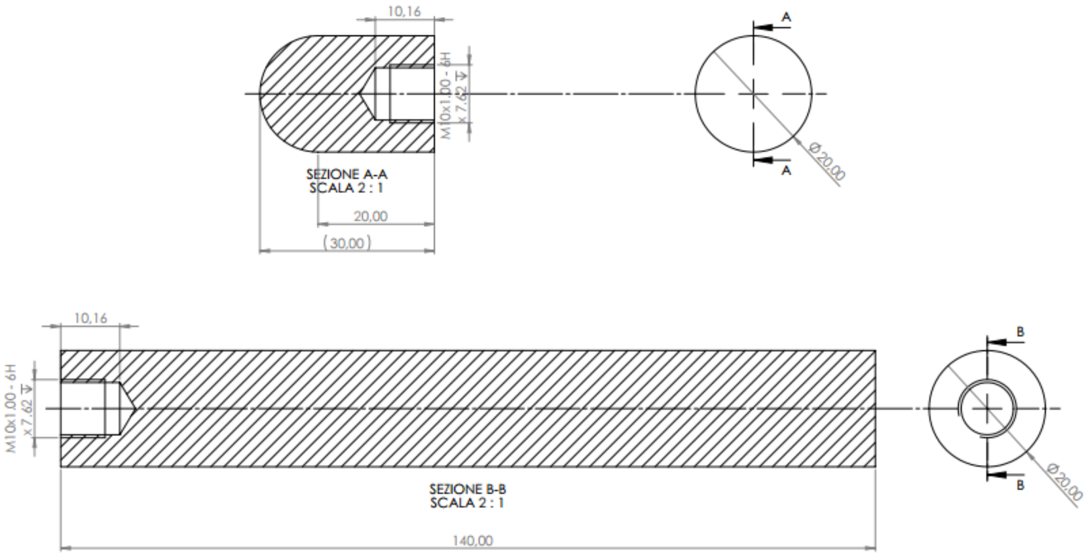


Figura 7.5 Il proiettile strumentato

In secondo luogo, per quanto riguarda il proiettile più corto, presenta anch’esso una filettatura, ma alla base; essa è stata creata per l’inserimento di ulteriori masse che permettano di aumentare in maniera più agevole e semplice la massa complessiva del proiettile, senza doverne modificare la geometria.

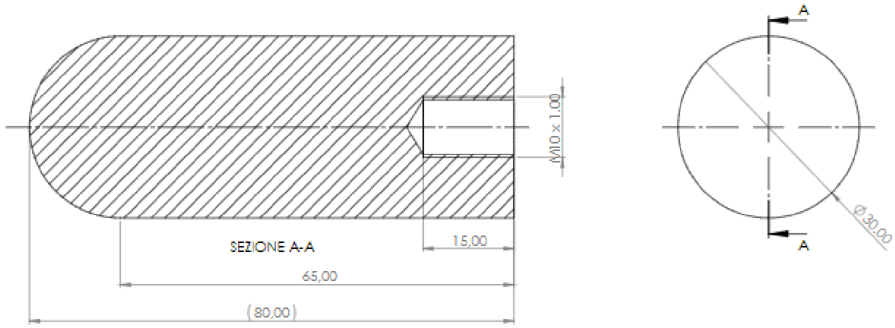


Figura 7.6 Il proiettile non strumentato

Oltre ai due proiettili in acciaio, viene riportato anche il disegno dell’adattatore o sabot in Delrin, che è stato prodotto per poter inserire in maniera adeguata il secondo proiettile, con diametro 30mm, all’interno della canna del cannone, con diametro 48mm.

Figura 7.7 Il sabot per il proiettile non strumentato

Tale materiale è stato scelto in quanto è molto leggero, cosa che permette di non modificare eccessivamente la massa del proiettile: si ricordi, infatti, che questa influenza notevolmente la quantità di energia che viene scambiata nell’urto tra i due. Questa massa aggiuntiva viene bilanciata abbastanza bene da quella data dalla somma della cella di carico e tutti gli altri componenti necessari alla sua installazione sul primo proiettile.

Figura 7.8 Foto dei due proiettili utilizzati per le prove sperimentali

7.3 Il target

Il target scelto per le prove sperimentali è una piastra quadrata in AISI 316 di spessore 0.002 m e lato 0.30 m, che è stata appoggiata come mostrato in figura 7.9: nel confronto finale, bisognerà considerare il fatto che le dimensioni sono le stesse rispetto al target della simulazione numerica, ma la geometria non è circolare. Avvenendo, però, l'impatto abbastanza distante dai bordi, questo non dovrebbe generare una grande differenza nei risultati finali di forza di impatto.

Figura 7.9 Il target utilizzato per le prove sperimentali

7.4 La cella di carico

La cella di carico che viene utilizzata in laboratorio durante il test di impatto è il modello M203B della PCB Piezotronics [28][29], che è un anello di forza piezoelettrico al quarzo, il quale emette un segnale quando sottoposto a una forza di compressione. Possedendo una grandissima rigidezza e un'elevata precisione, risulta ideale per misurare eventi di durata di microsecondi; l'elemento sensibile presente al suo interno è il quarzo, che è uno dei materiali piezoelettrici più stabili disponibili e con una rigidità dieci volte superiore a quella dell'acciaio. Tramite questi cristalli piezoelettrici, il sensore genera una carica elettrostatica interna, ma incorpora anche un amplificatore microelettronico MOSFET integrato, il quale converte l'uscita di carica in un segnale di tensione per l'analisi o la registrazione.

Figura 7.10 Cella di carico M203B della PCB Piezotronics [31]

Il sensore, infatti, è sempre collegato anche ad un dispositivo di lettura. Questo circuito interno, tuttavia, richiede di alimentare il sensore tramite un condizionatore di segnale. Per il collegamento viene utilizzato un cavo coassiale standard: un'estremità del cavo deve essere collegata al connettore del sensore e l'altra estremità all'ingresso sul condizionatore di segnale. Nella figura 7.11 sotto sono riportati tutti i componenti appena descritti fondamentali per il funzionamento del sensore di forza. Le forze di compressione producono un'uscita di tensione positiva, mentre quelle di trazione un'uscita in tensione con andamento negativo.

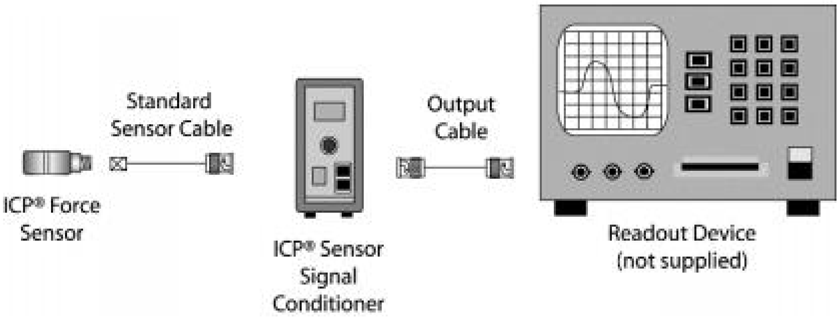


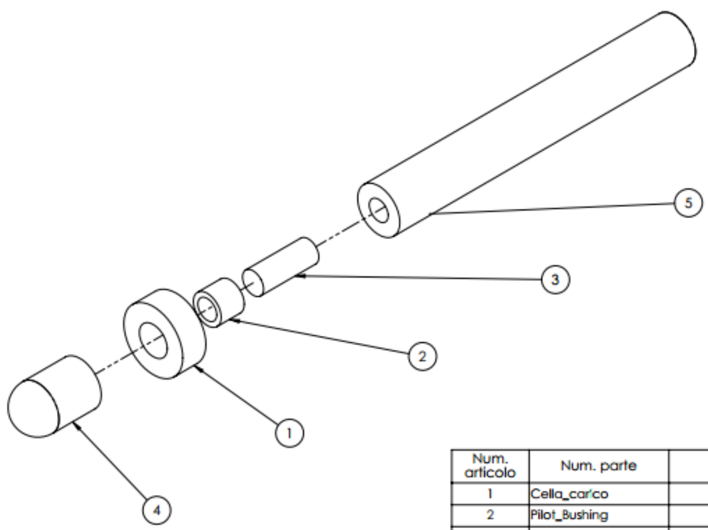
Figura 7.11 Componenti indispensabili per il funzionamento della cella di carico [30]

Ogni sensore viene calibrato dal NIST (National Institute of Standards and Technology) seguendo le linee guida accettate dall’ANSI (American National Standards Institute) e dall’ISA (Instrument Society of America). Questa calibrazione avviene utilizzando un perno di montaggio in rame berillio (BeCU) fornito da PCB; nel caso in cui il sensore venga installato senza il perno di montaggio o con un perno di materiale più rigido, la sensibilità del sensore (mV/lb) potrebbe essere leggermente diversa.

