

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Aeronautica



**ANALISI D'IMPATTO VERTICALE DI ELICOTTERI
CON TECNICHE NUMERICHE IBRIDE**

Relatore: Prof. Alessandro AIROLDI

Co-relatore: Ing. Benedetta CACCHIONE

Tesi di Laurea di:

Marco TOGNOLI Matr.682448

Anno Accademico 2009- 2010

Indice Generale

SOMMARIO.....	3
1. Modellazione di scenari di impatto di elicottero con tecniche ibride.....	3
1.1. Sicurezza passiva degli elicotteri	3
1.2. Tipi di atterraggio e normative.....	5
1.3. Modellazione del sedile e del manichino antropomorfo	6
1.4. Tecniche di modellazione dei sottopavimento	10
1.5. Obiettivi del lavoro di tesi.....	14
2. Modello di una configurazione di impatto.....	15
2.1. Configurazione e modellazione del sottopavimento	15
2.2. Messa a punto del modello di manichino antropomorfo per impatti verticali ...	16
2.3. Triplicazione del modello di manichino	23
2.4. Descrizione del modello d'assieme.....	25
3. Analisi di impatto della configurazione completa.....	27
3.1. Scelta iniziale dei parametri degli assorbitori	27
3.2. Sensitività alla variazione dei parametri	32
3.3. Indagine sull'effetto della velocità di impatto	39
4. Modellazione del carrello di atterraggio.....	43
4.1. Carrello anti-crash.....	43
4.2. Modello multi-corpo carrello	44
4.3. Prove di collaudo del modello.....	51
5. Analisi di impatto con carrelli anti-crash estesi.....	62
5.1. Connessione fra il carrello e il sottopavimento.....	62
5.2. Risultati numerici	67
6. Conclusioni e sviluppi futuri.....	72
Ringraziamenti	73
Bibliografia.....	74

SOMMARIO

Il lavoro di tesi è stato svolto nell'ambito della sicurezza passiva di elicotteri sviluppando, con il codice di calcolo Abaqus/Explicit, un modello multi corpo in grado di simulare un atterraggio in condizioni di *crash* nella configurazione di impatto verticale. Attraverso l'utilizzo, l'adattamento ed il miglioramento di una serie di modelli a disposizione, di manichino antropomorfo, sedile e sottopavimento, e sviluppando un semplice modello di carrello d'atterraggio specificatamente progettato per atterraggi in condizioni di *crash*, è stato eseguito uno studio di sensitività sulla variazione di parametri significativi al fine di permettere la sopravvivenza degli occupanti del velivolo. La configurazione finale permette di ricreare in maniera abbastanza fedele una condizione realistica di atterraggio a *crash* permettendo di considerare ed analizzare il comportamento di tutti i componenti che, nell'ambito della sicurezza passiva d'elicotteri, permettono un assorbimento di energia.

1. Modellazione di scenari di impatto di elicottero con tecniche ibride

1.1. Sicurezza passiva degli elicotteri

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

Gli assorbitori di energia possono essere realizzati sfruttando la deformazione plastica di elementi metallici che possiedano adeguata duttilità. In Fig.1 si riporta lo schema funzionale di una struttura sviluppata secondo gli attuali concetti di resistenza passiva.

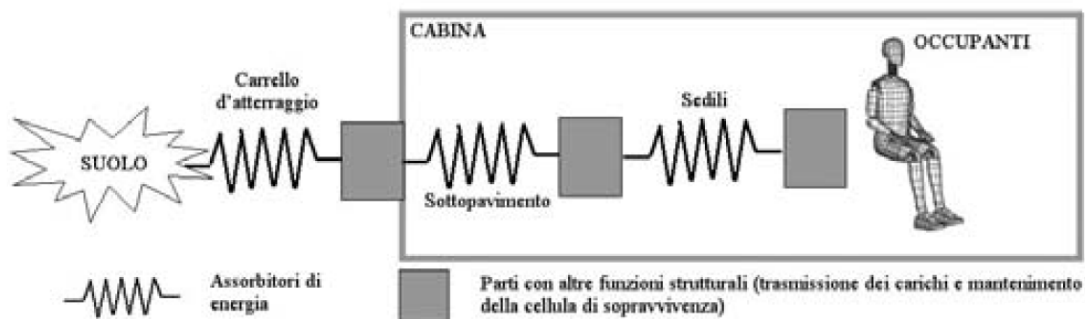


Figura 1
Schema funzionale di una struttura d'elicottero con caratteristiche di Sicurezza Passiva

Sebbene le normative civili si limitino a regolamentare i soli sedili, che devono superare prove particolarmente severe per la certificazione, si può osservare come l'introduzione delle caratteristiche di sicurezza passiva abbia potenziale influenza su numerose parti strutturali. Il corretto funzionamento dei sottosistemi di assorbimento di energia, infatti, prevede che la struttura nella quale essi sono installati sia in grado di trasmettere i carichi di impatto con sollecitazioni che possono risultare molte volte superiori rispetto ai carichi di progetto in normali condizioni operative. La trasmissione dei carichi ed il mantenimento della cellula di sopravvivenza comportano quindi la realizzazione di parti strutturali con grande resistenza a rottura e tenacità a frattura. Le precedenti osservazioni possono essere esemplificate dall'esame della risposta strutturale di un elicottero completo in condizioni di *crash*, che, pur non essendo prescritta da alcuna normativa, è stata indagata in alcuni programmi di ricerca. La Fig.2 riporta l'esito di una prova su un Bell UH-1D, elicottero di vecchia concezione progettato precedentemente allo sviluppo dei criteri e delle filosofie di progetto per la realizzazione di strutture con caratteristiche di sicurezza passiva. La prova, eseguita presso il Centro Italiana Ricerche Aerospaziali di Capua nell'ambito del progetto Europeo Helisafe TA, è stata effettuata installando sull'elicottero sedili progettati secondo la normativa corrente. Il risultato mette in evidenza come l'intera struttura dell'elicottero contribuisca a determinare la risposta in condizioni di impatto. La sollecitazione trasmessa ai sedili è stata certamente influenzata dal comportamento del carrello e del pavimento, ma è intuibile come altri fenomeni, quali il distacco della coda e il cedimento della parte superiore della cabina, abbiano significativamente contribuito a determinare i livelli di sollecitazione trasmessi ai sedili e quindi agli occupanti.



Figura 2
Impatto in condizioni di crash di una struttura d'elicottero.

Le annotazioni riportate in Fig. 2 si riferiscono ai punti dove è possibile intervenire, migliorando le caratteristiche di assorbimento di energia o la resistenza all'impatto, per incrementare le caratteristiche di sicurezza passiva. A tale scopo un ruolo fondamentale va comunque svolto dai sistemi di assorbimento di energia da installarsi nei carrelli e, soprattutto, nei sottopavimenti, che possono essere realizzati mediante elementi in parete sottile in lega leggera d'alluminio.

1.2. Tipi di atterraggio e normative

L'atterraggio di un velivolo è un evento caratteristico della sua normale vita operativa. Il carrello d'atterraggio, in particolare, è l'organo strutturale cui è demandato l'assorbimento dell'energia di caduta e la limitazione delle sollecitazioni sulla struttura e gli occupanti del velivolo.

Le normative aeronautiche civili, specificamente la norma FAR29, prevedono, per un velivolo ad ala rotante, tre tipologie di atterraggi:

Normal Landing: condizione di atterraggio limite in cui gli sforzi e le deformazioni che si generano nella struttura del carrello e dell'elicottero non devono oltrepassare il limite elastico dei materiali di cui sono costituiti.

Hard Landing: le strutture possono essere soggette a sforzi oltre il limite dello snervamento ed ammettono quindi deformazioni plastiche. Si possono manifestare danneggiamenti in generale, ma per il carrello non si può avere il collasso definitivo e per il resto della struttura non si può avere alcuna perdita di capacità funzionale.

Crash Landing: è un atterraggio in condizioni di supervelocità; la struttura del velivolo deve possedere caratteristiche di sicurezza passiva tali da garantire la limitazione di accelerazioni sugli occupanti dell'abitacolo e tali da conservare l'integrità strutturale complessiva.

In quest'ultimo caso, nell'ambito delle normative civili, il soddisfacimento dei requisiti di sicurezza passiva deve essere verificato senza considerare il contributo dei carrelli se questi sono retrattili.

Le normative vigenti in ambito militare, in particolare la MIL-STD-1290 che riguarda gli elicotteri militari poi sostituita dalla JSSG-2010-7, analogamente alle civili, classificano l'atterraggio secondo le tre precedenti classi; nell'atterraggio limite e pesante i requisiti imposti al carrello ed al resto della struttura sono i medesimi dettati dalla FAR29.

nell'atterraggio in condizioni d'urto, caratterizzato da una velocità massima di 12,8 m/s, i requisiti dettati sono riassunti nei seguenti punti:

- la struttura della fusoliera deve essere abbastanza rigida e resistente da permettere un volume sufficiente alla sopravvivenza dei passeggeri
- le masse sospese (organi di trasmissione, rotore e motore) non devono invadere la cabina; è inoltre necessario evitare la presenza di oggetti taglienti e di spigoli e non devono innescarsi incendi
- il carrello deve essere in grado di assorbire il 40% dell'energia totale dell'elicottero; per alcuni dei suoi componenti sono accettate deformazioni permanenti e anche rotture se queste non influiscono significativamente sulle prestazioni di assorbimento di energia
- le accelerazioni sugli occupanti devono essere contenute

Mentre le normative civili, basandosi sulla condizione conservativa di carrello retratto, non richiedono per il carrello caratteristiche di sicurezza passiva, quelle militari impongono, per il sistema di atterraggio, prestazioni specifiche in condizioni più gravose dell'atterraggio in hard landing, in particolare l'assorbimento del 40% dell'energia d'impatto.

1.3. Modellazione del sedile e del manichino antropomorfo

I manichini antropomorfi iniziano ad essere sviluppati a partire dagli anni '70, basati su misure antropometriche statiche, prove su volontari, animali e cadaveri umani, con l'obiettivo di definire i limiti oltre i quali le lesioni subite dal corpo umano diventano critiche.

La necessità di avere una biofedeltà fra manichino e corpo umano si ripercuote su una corretta distribuzione di massa e momenti d'inerzia, un veritiero posizionamento dei gradi di libertà delle articolazioni e sulla difficoltosa caratterizzazione delle leggi di contatto e schiacciamento fra i vari corpi che determinano, assieme ai materiali, la risposta all'impatto.