Per quanto riguarda l’installazione, oltre al perno che consente la trasmissione della forza al sensore mantenendolo in posizione, è necessaria anche una boccola pilota, che serve per centrare il sensore sul perno di montaggio, e una rondella antiattrito per evitare che ci siano danneggiamenti non voluti durante l’impatto. È importante che la superficie su cui è montato il sensore sia perfettamente piana per evitare la flessione, che potrebbe generare dati errati. Durante l'installazione, bisogna precaricare il sensore della quantità specificata nella documentazione di riferimento, utilizzando il perno in dotazione: in questo modo si garantisce che il sensore funzioni come calibrato.

Figura 7.12 Componenti per il montaggio della cella di carico.
In ordine, rondella antiattrito, perno di montaggio e boccola pilota. [31]

Nella figura 7.13 viene riportato un esploso che permette di comprendere meglio il montaggio di questi componenti sul proiettile.



Num. articolo	Num. parte	Descrizione	Quantit
1	Cella_carico		1
2	Pilot_Bushing		1
3	Mounting_Stud		1
4	Bullet1_naso		1
5	Bullet1_coda		1

Figura 7.13 Esploso del proiettile strumentato

7.5 Altra strumentazione

Fanno parte della strumentazione utilizzata per le prove sperimentali anche due oscilloscopi, due foto rilevatori e un generatore laser.

L'oscilloscopio digitale è uno strumento che misura le onde di tensione creandone una rappresentazione grafica, mostrando il tempo sull'asse X e la tensione sull'asse Y. Nel momento in cui la tensione cambia, vuol dire che si è verificato un certo evento, mentre se la linea rimane orizzontale vuol dire che non ci sono stati cambiamenti in quel periodo di tempo. Nel caso in esame, vengono utilizzati due oscilloscopi, connessi tramite appositi cavi coassiali ai due foto rilevatori e alla cella di carico: quando il proiettile attraversa uno dei due laser, bloccandolo, la tensione corrispondente mostrata sull'oscilloscopio subisce un abbassamento. Conoscendo quindi la distanza tra i due foto rilevatori e il tempo impiegato dal proiettile per passare dall'uno all'altro, corrispondente al tempo che intercorre tra la discesa della prima curva e la discesa della seconda, è possibile conoscere la velocità di tale proiettile poco prima dell'impatto.

Per quanto riguarda la cella di carico, essa misura e trasmette all'oscilloscopio una tensione positiva proporzionale alla forza di impatto: il legame tra tensione e forza è dato dalla sensitività della cella, pari nel caso in esame a 56.2 mV/kN.

Figura 7.14 Uno degli oscilloscopi utilizzati nelle prove sperimentali.
L'altro richiede la connessione ad un computer.

Il generatore laser a quattro canali permette di generare e trasmettere tramite fibra ottica il laser anche ad una certa distanza, cosa davvero molto utile per avere la sorgente lontana dal punto di impatto. Regolando la corrente, è possibile scegliere la potenza del laser in uscita e si possono regolare anche la temperatura e la lunghezza d'onda.

Figura 7.15 Il generatore laser

Per la prova sperimentale, vengono utilizzati due dei quattro canali del generatore per portare il laser ai due fotodiodi posti ciascuno di fronte ad un fotorilevatore, come mostrato nella figura 7.17. I foto rilevatori utilizzati sono i modelli PDA36A-EC della ThorLabs, hanno un guadagno variabile in passi da 10dB e sono progettati per rilevare segnali luminosi che vanno da 400 a 1100 nm.

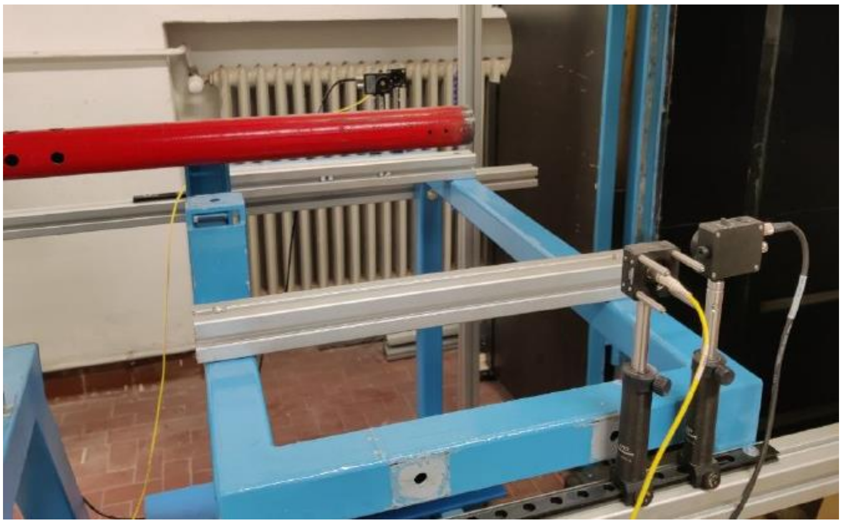


Figura 7.16 Sistema per l'acquisizione della velocità del proiettile

7.6 Preparazione ed esecuzione

Prima di tutto, sono stati pesati i proiettili per confrontare i due valori di masse totali ottenute tramite l'aggiunta di tutti i componenti già descritti sopra. La differenza tra i due si è rivelata assolutamente trascurabile: il proiettile più corto, con l'aggiunta del sabot, raggiunge un valore di 483 g, contro i circa 449.3 g del proiettile lungo con cella di carico, perno e boccola.

In secondo luogo, è stato necessario preparare il cannone, montando tutta la strumentazione necessaria, ovvero collegando il generatore laser ai fotodiodi e i foto rilevatori all'oscilloscopio, prestando molta attenziona a garantire il corretto allineamento, condizione necessaria per ottenere una buona misurazione.

È risultato poi fondamentale caratterizzare il proiettile non strumentato, ovvero valutare quale fosse la corretta pressione dell'aria per garantire il valore di velocità in uscita desiderato: il legame tra pressione e velocità, infatti, non è del tutto lineare, anche se a valori abbastanza bassi è approssimabile con una retta. È stato quindi sparato solamente il proiettile non strumentato, ponendo all'estremità della canna un blocco per fermarlo prima dell'uscita. L'oscilloscopio ha permesso di ottenere il valore del tempo intercorso tra la caduta di tensione relativa al momento in cui il proiettile è passato davanti al primo fotodiodo e quella relativa al secondo fotodiodo; conoscendo la distanza tra i due, ovvero 50mm, e dividendola per il tempo di cui sopra, è stato possibile conoscere la velocità ad un dato valore di pressione.

In particolare, per ottenere una velocità pari a quelle delle simulazioni, ovvero 10m/s, è necessario impostare una pressione di 0.5 bar.

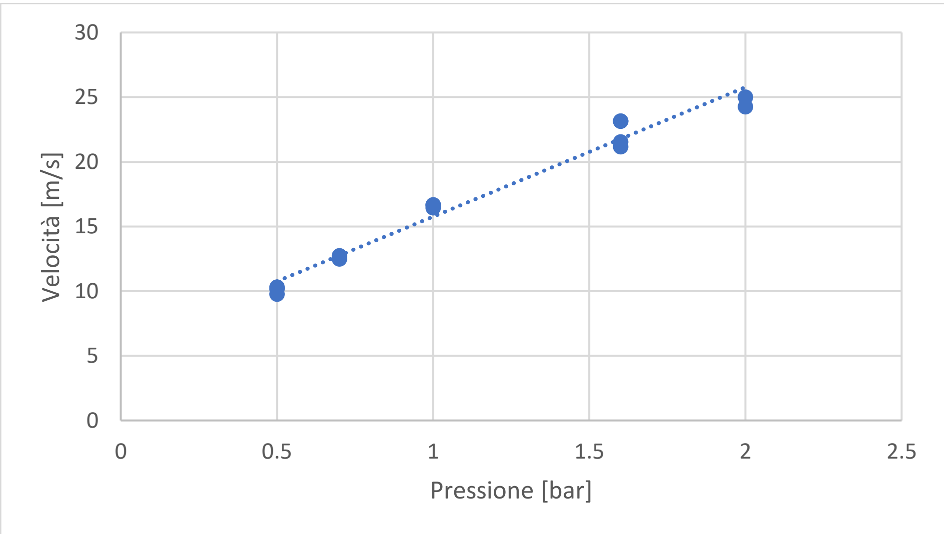


Figura 7.17 Velocità raggiunta dal proiettile ad un dato valore di pressione del cannone

Per procedere con le misure, bisogna preparare il proiettile strumentato: per farlo è necessario connettere la cella di carico all'oscilloscopio e serrare il perno in modo da applicare un precarico di 4000lb (17793kN), corrispondenti a 1V, come indicato nella documentazione di riferimento. Questo serraggio è stato compiuto manualmente, cosa che ha portato a notevoli difficoltà nel raggiungimento del valore necessario.

Essendo il modello delle simulazioni decisamente semplificato rispetto alla realtà si è deciso, prima di prove cedere al test definitivo, di realizzare delle prove in assenza di target per studiare solamente l'urto tra i due proiettili e valutare l'energia che viene effettivamente persa. Il primo proiettile è quello non strumentato, che è già stato caratterizzato in precedenza, mentre il secondo è un proiettile molto simile sia in forma che in massa a quello che verrà poi equipaggiato con la cella di carico e verrà utilizzato per le prove finali. Con una pressione di 0.5 bar e quindi una velocità di 10m/s per il proiettile in canna, si riesce effettivamente ad ottenere una velocità di circa 7m/s per l'altro, esattamente come era stato calcolato con le simulazioni ad elementi finiti.

Per i test finali, la configurazione del sistema è stata quella riportata in figura 7.18. Come si può notare, i foto rilevatori sono stati posizionati molto vicini al target, in modo da riuscire a rilevare la velocità nell'istante immediatamente precedente all'impatto; la distanza tra i due laser è pari a 0.049m. Il proiettile strumentato è stato posizionato in corrispondenza della fine della canna e inserito all'interno di una guida, in modo che il suo asse fosse perfettamente allineato con quello della canna e del proiettile sparato e l'impatto avvenisse al centro del target; il tutto è stato poi bloccato per evitare movimenti indesiderati, che avrebbero reso inattendibili i valori misurati dalla cella di carico. La distanza tra il naso del proiettile strumentato e il target è stata calcolata in modo da evitare la fuoriuscita dalla guida, cosa che avrebbe potuto provocare una rottura dei cavi connessi alla cella, ma dando al proiettile il tempo sufficiente a stabilizzare la sua velocità dopo l'urto.

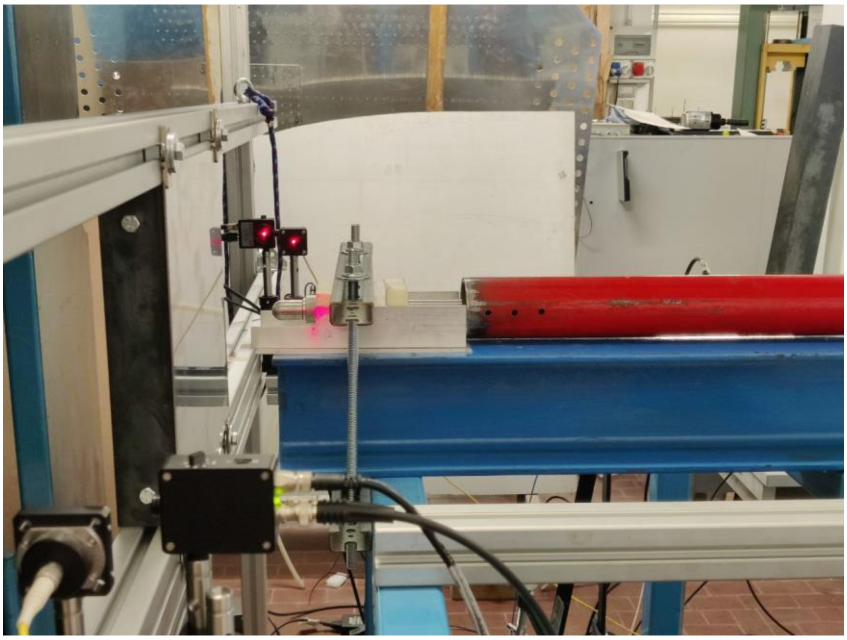


Figura 7.18 Configurazione finale del sistema

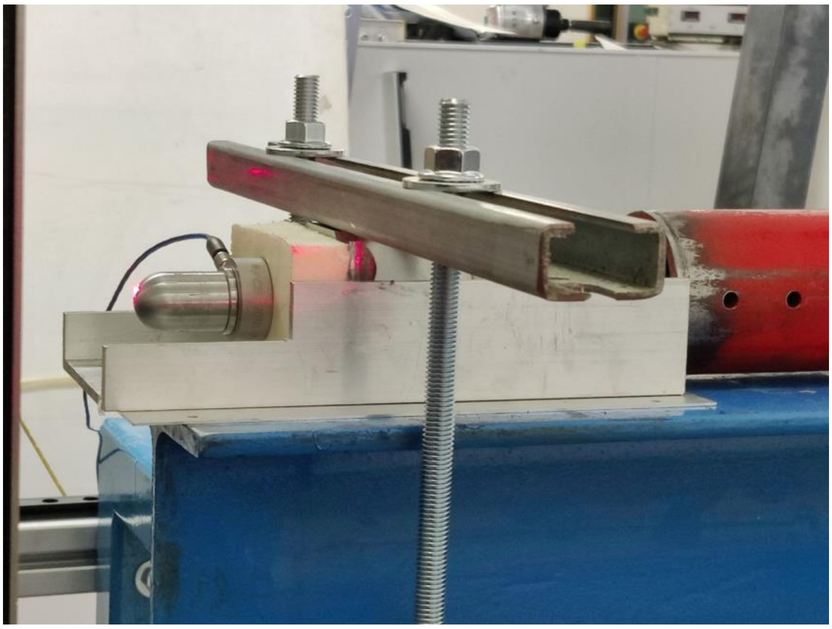


Figura 7.19 Dettaglio del proiettile nella configurazione finale

Dopo aver inserito il proiettile non strumentato con il sabot all'interno della canna, è stata impostata la giusta pressione dell'aria, pari a 0.5 bar, ed è stato effettuato lo sparo aprendo la valvola. Sono stati quindi registrati sia i dati relativi alla forza che quelli relativi alla velocità, visualizzati sugli oscilloscopi, prima di procedere con i successivi spari, sempre allo stesso valore di pressione e nelle stesse identiche condizioni, in modo che fossero confrontabili tra di loro.

Nei capitoli successivi di questa tesi sono riportati l'analisi dei dati ottenuti dalle prove sperimentali, il confronto con quelli ricavati dalle simulazioni e tutte le considerazioni finali, con qualche accenno ai possibili miglioramenti del sistema e alle possibili applicazioni future.