Tipicamente ci sono 3 diverse tipologie di persone adulte percentili:

- 5°
- 50°
- 95°

Il modello numerico del manichino rappresenta il 50°, un uomo adulto del peso di 78 kg, realizzato con un insieme di corpi rigidi collegati fra loro in cui smorzamento e rigidità delle parti sono state ottenute sperimentalmente tramite delle campagne di prova.

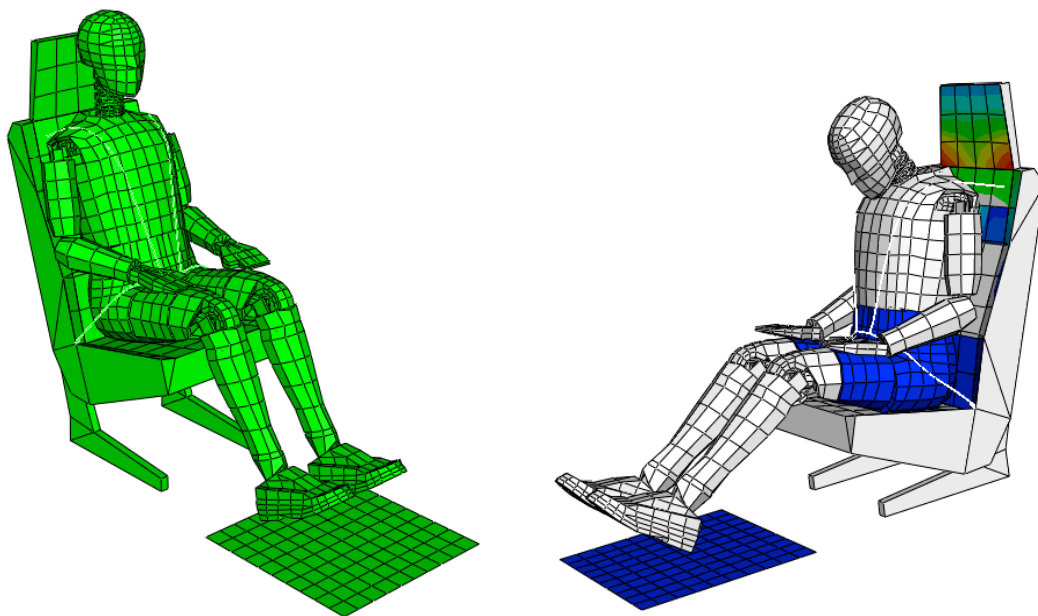


Figura 3
Modello di manichino antropomorfo

La modellazione di un sedile aeronautico ad attenuazione di energia e di un manichino antropomorfo in Abaqus/Explicit, in continua evoluzione, ha permesso di ottenere risultati sempre meglio confrontabili con l'evidenza sperimentale, sia in termini qualitativi che quantitativi, in particolar modo nelle condizioni di impatto previste dalla normativa vigente.

Il modello è composto sostanzialmente da due parti: il sedile ed il manichino.

Il sedile è diviso in una parte mobile, rappresentata dalla seduta ed una fissa ancorata al pavimento del''elicottero

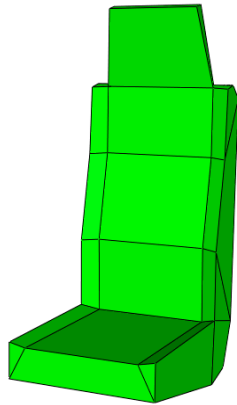


Figura 4
Sedile – Parte Mobile

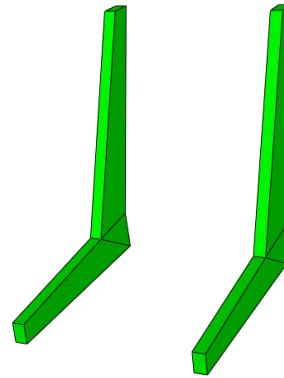


Figura 5
Sedile – Parte Fissa

Per poter costruire la geometria del sedile sono stati utilizzati degli elementi tridimensionali deformabili, che successivamente sono stati legati tra di loro per formare un corpo rigido non deformabile. Le due parti create vengono accoppiate utilizzando degli elementi di interconnessione (CONN3D2), esistenti in Abaqus/Explicit, situati ai lati del sedile per legare un nodo della parte fissa ad uno della parte mobile così da modellare le guide che rappresentano la posizione reale degli assorbitori ed al centro, per imporre una direzione di scorrimento tra la parte fissa e la parte mobile del sedile, rappresentativa delle guide presenti sul sedile, e per modellare l'elemento con funzioni di dissipazione di energia installato sul sedile tra le due parti.

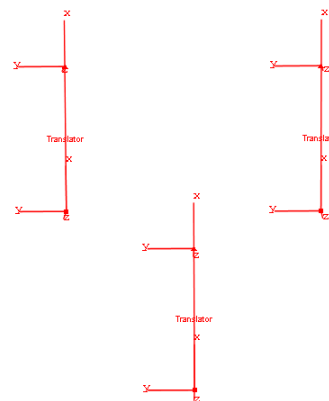
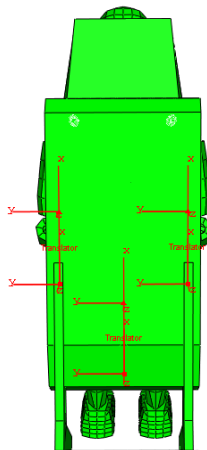


Figura 6
Connector presenti nel Sedile

Per poter modellare l'assorbitore del sedile, all'elemento di interconnessione centrale è stato aggiunto un elemento di tipo trave (*B31*) al quale è possibile attribuire una determinata legge forza-deformazione.

In caso di atterraggi in condizioni di *crash* è possibile che l'assorbitore del sedile frutti tutta la corsa a disposizione raggiungendo il fondo corsa. Questo effetto deve essere evitato in quanto il raggiungimento del fondo corsa generalmente dà luogo ad un innalzamento repentino dei carichi che possono superare i limiti di tollerabilità previsti. Il raggiungimento del fondo corsa può inoltre causare l'interruzione dell'analisi numerica a causa dell'insorgenza di errori legati alle dimensioni dell'elemento.

Per riprodurre questo fenomeno ed evitare l'insorgenza di questi errori numerici il fine corsa è stato modellato inserendo, in parallelo all'elemento di trave con legge forza-deformazione assegnata, una molla che genera una forza di reazione con una legge non-lineare come quella rappresentata in Fig. 7

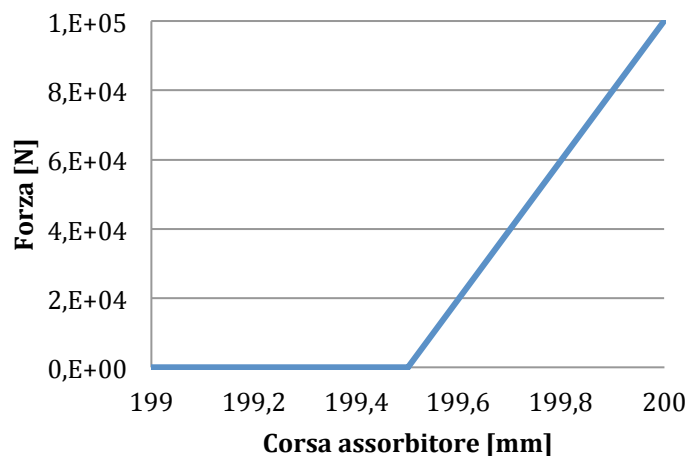


Figura 7
Legge della molla in parallelo all'assorbitore centrale del sedile

La reazione della molla è non nulla e molto elevata quando la trave è quasi totalmente schiacciata. L'introduzione della molla permette di considerare ugualmente le forze trasmesse al manichino, anche quando il fine corsa dell'assorbitore del sedile è stato raggiunto

Il manichino è descritto attraverso un modello costituito da 28 corpi rigidi che rappresentano la testa, il torace, il torso e tutte le membra collegati per mezzo di elementi di connessione in qualità di giunti cinematici per riprodurre le

articolazioni. L'attivazione muscolare è stata ignorata ed il comportamento passivo dei muscoli è riprodotto per mezzo di giunti resistenti a torsione.

Al fine di impedire movimenti irrealistici sono state introdotte coppie torcenti tra i segmenti adiacenti. In tale modello ibrido la colonna lombare, considerata una parte molto critica, è stata modellata con elementi finiti, essendo il carico lombare uno dei più importanti criteri di lesione considerato negli studi di sicurezza all'impatto.

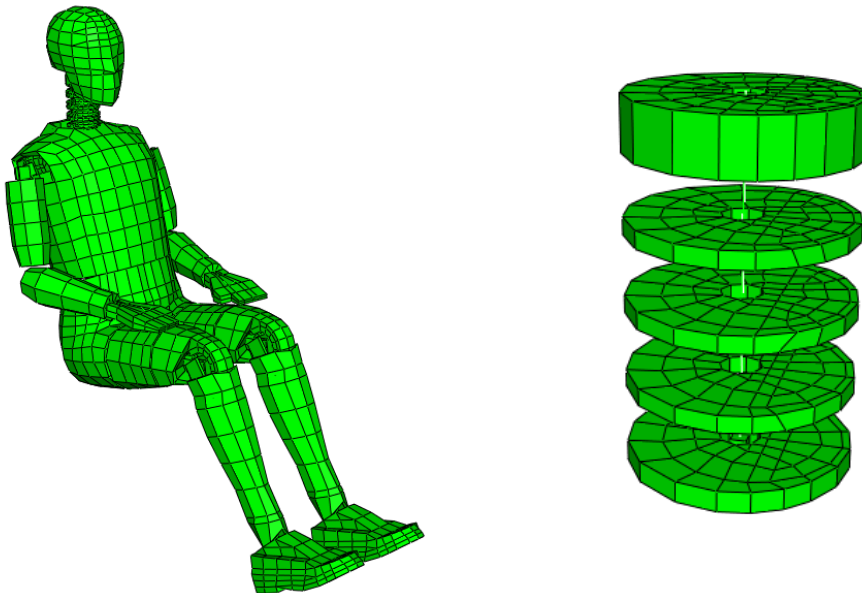


Figura 8
Modello di manichino (a sinistra) e particolare della spina dorsale (a destra)

Le caratteristiche generali dei corpi rigidi sono stati dedotti attraverso la completa validazione del modello ad elementi finiti. Lo schema ad elementi finiti dei corpi rigidi è stato sfruttato per rappresentare la superficie del manichino, in maniera tale da riprodurre meglio i contatti tra le diverse superfici.