8 Risultati delle prove sperimentali e confronto con quelli delle simulazioni

Per poter confrontare la forza rilevata dalla cella di carico con quella calcolata su Abaqus, è necessario realizzare una nuova simulazione modificando la massa dei proiettili per considerare la presenza di tutti i componenti, quali sabot, cella di carico, perno, boccola e rondella inseriti nella realtà. Non essendo possibile modificare la geometria, in quanto i corpi sono sempre analizzati utilizzando elementi assialsimmetrici bidimensionali, bisogna modificare la densità dei materiali per ottenere la massa desiderata. In secondo luogo, la velocità d'impatto viene aumentata fino ad un valore di 8.2 m/s e nelle prossime pagine verrà spiegato il motivo.

Nelle figure 8.1 e 8.2 vengono riportati i valori di forza, non corretti e corretti, ottenuti nella zona dove è stata effettivamente montata la cella di carico, ovvero ad una distanza di 0.03m dal naso del proiettile.

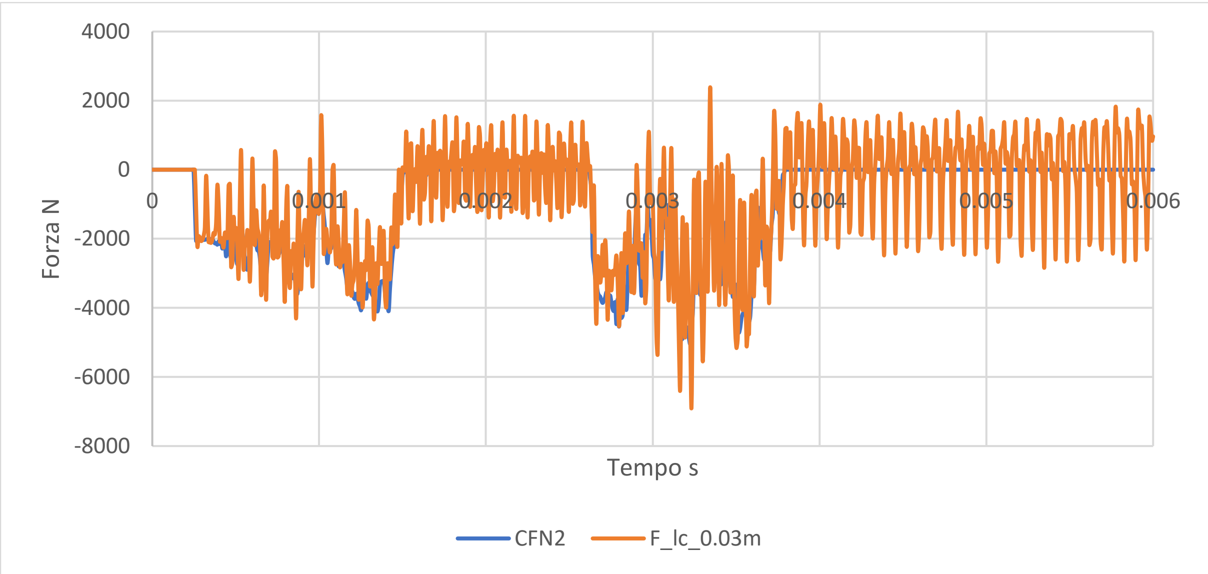


Figura 8.1 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc nella sezione a 0.03m, ovvero la posizione effettiva della cella di carico

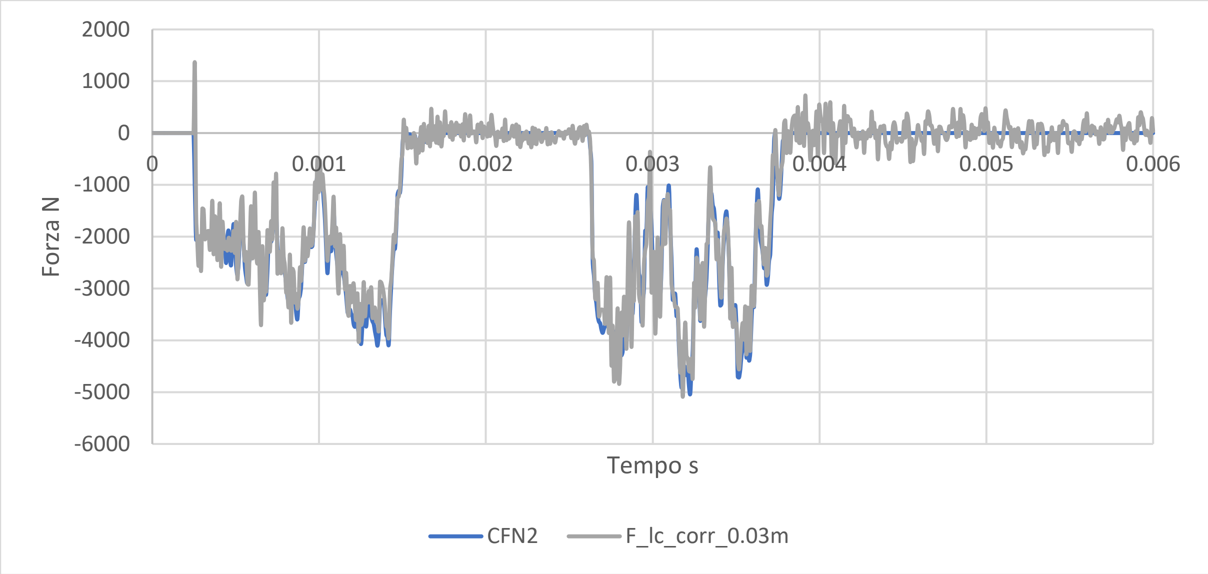


Figura 8.2 Confronto tra la forza di contatto CFN2 e la forza F_lc corretta tramite inerzia nella sezione a 0.03m, ovvero la posizione effettiva della cella di carico

I dati ottenuti dai diversi test di impatto, realizzati tutti nelle stesse condizioni, risultano molto simili tra di loro: si considerino quindi i valori riportati come indicativi dei risultati generali raggiunti. Nella figura 8.3, si può osservare l'andamento della tensione nel tempo rilevata dai due foto rilevatori, collegati uno al canale A e l'altro al canale B dell'oscilloscopio: conoscendo la distanza tra i due, ovvero circa 0.049m, e il tempo trascorso tra le due cadute di tensione, ovvero circa 0.006s, si può calcolare la velocità del proiettile poco prima dell'impatto come:

$$V = \frac{d_{fotodiodi}}{t_{cadute\_tensione}} \approx 8.17\; m/s$$

Come si può notare, la velocità di impatto risulta leggermente superiore al valore desiderato e calcolato tramite le simulazioni numeriche precedenti, che dovrebbe essere di circa 7m/s. Probabilmente, è la conseguenza della massa leggermente inferiore che il proiettile strumentato presenta rispetto all'altro proiettile oppure della diversa geometria rispetto al proiettile utilizzato per le prove di urto o potrebbe essere legato a fenomeni che sono presenti nella realtà e non sono stati simulati, come ad esempio aspetti legati all'attrito del sabot nella canna o del proiettile strumentato nella guida, oppure potrebbe dipendere dall'impossibilità di controllare la pressione in maniera particolarmente precisa. In ogni caso, questo è il motivo per cui è stato necessario aumentare la velocità nell'ultima simulazione realizzata su Abaqus.

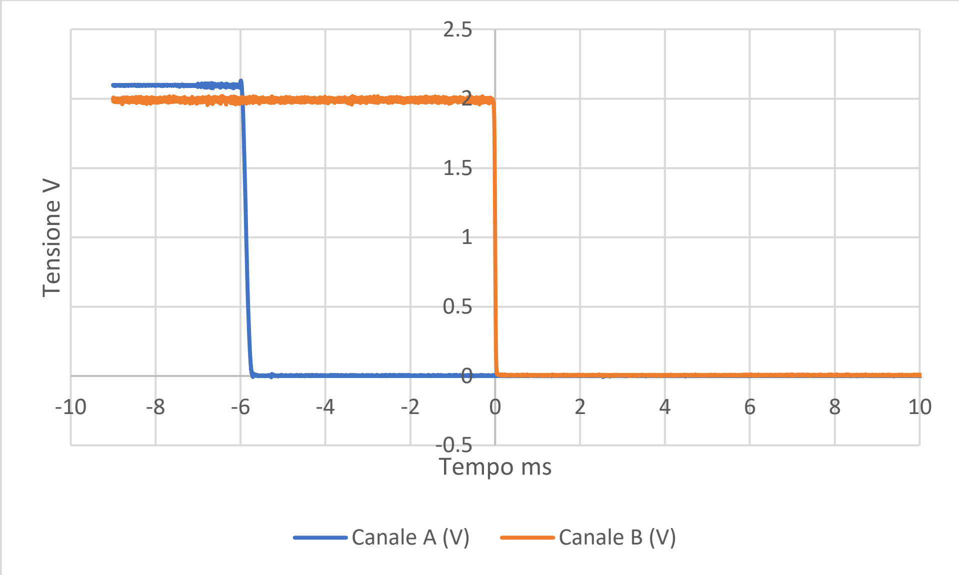


Figura 8.3 Andamento della tensione nel tempo rilevata dai due foto rilevatori, collegati uno al canale A e l'altro al canale B

Il canale C, invece, è legato all'andamento della tensione nel tempo calcolata dalla cella di carico durante l'impatto, che risulta essere positiva perché si hanno fenomeni di compressione. Nella figura 8.4 è stato isolato l'intervallo temporale dell'impatto tra proiettile e target, in quanto è quello che interessa nel caso in analisi. Si noti come siano presenti dei valori molto più grandi o più piccoli rispetto all'andamento generale: questi non devono essere considerati perché derivano da errori di funzionamento della cella di carico.

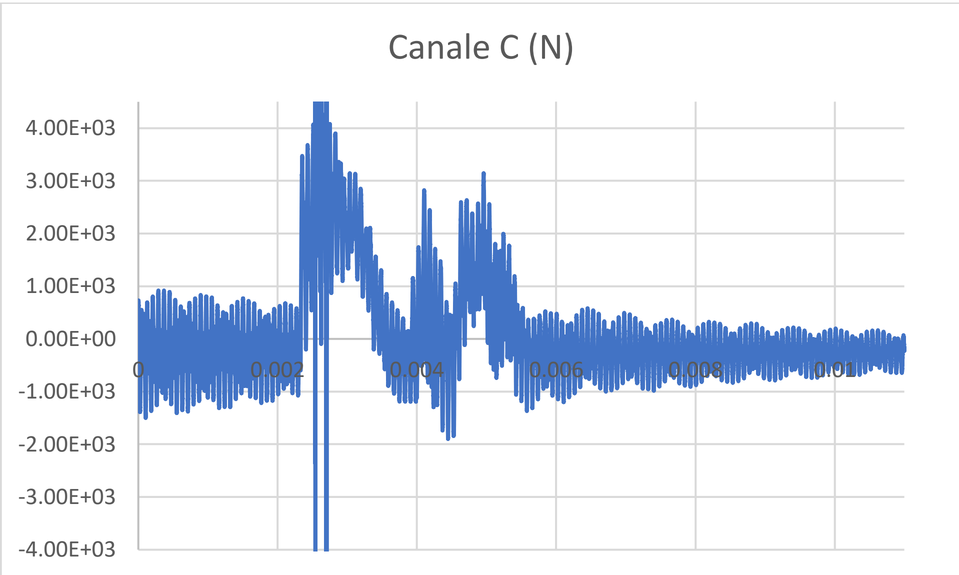


Figura 8.4 Andamento della tensione nel tempo calcolato dalla cella di carico, collegata al canale C

La curva in figura 8.4 viene quindi specchiata, per permettere il confronto con quella delle simulazioni che, essendo in compressione, presenta valori negativi, e viene successivamente filtrata tramite un codice Matlab; la curva della simulazione numerica corretta tramite inerzia, invece, viene traslata in avanti nel tempo in modo che l'istante iniziale dell'impatto coincida nei due casi considerati. Le curve finali sono riportate in figura 8.5 e possono essere facilmente confrontate.

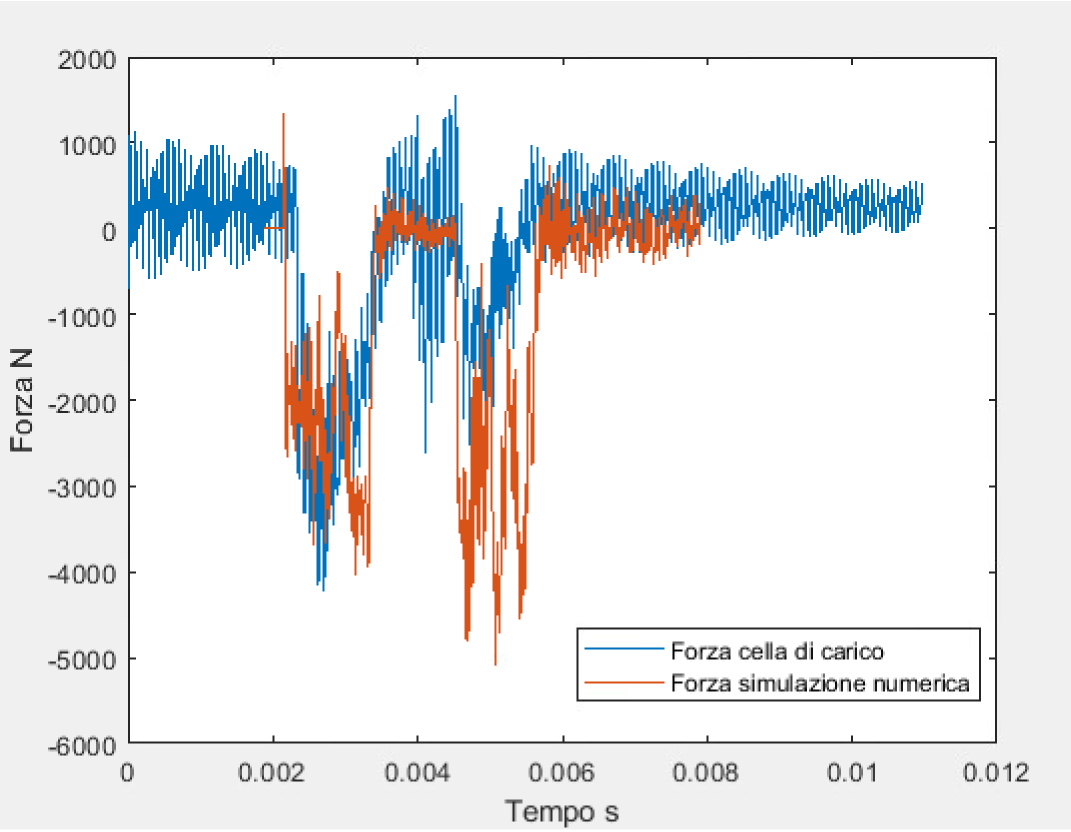


Figura 8.5 Confronto tra la forza calcolata dalla cella di carico durante le prove sperimentali e quella calcolata tramite le simulazioni numeriche su Abaqus CAE

Essendo stati utilizzati degli elementi assialsimmetrici bidimensionali per poter ridurre i tempi di calcolo ed essendo state compiute una serie di semplificazioni, a partire dal modello del materiale, si spiega facilmente perché le due curve non possano essere totalmente sovrapposte. Nonostante questo, i tempi corrispondenti al primo impatto e al rimbalzo coincidono completamente, così come gli ordini di grandezza dei valori ottenuti, che nel caso del primo impatto risultano quasi identici.