1.4. Tecniche di modellazione dei sottopavimento

I sottopavimenti degli elicotteri sono tipicamente progettati sulla base di normali requisiti operazionali. Il tipico schema strutturale è costituito da travi longitudinali e trasversali sostenenti i carichi esercitati sul pavimento. Le stesse travi costituiscono, inoltre, la struttura di sostegno per la base della fusoliera dell'elicottero. Considerando un impatto con una significativa componente di velocità verticale, l'insieme delle travi e le loro intersezioni possono essere sfruttate come elementi ad

assorbimento di energia, posizionandoli tra la parte superiore ed inferiore delle flange delle travi, collegati rispettivamente alla pelle esterna e al pavimento.

Gli assorbitori comunemente usati negli elicotteri sono generalmente localizzati in corrispondenza delle inserzioni tra le travi longitudinali e trasversali che costituiscono il sottopavimento (assorbitori concentrati), e in corrispondenza delle anime delle travi (assorbitori distribuiti o diffusi).

Entrambe le tipologie di assorbitori devono essere progettate per fornire modalità di collasso stabile ed un elevato rapporto tra la forza media e valori di forza massima. Un elemento di intersezione tipico è costituito da quattro elementi ad angolo, che creano una sezione chiusa quadrata con una diagonale delimitata dalla struttura interna del sottopavimento.

La Fig.9 mostra la modalità di collasso di un tipico elemento di intersezione modellata con un codice ad elementi finiti e la curva ottenuta carico-accorciamento, caratterizzato da un picco di forza iniziale seguito da oscillazioni di forza minore attorno ad un valore pressoché costante.

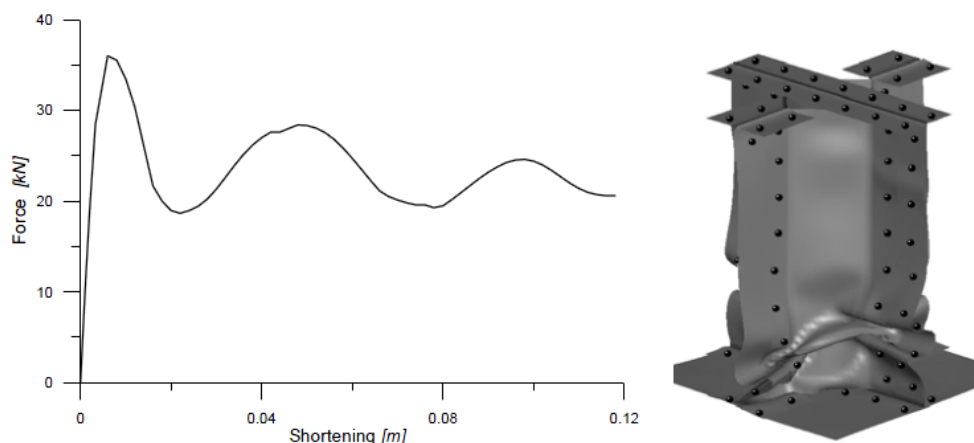


Figura 9
Collasso di un elemento di intersezione

Per realizzare tale obiettivo le intersezioni e la rete di travi sono progettate per subire un processo di collasso controllato quando sottoposto a carichi assiali, ottenendo così un sistema di dissipazione dell'energia d'impatto verticale ad un livello di carico ben preciso.

Un comportamento simile si osserva quando vengono considerati gli assorbitori distribuiti. Nei sottopavimenti realizzati in lega leggera da Alluminio, questi assorbitori sono spesso realizzati con piccole scatole posizionate specificamente sulle travi longitudinali. Se correttamente progettato, garantisce

modalità di *crash* stabile ed altamente efficiente. Viene riportata la curva carico-schiacciamento ottenuta utilizzando un modello di un assorbitore tipico.

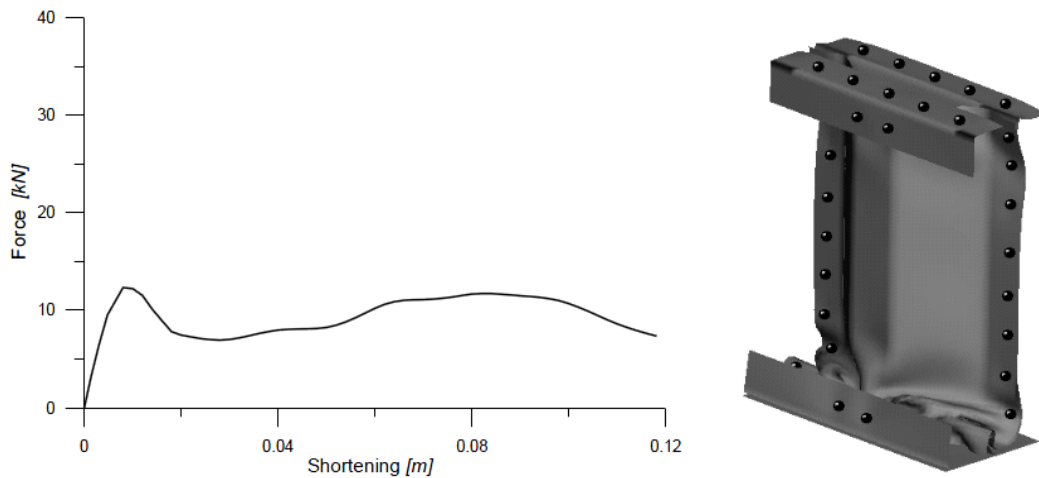


Figura 10
Collasso di un assorbitore distribuito

Le prestazioni ottenute dalle diverse tipologie di assorbitori indicano chiaramente che, per aumentarne l'efficienza in termini di energia assorbita per unità di massa si deve cercare di aumentare il valore della forza di collasso fornita dall'elemento considerato.

L'utilizzo degli elementi finiti è molto utile per analizzare le caratteristiche degli elementi che compongono il sottopavimento, permettendo di ricavare le curve di risposta degli assorbitori installati come riportato nei due esempi appena descritti.

L'impiego di modelli ad elementi finiti per l'analisi dell'intera struttura del sottopavimento risulterebbe estremamente oneroso a causa della complessità del modello e dei tempi di calcolo richiesti.

Utilizzando tecniche ibride di modellazione si semplifica il modello in maniera importante. Infatti, ciò che prima era un dettagliato modello ad elementi finiti di un assorbitore viene ora descritto come una trave, definita attraverso due nodi, (Fig.10a) alla quale viene assegnata una legge specifica di assorbimento di energia (Fig. 10b).

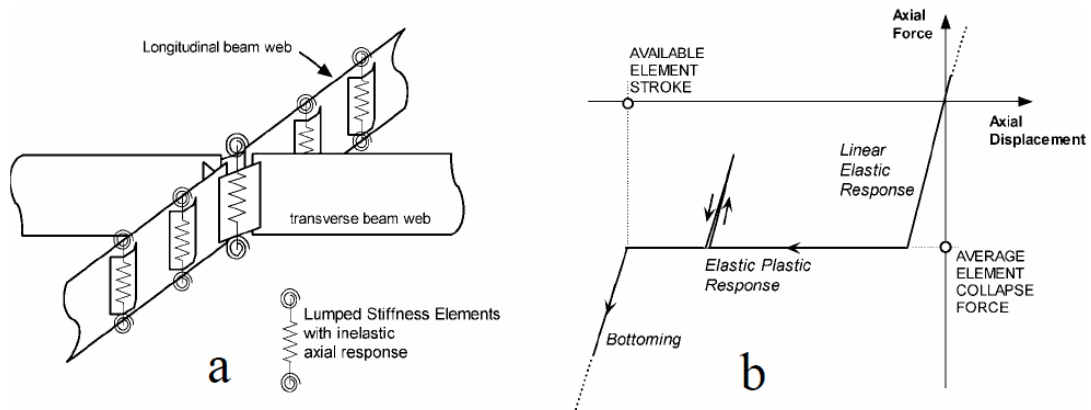


Figura 11

Tecniche di modellazione dei sistemi di assorbimento di energia utilizzati nel sottopavimento

Per quanto riguarda la modellazione delle travi trasversali e longitudinali della parte superiore ed inferiore del sottopavimento, sono realizzate attraverso la modellazione di profilati tipici in lega d'Alluminio. In generale vengono utilizzati travi con sezione ad L.

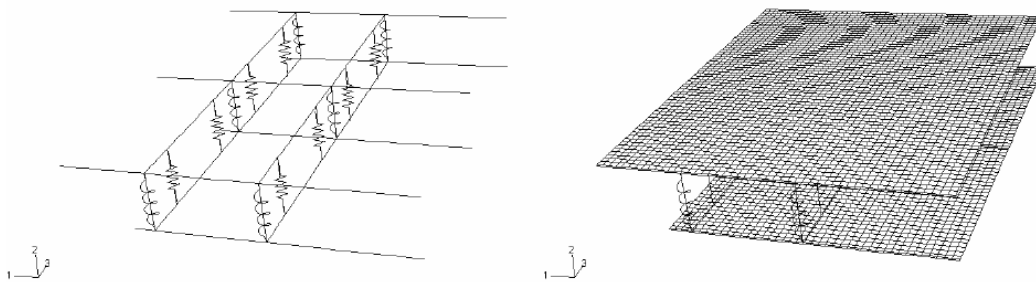


Figura 12

Modelli della struttura interna (a destra) e del sottopavimento completo (a sinistra)

In questo modo viene realizzato un modello di sottopavimento fedele alla realtà sia in termini di peso che di comportamento, ma di semplice gestione e che permette di ottenere risultati coerenti in tempi molto ridotti.

1.5. Obiettivi del lavoro di tesi

Obiettivo della tesi è la realizzazione di una configurazione completa di impatto verticale attraverso un modello multi corpo realizzato con il codice di calcolo Abaqus/Explicit

Nel modello finale sono stati inseriti tutti i componenti che, durante un atterraggio in generale ed in particolare in condizioni di *crash*, intervengono per assorbire l'energia di caduta del velivolo (assorbitori del sottopavimento, sedile e carrelli).

Una prima parte della tesi tratta, dunque, della messa a punto dei modelli per la descrizione di scenari d'impatto verticali e delle modifiche apportate per creare un assieme più verosimile comprendente più manichini nello stesso modello. Le analisi verranno ripetute variando i parametri di assorbimento e la velocità di caduta per ottenere una condizione ottimale in caso di atterraggio a *crash*.

Si descriverà la modellazione di un carrello realizzato con tecniche multicorpo con la presenza al suo interno di una cartuccia anti-*crash* analizzando i risultati ottenuti ed adattando anch'esso per l'assieme sopra citato.

Infine verrà creato il modello comprensivo di tutti gli elementi di assorbimento che verrà inserito nell'assieme creato in precedenza al fine di analizzare come la presenza di un ulteriore elemento di assorbimento influenzi i risultati.

2. Modello di una configurazione di impatto

2.1. Configurazione e modellazione del sottopavimento

Il modello di sottopavimento utilizzato è stato creato partendo dalla geometria dell'elicottero Bell UH-1D sul quale erano state eseguite delle prove sperimentali d'impatto verticale. Nella realtà questo elicottero non era fornito di sottopavimento; esso è stato aggiunto nel modello numerico per cercare di modellare e progettare un sottopavimento in grado di garantire una maggior sicurezza e maggiori speranze di sopravvivenza in caso di impatti a *crash*.

La progettazione del sotto-pavimento dell'elicottero si basa sulla valutazione dell'assorbimento d'energia che riescono a garantire gli elementi di collegamento, collocati fra il pavimento dell'elicottero ed il sotto-pavimento stesso come descritto nel capitolo precedente.

La struttura è realizzata tramite dei longheroni, che percorrono l'elicottero dalla coda al naso, da irrigidimenti trasversali e da centine d'estremità.

All'interno del modello questa struttura, realizzata appositamente per assorbire l'energia in caso di *crash*, è stata modellata tramite degli elementi di trave i quali hanno tutti le stesse proprietà inerziali.

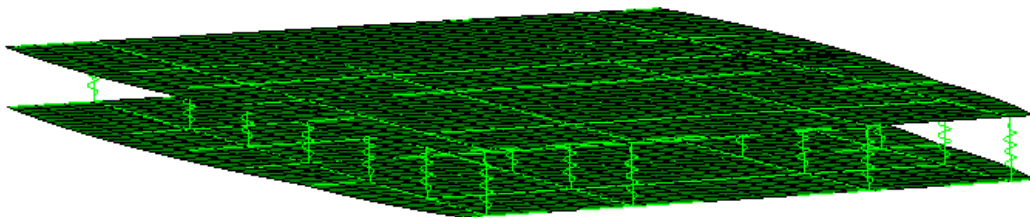


Figura 13
Modello Sottopavimento

- Materiale: Alluminio
- Area della sezione: 100 mm²
- Momento d'inerzia I11: 20000 mm⁴
- Momento d'inerzia I22: 20000 mm⁴

Per ogni elemento di trave è stata presa l'accortezza di inserire un elemento elastico in parallelo, una molla, che iniziasse a reagire solo a seguito del quasi completo schiacciamento dell'elemento di trave. In questo modo si evita che l'elemento di trave assuma dimensioni troppo ridotte tali da imporre un passo di calcolo decisamente troppo piccolo per concludere l'analisi.

Gli elementi sono stati caratterizzati assialmente tramite un legge forza-deformazione, in cui la deformazione, all'interno di Abaqus/Explicit, va definita in forma logaritmica:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{l_f}{l_0} \right)$$

In cui l_f è la lunghezza finale mentre l_0 la lunghezza iniziale.

Il modello di sottopavimento utilizzato in questo lavoro di tesi prevede l'impiego dei solo assorbitori concentrati, posizionati in corrispondenza degli incroci tra travi e longheroni, caratterizzati con un unico parametro: il valore di snervamento a compressione, avendo ipotizzato un comportamento elastico perfettamente plastico. Il pavimento e la pelle esterna sono stati modellati tramite elementi di piastra mentre il suolo, assunto indeformabile, è stato inserito nel modello come corpo rigido, ed è stato attribuito un coefficiente d'attrito pari a 0,35 al contatto tra la struttura ed il suolo.

2.2. Messa a punto del modello di manichino antropomorfo per impatti verticali

Il manichino antropomorfo utilizzato nel lavoro di tesi deriva da una serie di studi e sviluppi che hanno portato ad una ottima correlazione numerico-sperimentale. Sono state apportate alcune modifiche al modello per ovviare ad alcuni comportamenti non realistici del manichino nel corso delle analisi numeriche.

Nelle prove di certificazione è richiesto che il valore del carico lombare, ovvero la forza massima consentita in compressione sulla colonna verticale, non superi la soglia di 6670 N. Sono state eseguite una serie di analisi per approfondire alcuni dei risultati ottenuti nelle prove preliminari. La configurazione utilizzata è quella riportata in Fig. 14 in cui l'assieme di sedile e manichino è stato posizionato modello di sottopavimento descritto nel paragrafo precedente. Il sedile è stato vincolato rigidamente al sottopavimento.

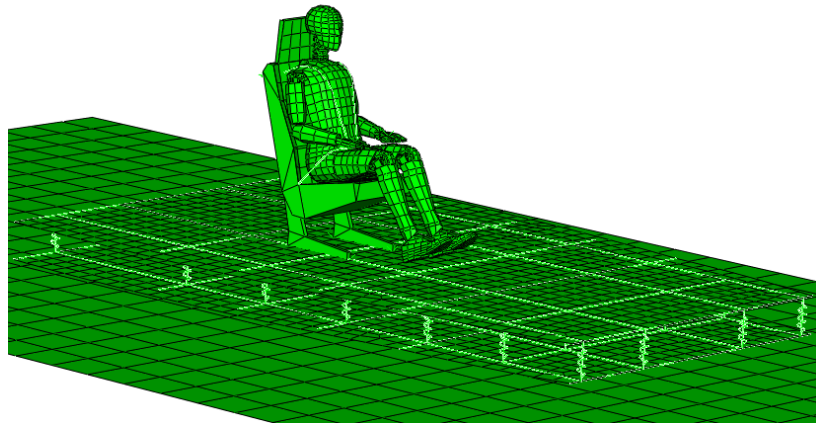


Figura 14
Modello di caduta verticale

La curva del carico lombare non filtrata, ottenuta da questo modello, presentata in Fig.15 presenta valori positivi che, contrariamente alle classiche convenzioni, indicano un carico lombare di compressione; conseguentemente, dove il carico diventa negativo, si ha un carico di trazione. Ragionando in quest'ottica si osserva immediatamente che il carico lombare, in prossimità di 0.04 s raggiunge valori di carico addirittura superiori a quelli di compressione, comportamento molto strano considerando la dinamica dell'analisi in questione

Per valutare meglio il comportamento della curva si è deciso di filtrarla con un filtro SAE180 (questa tipologia di filtro verrà utilizzata per tutti i risultati ottenuti nel corso della tesi), tipico per questo tipo di fenomeni, e di diagrammarla assieme alla corsa del sedile.

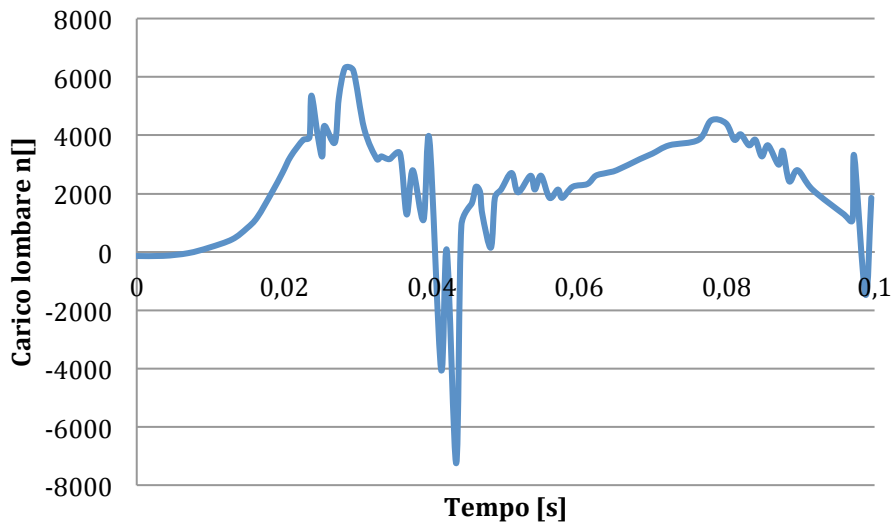


Figura 15
Curva non filtrata del carico lombare

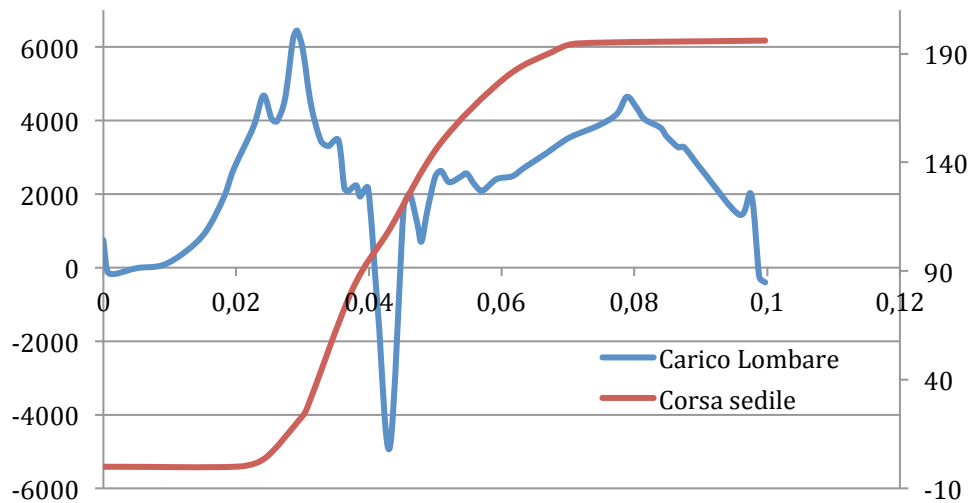


Figura 16
Curva filtrata del carico lombare [N] e corsa del sedile [mm]

Osservando, in Fig.16, l'andamento del carico lombare nel modello di manichino di partenza si nota subito che cambia di segno improvvisamente. Per capire la motivazione di questo comportamento anomalo si è spostata l'attenzione sullo studio della dinamica del manichino durante la caduta.

Il manichino, in fase di concepimento, è stato dotato di *Stop*, ossia di fermi per limitare i movimenti delle articolazioni che altrimenti sarebbero state libere di muoversi. La cosa interessante è che gli *Stop* di ogni giunzione possono essere

visualizzati a video sotto forma di curve, le quali altro non saranno che gradini ON/OFF ad indicare il raggiungimento o meno del fondo corsa dell'articolazione. Forti di questa considerazione è stato possibile andare ad osservare eventuali articolazioni bloccate durante lo svolgimento dell'analisi. L'attenzione si è subito concentrata sul comportamento delle gambe, le prime imputate del picco negativo, le quali incidono notevolmente sulla dinamica del problema.