Si prova a realizzare la correzione inerziale anche nel caso della curva sperimentale; non avendo a disposizione l'andamento dell'accelerazione nel tempo, in quanto non sono stati utilizzati accelerometri, si può calcolare un valore medio come la variazione di velocità diviso il tempo dell'impatto [30]:

$$a = \frac{dv}{t_{pulse}}$$

Se si assume, semplificando, un rimbalzo perfetto, la velocità iniziale e finale presentano lo stesso valore assoluto, ma sono opposte in direzione. Quindi si può scrivere che:

$$a = \frac{v_i - v_f}{t_{pulse}} = 2 \cdot \frac{v_{impatto}}{t_{pulse}}$$

E si può utilizzare questa accelerazione, moltiplicata per la massa della sezione compresa tra naso e cella di carico, per ottenere il valore della forza inerziale correttiva e quindi la curva riportata in figura 8.6. Come si può notare, essa risulta leggermente più bassa rispetto a quella non corretta e quindi ancora più simile a quella ottenuta tramite le simulazioni. Se si potesse registrare con dei sensori un valore di accelerazione non costante e semplificato, ma preciso e variabile in ogni istante temporale, sicuramente la correzione risulterebbe più efficace e non porterebbe solamente ad una traslazione della curva.

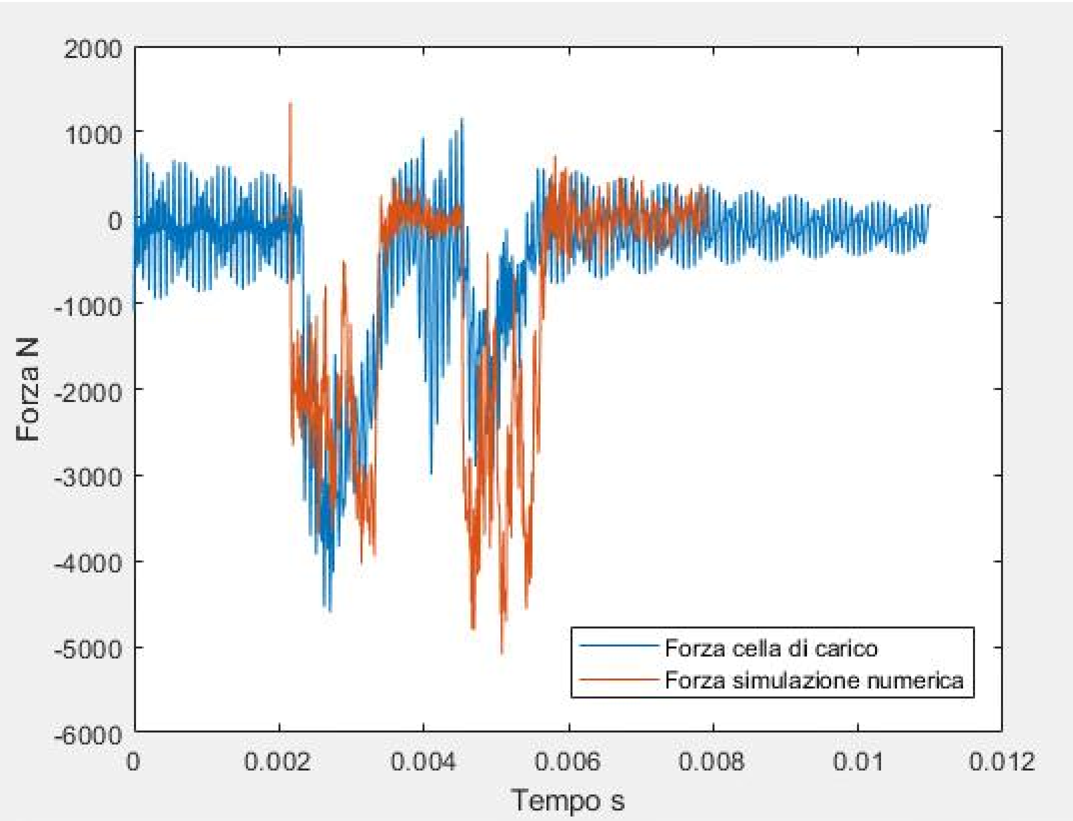


Figura 8.6 Confronto tra la forza calcolata dalla cella di carico durante le prove sperimentali corretta con l'inerzia e quella calcolata tramite le simulazioni numeriche su Abaqus CAE

9 Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era dimostrare che fosse possibile, utilizzando una cella di carico posta non sul corpo impattato ma su quello impattante, calcolare la forza che si genera durante l'impatto tra un target ed un proiettile, messo in moto a velocità abbastanza elevate da un dispositivo ad aria compressa. Dati i costi e i tempi molto elevati connessi all'organizzazione di test sperimentali, sono state realizzate una serie di simulazioni dinamiche ad elementi finiti per essere certi di quale fosse la corretta posizione della cella di carico per riuscire a calcolare il valore corretto di forza di impatto. Si è deciso di non inserire il proiettile strumentato nella canna per evitare problemi legati ai cavi con cui la cella di carico viene connessa al dispositivo di acquisizione dei dati; si è quindi sparato un secondo proiettile non strumentato che, urtando il primo, ha trasferito l'energia necessaria per l'impatto con il target. Anche in questo caso è stato necessario realizzare delle simulazioni per capire quanta energia venisse persa durante l'urto e, soprattutto, in quale misura questo urto influenzasse la rilevazione della forza di contatto. Prima di realizzare le prove sperimentali indispensabili a confermare i risultati ottenuti tramite le simulazioni, è stato cercato in letteratura un modello che permettesse di ottenere in modo veloce ed immediato una forza di impatto comparabile con quella reale.

Si può affermare che lo scopo della tesi sia stato raggiunto e, in particolare, è doveroso fare le seguenti conclusioni:

- il modello bidimensionale assialsimmetrico permette di ottenere risultati abbastanza precisi con tempi di calcolo molto inferiori rispetto a quello tridimensionale;
- è meglio realizzare il proiettile che viene inserito in canna non piatto ma con naso semisferico per evitare che le oscillazioni generate dall'urto tra i due proiettili siano troppi evidenti e oscurino i valori dell'impatto con il target;
- se il proiettile strumentato è troppo corto si rischia di non riuscire a trovare una posizione in cui la misura della forza di impatto tramite cella di carico sia fedele alla realtà;
- la correzione inerziale è necessaria se nelle simulazioni si vuole ottenere, in qualsiasi zona del corpo del proiettile, un andamento della forza confrontabile con quello nel punto di impatto; questa correzione, tuttavia, non risulta indispensabile nel caso delle prove sperimentali, anche se riesce a migliorarne i risultati;
- durante le prove sperimentali, bisogna prestare molta attenzione all'energia cinetica che viene persa durante l'urto tra i due proiettili per assicurarsi che la velocità di impatto sia esattamente quella desiderata;
- la cella di carico deve essere posizionata il più vicino possibile al naso del proiettile;
- tra tutti i modelli disponibili in letteratura, quello di Zener sembra dare i migliori risultati nel caso in esame.

In futuro, potrebbe risultare utile riuscire a posizionare sul proiettile, oltre alla cella di carico, anche degli accelerometri che permettano una misura accurata dell'accelerazione in direzione del moto negli istanti dell'impatto, in modo da poter effettuare la correzione della forza di contatto in maniera molto più precisa rispetto a come fatto in questo lavoro di tesi. La figura 9.1 rappresenta in modo semplificato ma esplicativo come si potrebbe implementare questa idea: per esempio, si potrebbe pensare di inserire una flangia di acciaio o di alluminio sulla quale incollare gli accelerometri. In questo modo, dimensionando bene questa flangia, si riuscirebbe anche a compensare perfettamente la piccola differenza di massa tra i due proiettili.