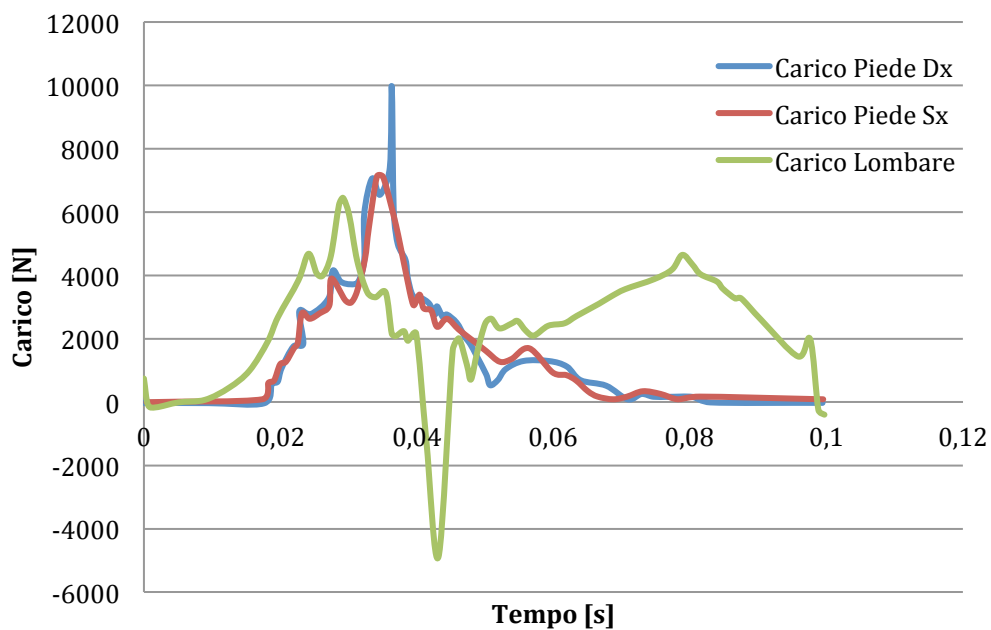


Figura 17
Forza totale scambiata dai piedi

Valutando la Fig.17 sembrerebbe proprio che il motivo non sia legato alle forze introdotte dai piedi, poiché i valori sono ragionevoli e soprattutto non entrano nell'intervallo temporale d'interesse.

Continuando la valutazione del comportamento del manichino si è arrivati a studiare l'effetto di tutto il comparto di articolazioni legate al tronco e alle braccia. L'indagine è stata motivata da un'osservazione più attenta dell'animazione dell'analisi.

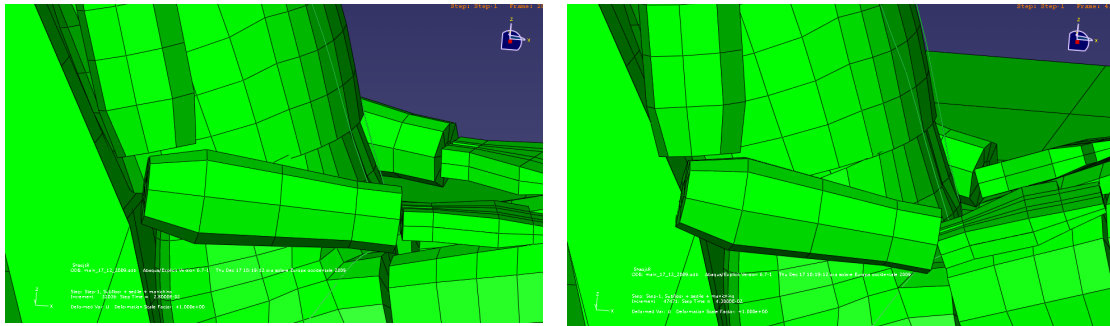


Figura 18 Fotogrammi tratti dal filmato dell'analisi relativi al gomito

Dalla Fig.18 si evince che durante l'analisi le braccia vengono spinte indietro dalle gambe, tanto che compenetrano nella geometria del sedile, per poi praticamente bloccarsi. Questo fatto ha indotto a pensare, visto che non sono presenti contatti fra gomito e sedile, che ci fossero delle limitazioni legate alle articolazioni. Infatti andando ad osservare i carichi relativi alle articolazioni delle spalle si è notato che si hanno dei picchi proprio nell'intervallo di tempo d'interesse.

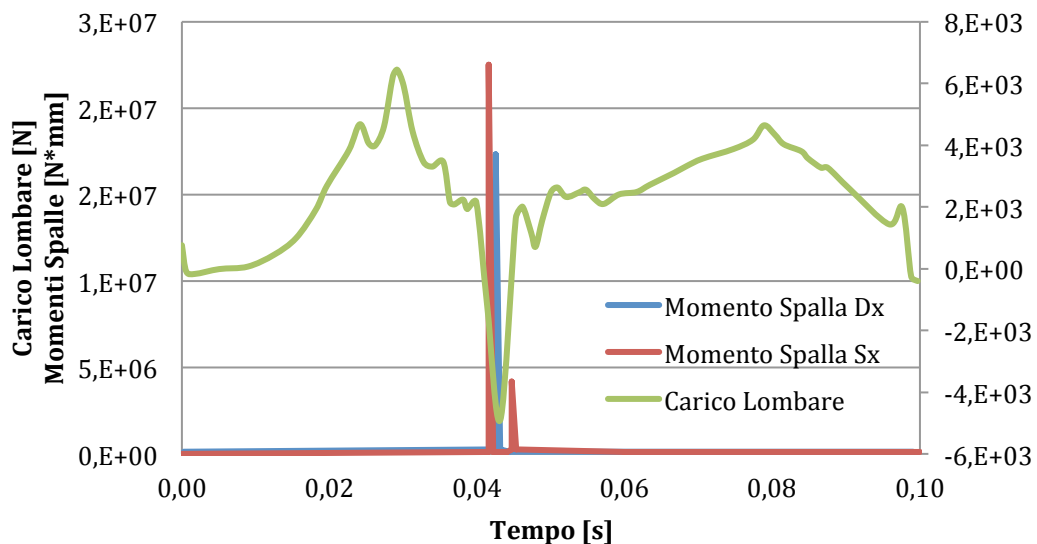


Figura 19
Carico Lombare e Momenti relativi all'articolazione della spalla

Sovrapponendo le curve dei momenti introdotti per effetto del fondo-corsa dell'articolazione alla curva del carico lombare si ottiene la conferma di ciò che si pensava, ossia il picco negativo viene introdotto per effetto delle spalle. Ciò che succede è molto semplice: le gambe durante la caduta spingono indietro le braccia che continuano ad arretrare ruotando attorno alla spalla poiché quest'ultima bloccata

dal sedile. Questo accade sin tanto che gli Stop non vengono raggiunti. Dal momento in cui la rotazione della spalla arriva a fine corsa si ha un'introduzione di momenti sul tronco del manichino, in particolare il momento in direzione x, come si può notare dalla Fig.20, sembra essere quello responsabile della trazione sulla spina dorsale che viene visualizzato sul grafico come picco negativo.

Capito il problema, lo si è risolto sbloccando alcuni movimenti articolari che non sembravano essere coerenti con la fisionomia umana. Si sono quindi modificati gli Stop, poiché poco fisici, in tutta la catena di rotazioni fra polso, gomito, spalla e clavicola.

Nel particolare:

- Rotazione polso: -79° , $+30^\circ$
- Rotazione gomito: -70° , $+90^\circ$
- Rotazione clavicola: -100° , $+45^\circ$

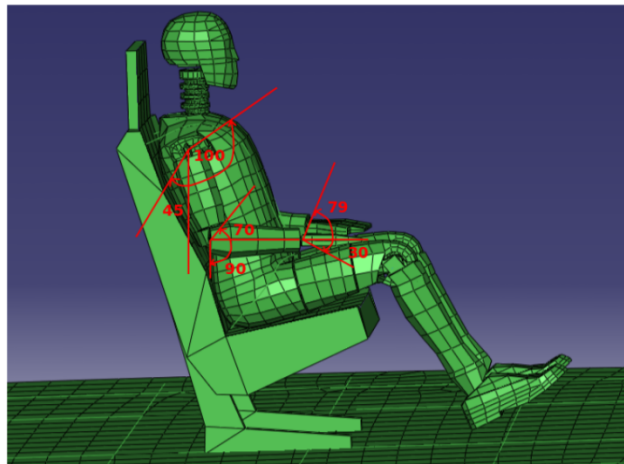


Figura 20
Modifiche delle rotazioni

Un'ulteriore modifica apportata al modello riguarda il contatto tra piedi e pavimento; a seguito dell'impatto con il pavimento i piedi, nel modello di partenza, si arrestavano, rimanendo praticamente nella stessa posizione fino alla fine della prova.

Ciò si è scoperto essere dovuto alla definizione della superficie del piede impiegata nel contatto piede/pavimento modellato tramite la legge di Pressure overclosure, che assegna una pressione di contatto tra le superfici in funzione della compenetrazione relativa. Nel modello di partenza la superficie dei piedi era stata considerata come una superficie non fisica, definita tramite tutti i nodi appartenenti al piede. Tale modellazione non consentiva al piede di avere la corretta dinamica, impedendo di fatto lo scorrimento del piede stesso sul pavimento.

Assegnando, invece, come superficie di contatto quella definita tramite le facce degli elementi solidi che rappresentano la suola del piede, suddivisa fra tacco e punta, è stato possibile modellare realisticamente il contatto, mettendo in luce lo scorrimento relativo e quindi la dinamica corretta.

Oltre alla ridefinizione degli elementi associati al contatto, è stata modificata anche la l'entità della legge di contatto stessa, come mostrato in Fig. 23.