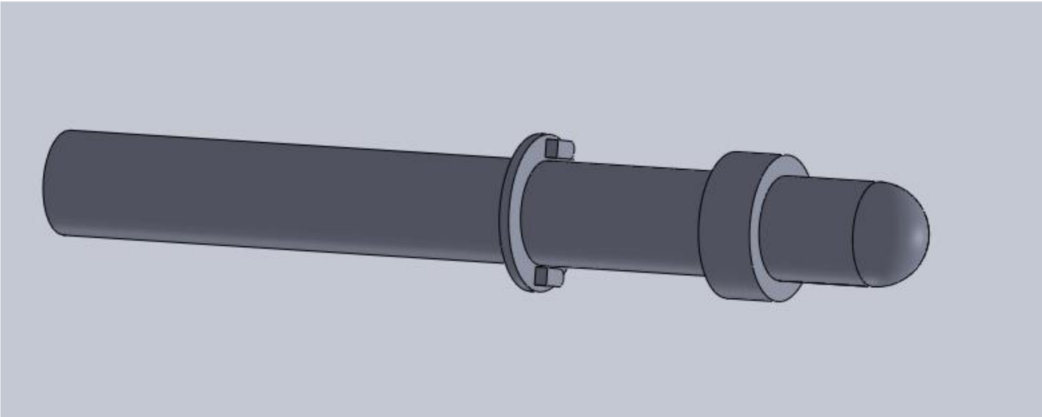


Figura 9.1 Possibile posizionamento degli accelerometri sul proiettile

Inoltre, potrebbe risultare vantaggioso anche realizzare il proiettile più lungo per semplificare il posizionamento durante le prove sperimentali, in relazione alle apparecchiature che si hanno a disposizione e alla loro posizione relativa, e inserire una scanalatura sul corpo del proiettile che renda più facile utilizzare gli strumenti giusti per precaricare la cella di carico.

Fondamentale sarebbe anche rendere le simulazioni numeriche più precise, passando dagli elementi bidimensionali a quelli tridimensionali, qualora si avessero a disposizione computer molto più potenti, modificando il modello del materiale, ad esempio utilizzando quello di Johnson-Cook qualora si riescano ad ottenere dei coefficienti precisi, o inserendo fenomeni come lo smorzamento o l'attrito.

In seguito, modificando la velocità di impatto, la forma e le dimensioni dei proiettili e il materiale del target, si potrebbe provare a capire fino a che punto risulti accurata la misurazione utilizzando questo approccio. In caso di grande accuratezza, si potrebbe pensare di utilizzarlo per studiare il comportamento all'impatto di qualsiasi componente innovativo o particolare, come ad esempio componenti prodotti in Additive Manufacturing o compositi, dove vengono variate la percentuale di matrice o rinforzo, oppure componenti danneggiati o corrosi: le possibilità di applicazione risultano potenzialmente infinite.

Appendice I - codice MATLAB per il modello di Zener

```
clear all
close all


%tspan rappresenta l'intervallo temporale adimensionale
%y0 è il vettore delle due condizioni al contorno adimensionali
%si usa il risolutore ODE45 con la funzione "zener"

a=0;
b=10;
n=10000;
tspan = linspace(a,b,n);
y0 = [0;1];
[tau,y]=ode45(@zener, tspan, y0);

%si ottengono i valori adimensionali di delta=wi-ws e la sua derivata

delta_ad=y(:,1);
deltadot_ad=y(:,2);

%si calcola la forza di contatto adimensionale

Fc_ad=(delta_ad).^(3/2);

h=0.001;  %h semispessore
rho_s=8000;
R_i=0.01;
Ei=2e11;
Es=1.93e11;
vi=0.28;
vs=0.30;
Ei_primo= Ei/(1-vi^2);
Es_primo= Es/(1-vs^2);
m_i=0.408;
v_0=7;
k_c=(4/3)*sqrt(R_i)*(Ei_primo*Es_primo)/(Ei_primo+Es_primo);
F=(k_c^2*(m_i*v_0^2)^3)^(1/5);

%si rende la forza di contatto dimensionale

Fc=Fc_ad.*F;

%si rende il tempo dimensionale

T=(m_i/(k_c*(v_0)^0.5))^(2/5);
t=tau.*T;

alfa=(((3*rho_s)/Es_primo)^0.5)/(16*rho_s*h^2);
lambda=(alfa*m_i)/T;

%si plotta il grafico della forza di contatto nel tempo

figure (1)
plot(t,Fc)
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Foza di contatto [N]')
```

```
function [dydt] = zener(t,y)

%si calcola lambda
```

```
h=0.001;   %h semispessore
rho_s=8000;
R_i=0.01;
Ei=2e11;
Es=1.93e11;
vi=0.28;
vs=0.30;
Ei_primo = Ei/(1-vi^2);
Es_primo = Es/(1-vs^2);
m_i=0.408;
v_0=7;
k_c=(4/3)*sqrt(R_i)*(Ei_primo*Es_primo)/(Ei_primo+Es_primo);
alfa=(((3*rho_s)/Es_primo)^0.5)/(16*rho_s*h^2);
T=(m_i/(k_c*(v_0)^0.5))^(2/5);
lambda=(alfa*m_i)/T;


%il sistema da risolvere è il seguente


dydt=zeros(size(y));

dydt(1)=y(2);
dydt(2)=-(y(1))^(3/2)-(3/2)*lambda*y(2)*(y(1))^(1/2);



end
```

Appendice II - valori di N1 ed N2 per varie forme di naso

In questa appendice si riportano le forme più comuni di naso dei proiettili, accompagnate dalle corrispondenti relazioni che esplicitano N1 ed N2 [20], valori legati all'approccio "cavity expansion". Bisogna prima di tutto definire un parametro adimensionale:

$$\psi = \frac{s}{d}$$

Per una forma di naso di tipo ogivale, le relazioni sono le seguenti:

$$N_1 = 1 + 4\mu_m \psi^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) - \frac{\sin 2\phi_0}{2} \right]$$

$$N_2 = N^* + \mu_m \psi^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0 \right) - \frac{1}{3} \left(2 \sin 2\phi_0 + \frac{\sin 4\phi_0}{4} \right) \right]$$

$$N^* = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2} \qquad 0 < N^* \leq \frac{1}{2}$$

$$\phi_0 = \sin^{-1}\left(1 - \frac{1}{2\psi}\right) \qquad dove\ \psi \geq \frac{1}{2}$$

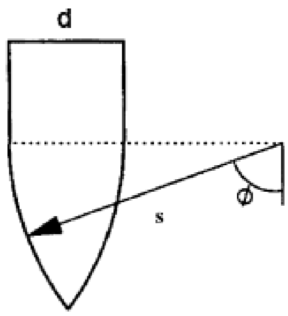


Figura 1 Forma del naso di tipo ogivale. Da "X.W. Chen et al., Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics"

Per un naso di tipo conico:

$$N_1 = 1 + 2\mu_m \psi$$

$$N_2 = N^* + \frac{2\mu_m \psi}{1 + 4\psi^2}$$

$$N^* = \frac{1}{1+4\psi^2} \qquad 0 < N^* \leq 1$$

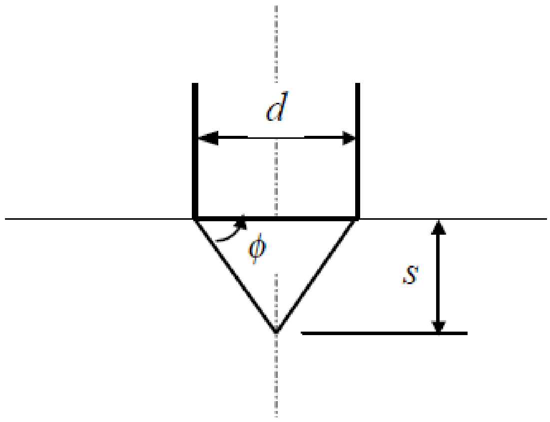


Figura 2 Forma del naso di tipo conica. Da "X.W. Chen et al., Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics"

Per un naso smussato:

$$N_1 = 1 + 2\mu_m\psi^2(2\phi_0 - \sin 2\phi_0)$$

$$N_2 = N^* + \mu_m\psi^2\left(\phi_0 - \frac{\sin 4\phi_0}{4}\right)$$

$$N^* = 1 - \frac{1}{8\psi^2} \qquad \frac{1}{2} \leq N^* \leq 1$$

$$\phi_0 = \sin^{-1}\left(\frac{1}{2\psi}\right) \qquad dove\ \psi \geq \frac{1}{2}$$