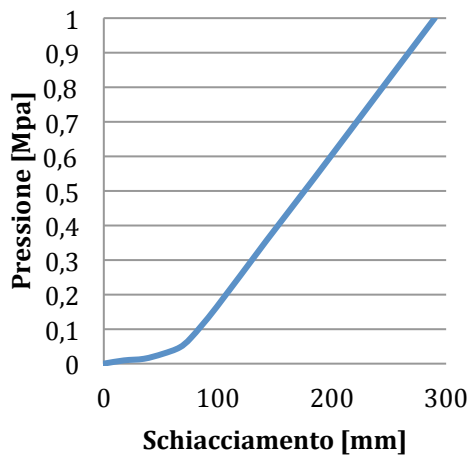


Figura 21a

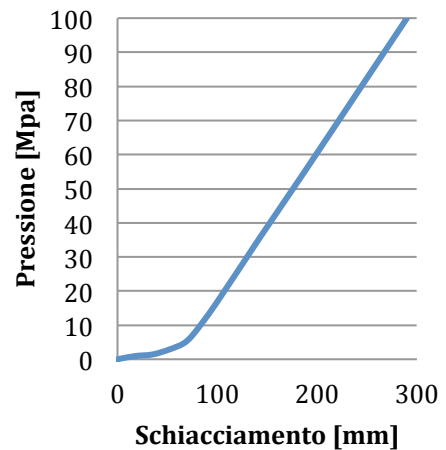


Figura 21b

Legge di contatto piedi/pavimento precedente (a sinistra) e nuova (a destra)

Le immagini mettono in evidenza la precedente legge di contatto fra i piedi ed il pavimento (Fig. 21a) e quella modificata successivamente (Fig. 21b) per rendere il contatto più rigido. Infatti nella vecchia legge di contatto a fronte di un spostamento di 100 mm la pressione esercita sugli elementi del piede era di appena 0.2 MPa, il che è sembrato poco veritiero. Per questo motivo i valori di pressione sono stati scalati con un fattore scala di circa 100. Questo fatto però poco centrava con la problematica riscontrata sui piedi, o meglio, avendo definito in maniera sbagliata le superfici dei piedi per il contatto, l'effetto dell'entità della legge di contatto veniva a mancare perché meno preponderante rispetto al primo effetto.

Con le modifiche e le correzioni apportate al modello si possono effettuare delle analisi numeriche, avendo la certezza che i risultati non siano inficiati da grossolani errori di modellazione.

I risultati ottenuti vengono riassunti in Fig.22:

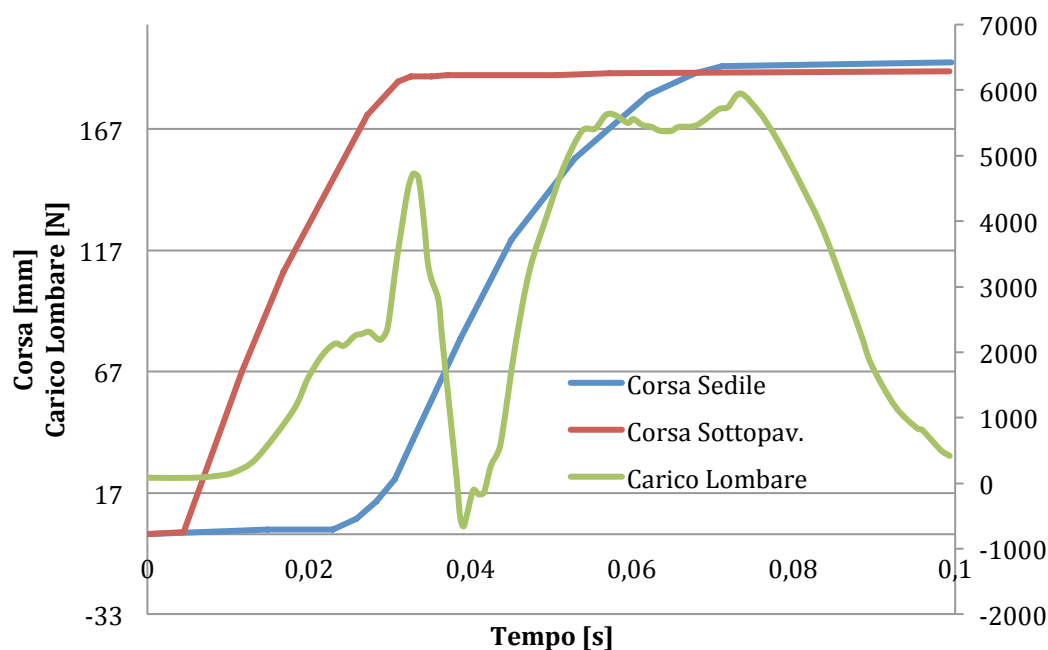


Figura 22
Carico lombare, Corsa Sedile e Corsa Sottopavimento

Si notano due zone in cui il carico lombare presenta un massimo. La prima zona è rappresentata dal picco di carico, dovuto al fatto che il sottopavimento è arrivato al massimo schiacciamento.

La seconda zona di massimo è rappresentata dal "plateau" da imputare alla fine della corsa dell'assorbitore di energia del sedile.

2.3. Triplicazione del modello di manichino

Ottenuto il modello di manichino funzionante in maniera corretta ed avendo a disposizione tutti gli elementi utili per la creazione di un modello comprensivo di sottopavimento, manichini e carrello è stato necessario rendere i modelli interfacciabili. Sostanzialmente è stata necessaria una rinumerazione ponderata di tutti i nodi ed elementi presenti nei modelli al fine di non avere nodi ed elementi in comune.

Inizialmente è stata valutata l'opzione di utilizzare direttamente il CAE di Abaqus gestendo i modelli con le INSTANCE, ovvero creando un modello unico che poi sarebbe stato rinumerato, traslato e gestito completamente da Abaqus senza il bisogno di rinumerare ogni volta i nuovi elementi duplicati o aggiunti.

Dopo una serie di tentativi è stato d'obbligo abbandonare questa opzione per il fatto che il programma gestisce in questo modo solamente i nodi e gli elementi (sostanzialmente la "geometria" e le sue caratteristiche di massima), ma non permette l'utilizzo, all'interno delle INSTANCE, degli elementi "connector" e delle interazioni tra gli elementi. Questo avrebbe previsto la necessità di rinumerare comunque buona parte del modello.

Il modello finale previsto nel lavoro di tesi comprende dunque tre manichini comprensivi di sedile, un sedile senza manichino, i tre carrelli, il sottopavimento ed il suolo. Verranno eseguite successivamente delle analisi con un modello comprensivo di carrelli che sono stati considerati già in questa fase per definire una numerazione coerente.

Nella Tab.1 viene evidenziata la logica di rinumerazione utilizzata per i modelli:

Tabella 1 – Numerazione dei modelli

MODELLO	NUMERAZIONE	SET ELEMENTI
MANICHINO 1	1 XXX XXX	DUMMY1_name
MANICHINO 2	2 XXX XXX	DUMMY2_name
MANICHINO 3	3 XXX XXX	DUMMY3_name
SEDILE 4	4 XXX XXX	
SOTTOPAVIMENTO	8 XXX XXX	
SUOLO	9 9XX XXX	
CARRELLO 1	1 XXX	L1_name
CARRELLO 2	2 XXX	L2_name
CARRELLO 3	3 XXX	L3_name

Questo ha permesso di non avere problemi di nodi ed elementi coincidenti.

Tutti i modelli sono stati verificati singolarmente per assicurarsi che la rinumerazione rispetto al modello originale fosse corretta e che non avesse introdotto alterazioni della dinamica e dei risultati ottenuti con il modello originale.

Un'altra modifica apportata a livello di gestione dei file è stata quella di creare un nuovo file di lancio delle analisi partendo dal file principale del primo manichino rinumerato. Esso è diviso in tre parti che resteranno sempre ben distinte anche nell'assemblaggio finale.

L'organizzazione del file è riportata nel diagramma di flusso seguente (Fig. 23):

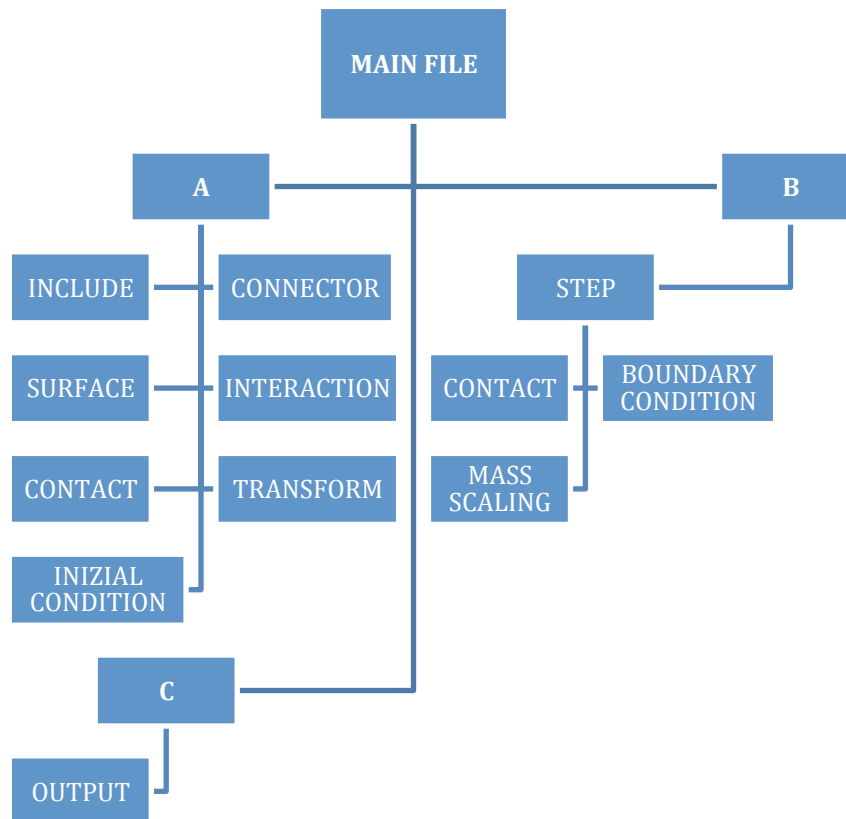


Figura 23
Diagramma di flusso del file principale

2.4. Descrizione del modello d'assieme

Avendo ora a disposizione i modelli dei manichini e del sottopavimento è stato eseguito l'assiemaggio per arrivare a descrivere una configurazione di impatto verticale verosimile. I manichini sono stati disposti sul sottopavimento in maniera tale da descrivere una prova comprendente due passeggeri, un sedile vuoto ed il pilota.

In Fig. 24 viene riportata la configurazione considerata:

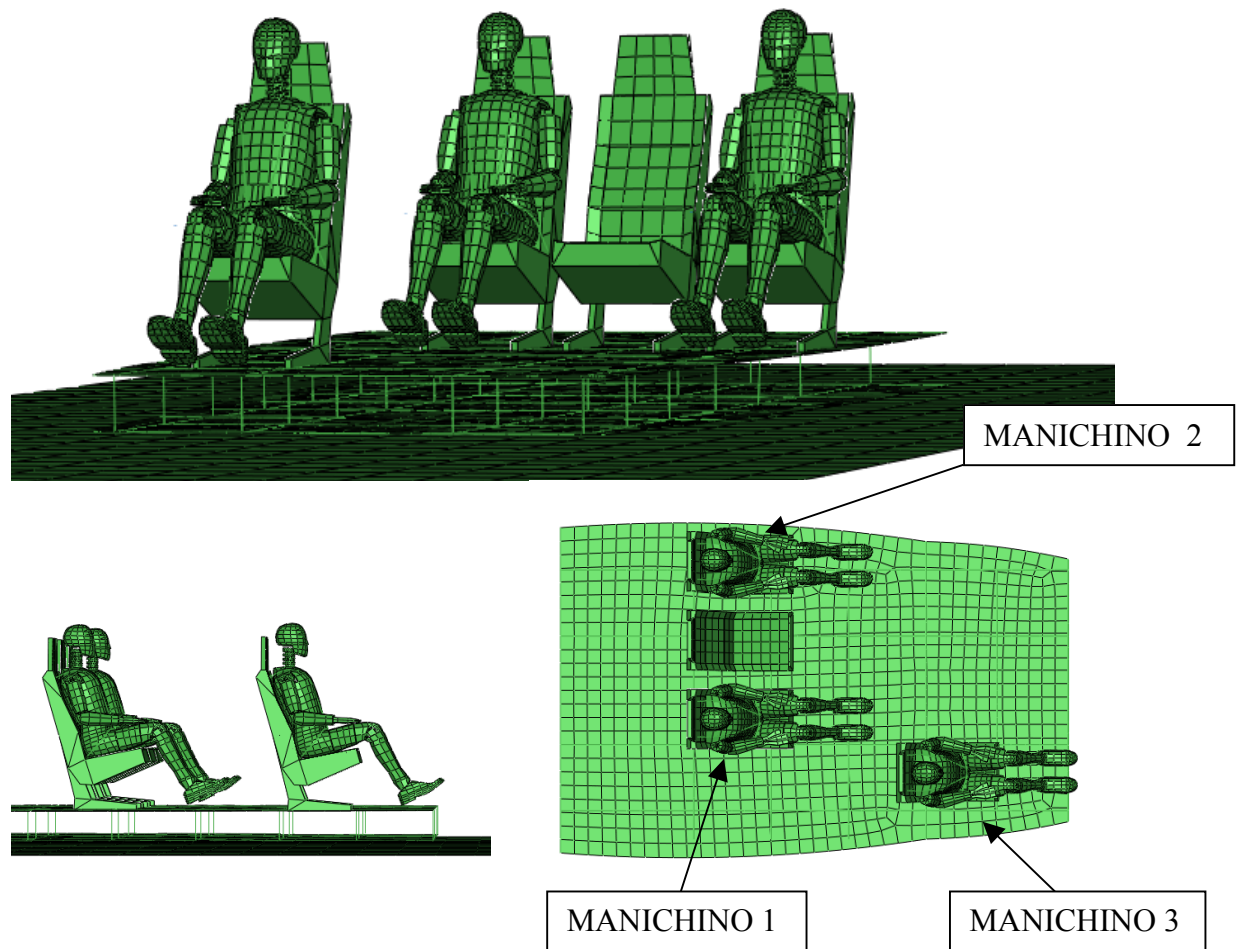


Figura 24

Durante la descrizione dei risultati ottenuti si indicherà con Manichino 1 quello centrale, con Manichino 2 quello posizionato più a destra mentre Manichino 3 andrà ad indicare quello frontale che rappresenta il pilota dell'elicottero.

3. Analisi di impatto della configurazione completa

3.1. Scelta iniziale dei parametri degli assorbitori

A parità di modello sono state dunque effettuate una serie di prove per cercare di capire le configurazioni che portano al soddisfacimento dei carichi lombari ammessi dalla normativa. Sono state effettuate le prove variando le velocità iniziali di caduta assegnando al modello una velocità di caduta di 8 – 10 – 12 m/s mantenendo inalterata la forza assiale degli assorbitori dei sedili e degli incroci del sottopavimento. Nella configurazione iniziale il comportamento degli assorbitori è stato assunto elastico-perfettamente plastico con le caratteristiche di forza assiale resistente riportate nella tabella XX

Tabella 2 - Forza assiale degli assorbitori

TIPO ASSORBITORE	FORZA ASSIALE
Sedile	7800 N
Incroci Sottopavimento	5000 N

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti con questa configurazione; i grafici descrivono gli andamenti dei carichi lombari sui tre manichini e lo schiacciamento dei sedili per cercare di comprendere meglio come il livello di sopravvivenza varia a seconda dello schiacciamento o meno degli assorbitori e della posizione del manichino sul sottopavimento al variare della velocità.

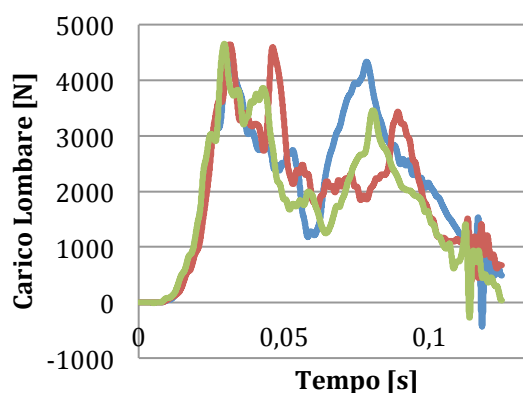


Figura 25 Carichi lombari a 8 m/s

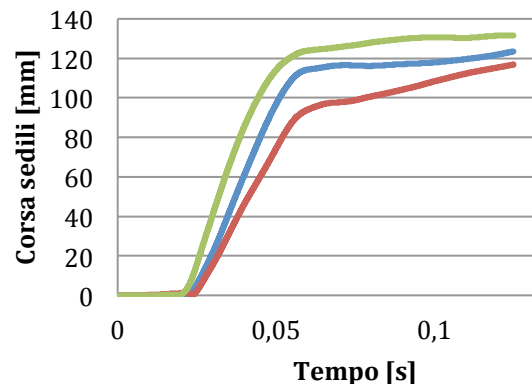


Figura 26 Corse sedili a 8 m/s

Blu=Manichino1; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

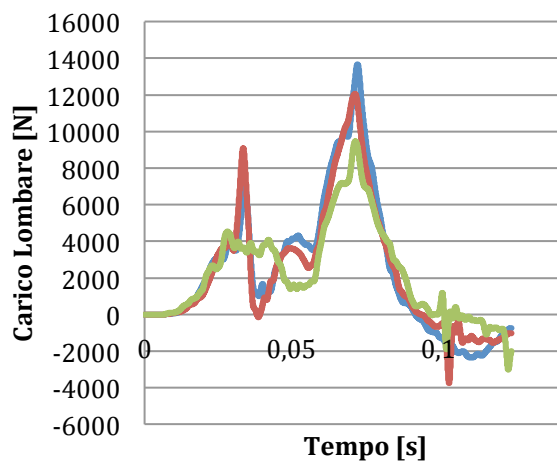


Figura 27 - Carichi lombari a 10 m/s

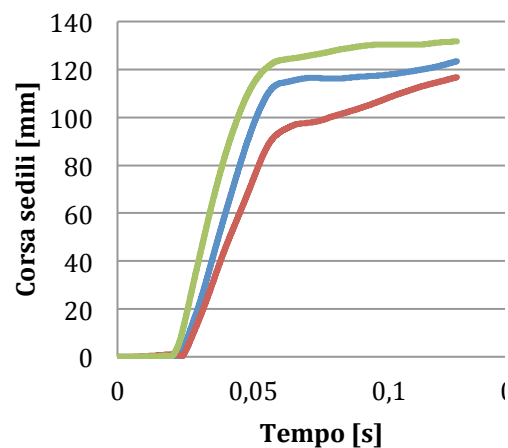


Figura 28 - Corse sedili a 10 m/s

Blu=Manichino1; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

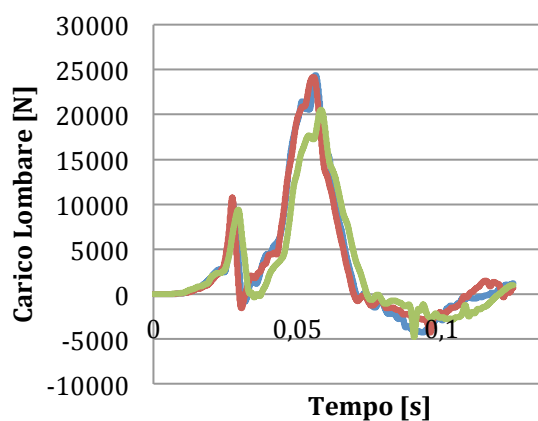


Figura 29 Carichi lombari a 12 m/s

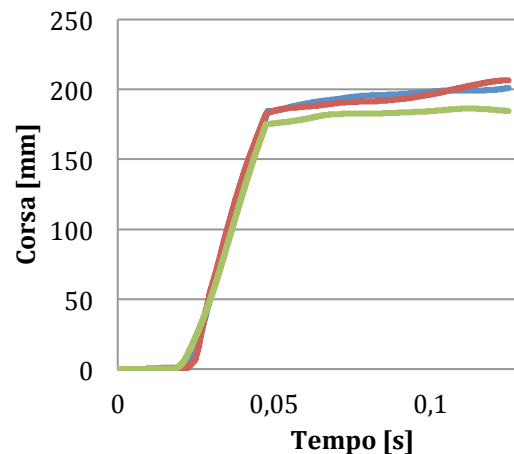


Figura 30 - Corse sedili a 12 m/s

Le curve di carico lombare evidenziano la presenza di due picchi; il primo corrisponde alla parte assorbita dal sottopavimento, mentre il secondo, dal sedile. Nella curva riferita ad una velocità di caduta di 8m/s si nota come i livelli di assorbimento siano molto ben equilibrati tra sottopavimento e sedile, a differenza delle altre due in cui la parte del sottopavimento risulta molto inferiore a quella relativa al sedile.

Si nota come la corsa degli assorbitori del sedile ecceda, a volte, i 200 mm di fondo corsa; questo è dovuto al fatto che il calcolo della corsa è stato effettuato attraverso il teorema di Pitagora considerando le differenze delle traslazioni nelle tre direzioni di

un punto fisso ed uno mobile appartenenti al sedile. Il calcolo tiene conto, quindi, anche dei disallineamenti tra i nodi.