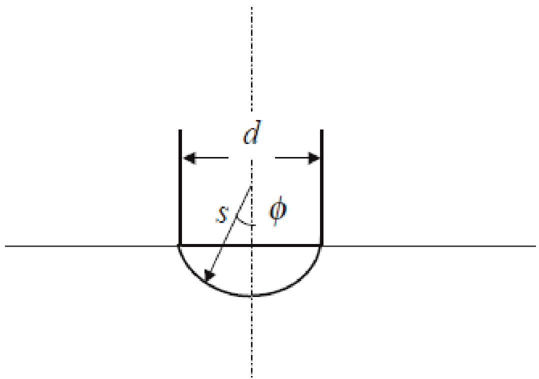


Figura 3 Naso smussato. Da "X.W. Chen et al., Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics"

Per un naso a ogiva troncato:

$$N_1 = 1 + 4\mu_m\psi^2\left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0\right) + \frac{\sin 2\phi_0}{2} - 2\left(1 - \frac{1}{2\psi}\right)\cos\phi_0\right]$$

$$N_2 = N^* + \mu_m\psi^2\left[\left(\frac{\pi}{2} - \phi_0\right) + \frac{\sin 4\phi_0}{4} - \frac{8}{3}\left(1 - \frac{1}{2\psi}\right)\cos^3\phi_0\right]$$

$$N^* = \psi^2\left[2\cos^4\phi_0 - \frac{8}{3}\left(1 - \frac{1}{2\psi}\right)(2 + \sin\phi_0)(1 - \sin\phi_0)^2\right] + \zeta^2$$

$$con\ \zeta = \frac{d_1}{d}$$

$$\phi_0 = \sin^{-1}\left[1 - \frac{1}{2\psi}(1 - \zeta)\right] \quad dove\ \psi \geq \frac{1}{2}$$

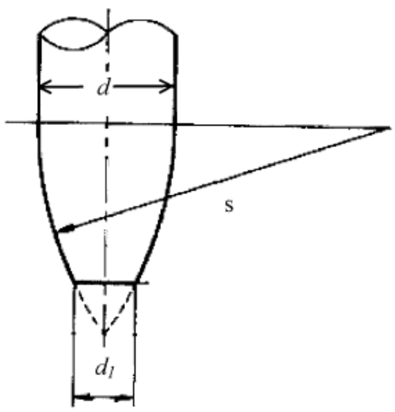


Figura 4 Forma del naso ad ogiva troncato. Da "X.W. Chen et al., Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics"

In particolare, N1=N2=N*=1 in caso di naso piatto.

In caso di naso semisferico:

$$N_1 = 1 + \frac{\mu_m\pi}{2}$$

$$N_2 = \frac{1}{2} + \frac{\mu_m\pi}{8}$$

$$N^* = \frac{1}{2}$$

In generale, il fattore N*(ψ) è compreso nel range $0 < N^* \leq 1$ e tanto più è piccolo, tanto più appuntito è il naso.

Bibliografia

[1] J. A. Zukas, 1980, Impact dynamics: theory and experiment. *Technical report ARBRL-TR-02271.*

[2] Darlene Starratt, Tim Sanders, Elvis Cepus, Anoush Poursartip, Reza Vaziri, 1998, An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments. *International Journal of Impact Engineering 24 (2000) 155-170.*

[3] Jonas A. Zukas, 2004, Dynamic Behavior of Materials and Structures. *Studies in Applied Mechanics, Volume 49: Introduction to Hydrocodes, Chap.1, pp 1-31.*

[4] Alessandro Tonazzo, 2012, Problemi di impatto in ingegneria: applicazione al caso dell'impatto di ruote d'automobile. Tesi di Laurea, Università degli studi di Padova, Padova, Italia.

[5] Davide LUMASSI, Roberto PISONI, 2010, Analisi delle condizioni di impatto balistico su un componente elicotteristico. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, Italia.

[6] Shihara Perera, 2017, Modelling Impact Actions of Flying and Falling Objects. *Ph.D. dissertation, The University of Melbourne, Melbourne, Australia*

[7] Marvin E. Backman and Werner Goldsmith, The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int. J. Engng Sci., 1978, Vol.16, pp 1-99.*

[8] J Sun, N TK Lam, L H. Zhang, E Gad and D Ruan, 2014, Estimating and measuring impact forces by projectiles. *ST Smith (ed.), 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), vol. II, Byron Bay, NSW, 9-12 December, Southern Cross University, Lismore, NSW, pp. 1051-1056.*

[9] *MatWeb: Material Property Data*, http://www.matweb.com/

[10] Abaqus/CAE User's Manual

[11] Ahmed Elkaseer, Ali Abdelaziz, Mohammed Saber and Ahmed Nassef, 2019, FEM-Based Study of Precision Hard Turning of Stainless Steel 316L. *Materials, Vol. 12, 2019.*

[12] Daryl L. Logan, 2007, Axisymmetric Elements. *A First Course in the Finite Element Method, Chap. 9, pp. 412-442.*

[13] PCB Piezotronics website, https://www.pcb.com/

[14] P.Mazzoldi, M.Nigro, C.Voci, 1998, Urti tra due punti materiali. *Fisica, Volume 1, II edizione, Chap.4, pp 147-160.*

[15] Ugo Galvanetto e Samuele Boscolo Forcola, 2015, Simulazione del danneggiamento di strutture aeronautiche dovuto ad impatti con volatili. *Tesi di Laurea, Università degli studi di Padova, Padova, Italia.*

[16] K. N. Shivakumar, W. Elber and W. Illg, 1983, Prediction of impact force and duration during low velocity impact on circular composite laminates. *NASA Technical Memorandum 85703.*

[17] Marco Gherlone, 2001, Low Velocity Impacts on Beams: a Survey and a Comparison between Simplified and Detailed Models. *Report N° 204.*

[18] Clarence Zener, 1941, The Intrinsic Inelasticity of Large Plates. *Physical Review, Vol. 59, April 15, 1941.*

[19] Robin Olsson, 1992, Impact Response of Orthotropic Composite Plates Predicted from a One-Parameter Differential Equation. *AIAA JOURNAL Vol. 30, No. 6, June 1992.*

[20] X.W. Chen, Q.M. Li, 2000-2001, Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics. *International Journal of Impact Engineering 27 (2002) 619 – 637.*

[21] Gabi Ben-Dor, Anatoly Dubinsky, Tov Elperin, 2013, Analytical engineering models of high speed normal impact by hard projectiles on metal shields. *Central European Journal of Engineering, 3(3), 2013, 349-373.*

[22] Forrestal MJ, Frew DJ, Hickerson JP, Rohwer TA. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. *Int J Impact Eng 2003;28(5):479e97*

[23] Frew DJ, Forrestal MJ, Cargile JD. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. *Int J Impact Eng 2006;32(6):584e94.*

[24] Rosenberg Z. Dekel E. The penetration of rigid long rods - revisited. *Int J Impact Eng 2009;36(4):551e64*

[25] Forrestal MJ, Altman BS, Cargile JD, Hanchak SJ. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *Int J Impact Eng 1994;15(4):395–405.*

[26] Hyonny Kima, Douglas A. Welch, Keith T. Kedward, 2002, Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels. *Composites: Part A 34 (2003) 25–41.*

[27] S.P. Virostek, J. Dual and W.Goldsmith, 1987, Direct Force Measurement in normal and oblique impact of plates by projectiles. *Int. J. Impact Engng Vol. 6, No. 4, pp. 247-269, 1987*

[28] PCB Piezotronics, Model M203B, ICP® quartz force ring, Installation and Operating Manual

[29] PCB Piezotronics, Sensors for research & development, Piezoelectric Force Rings

[30] PCB Piezotronics, Impact and drop testing with ICP® force sensors