Lo schiacciamento del sottopavimento è difficile da diagrammare in quanto si comporta in maniera diversa a seconda dell'area di verifica. Infatti dipende anche dal posizionamento del sedile rispetto agli incroci del sottopavimento. Si è riportato dunque il grafico dello spostamento verticale di un nodo di riferimento posto sulla parte fissa del sedile che verrà epurato di una distanza iniziale di 48mm corrispondente alla prima fase di caduta dell'assieme:

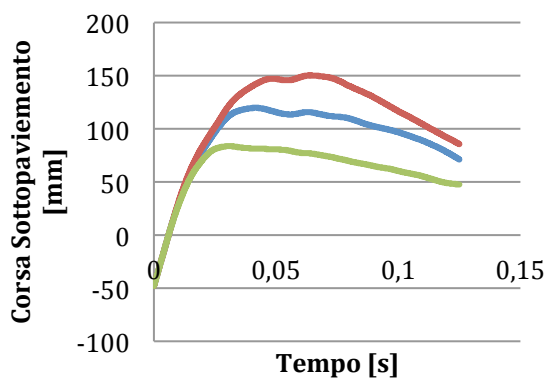


Figura 31- Corse sottopavimento a 8 m/s

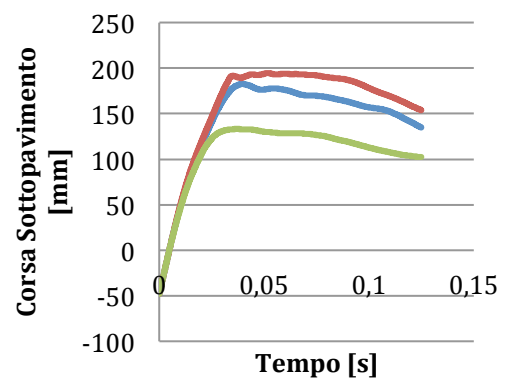


Figura 32 - Corse sottopavimento a 10 m/s

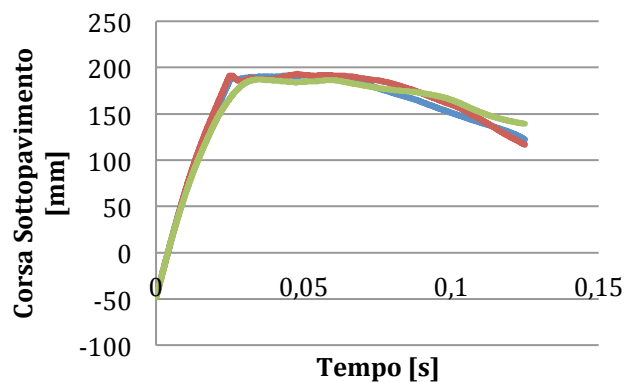


Figura 33 - Corse sottopavimento a 12 m/s

Blu=Manichino1; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

Nelle tabelle sottostanti vengono riportati i riassunti dei carichi e schiacciamenti massimi divisi per manichini e velocità:

Tabella 3- Risultati Manichino 1

VELOCITÀ	C.L.	C.S.	C.SOTT.
8 m/s	4513 N	123 mm	119 mm
10 m/s	13662 N	182 mm	182 mm
12 m/s	24398 N	201 mm	191 mm
C.L.=Carico Lombare ; C.S. = Corsa Sedile C.SOTT. = Corsa Sottopavimento			

Tabella 4 - Risultati Manichino 2

VELOCITÀ	C.L.	C.S.	C.SOTT.
8 m/s	4647 N	116 mm	150 mm
10 m/s	12038 N	180 mm	194 mm
12 m/s	24184 N	206 mm	193 mm

Tabella 5 - Risultati Manichino 3

VELOCITÀ	C.L.	C.S.	C.SOTT.
8 m/s	4658 N	131 mm	83 mm
10 m/s	9450 N	184 mm	133 mm
12 m/s	20553 N	186 mm	187 mm

I campi evidenziati rappresentano la condizione di non sopravvivenza degli occupanti. La prima cosa che si nota è che alla velocità di caduta di 12 m/s ha poco senso eseguire delle analisi in quanto la sopravvivenza è, secondo questi risultati, impossibile essendo i valori di carico lombare molto al di sopra dei livelli di sopportazione del corpo umano.

A 10 m/s i valori di carico lombare restano meno elevati rispetto ai 12 m/s anche se siamo ancora in condizioni di non sopravvivenza degli occupanti, cosa che risulta raggiunta nella configurazione di caduta a 8 m/s.

Dalle analisi dei grafici e dei valori riportati si nota come nel primo caso ad 8m/s sia il sottopavimento che il sedile non raggiungono il fondocorsa il che significa che la corsa disponibile è sufficiente per assorbire l'energia di impatto col terreno.

Anche a 10 m/s non si è ancora raggiunto il limite di schiacciamento del sottopavimento e del sedile, e questo fa pensare al fatto che si potrebbero ridurre le rigidità degli assorbitori per cercare di sfruttare il massimo della corsa.

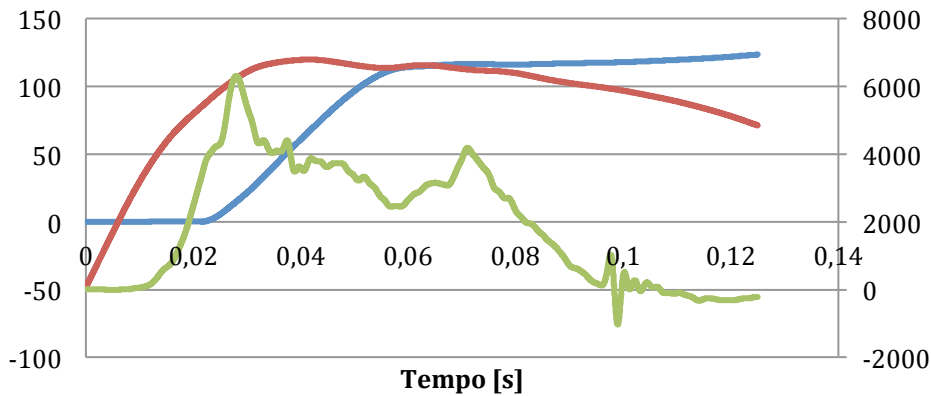


Figura 34- Manichino 1 a 8 m/s

Blu= Corsa Sedile [mm] ; Rosso= Corsa Sottopavimento [mm] ;
Verde = Carico Lombare

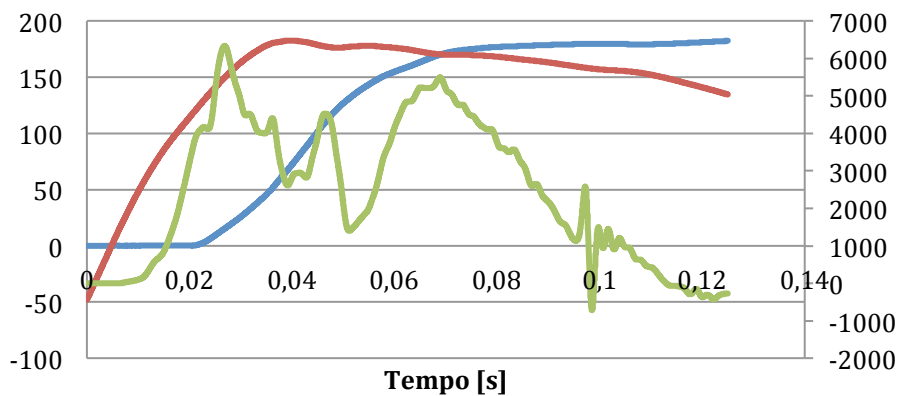


Figura 35 - Manichino 1 a 10 m/s

Blu= Corsa Sedile [mm] ; Rosso= Corsa Sottopavimento [mm] ;
Verde = Carico Lombare

Sovrapponendo i grafici del carico lombare e delle corse degli assorbitori si nota come i picchi siano sempre in concomitanza dell'attivazione di un assorbitore; osservando il grafico a 10m/s si nota che a circa 0,2 secondi si ha il primo picco nel momento in cui l'assorbitore del sedile si attiva; all'arrivo a fondo corsa del sottopavimento si ha una variazione della velocità di schiacciamento dell'assorbitore del sedile che provoca un secondo picco che fa diminuire il carico che infine aumenta sino allo schiacciamento massimo per poi diminuire definitivamente.

È dunque utile cercare di ottenere una combinazione tra i due assorbitori che permetta un assorbimento di energia ben equilibrato tra sottopavimento e sedile ben comprendendo che quest'ultimo sarà l'elemento che andrà ad influenzare i risultati in maniera più importante.

3.2. Sensitività alla variazione dei parametri

3.2.1. Assorbitori elastici perfettamente plastici

A seguito dei risultati ottenuti si è deciso di intervenire variando le caratteristiche di assorbimento assiale degli assorbitori sia del sedile che del sottopavimento. Considerando il fatto che ad 8 m/s i risultati ottenuti in precedenza erano già soddisfacenti si è operato considerando una velocità di caduta di 10 m/s.

Si sono considerate le seguenti tipologie di assorbitori valutando tutte le combinazioni possibili:

Tabella 6- Valori di forza assiale degli assorbitori analizzati

INCROCI	6000 N	7000 N	8000 N
SEDILE	9000 N	10000 N	11000 N

Nelle tabelle 7,8 e 9 vengono riportati i risultati in termini di valori massimi di carico lombare, corsa del sedile e del sottopavimento:

Tabella 7 - Risultati Manichino 1

	INCROCI								
	6000 N			7000 N			8000 N		
SEDILE	C.L.	C.S.	C.SOT.	C.L.	C.S.	C.SOT.	C.L.	C.S.	C.SOT.
9000 N	8788	194	190	8621	192	186	9174	193	172
10000 N	6195	194	190	5948	192	187	6323,02	192	173
11000 N	5938	183	190	6349	175	187	6539	180	175

C.L. = Carico Lombare ; C.S. = Corsa Sedile ; C.SOT. = Corsa Sottopavimento

Tabella 8 - Risultati Manichino 2

	INCROCI								
	6000 N			7000 N			8000 N		
SEDILE	C.L.	C.S.	C.SOT.	C.L.	C.S.	C.SOT.	C.L.	C.S.	C.SOT.
9000 N	9122	195	193	8690	193	194	7983	194	194
10000 N	7846	193	193	6269	193	194	6627	194	194
11000 N	8391	184	193	6346	175	194	6638	177	194

Tabella 9 - Risultati Manichino 3

	INCROCI								
	6000 N			7000 N			8000 N		
SEDILE	C.L.	C.S.	C.SOT.	C.L.	C.S.	C.SOT.	C.L.	C.S.	C.SOT.
9000 N	7504	185	165	8065	186	140	8872	186	121
10000 N	5358	184	168	6160	185	142	6978	186	122
11000 N	5782	168	169	5794	176	144	5695	186	124

I campi evidenziati in azzurro rappresentano le combinazioni di assorbitori in cui tutti e tre i manichini risultano avere un carico lombare accettabile che resta all'interno dei valori di sopravvivenza. Esistono anche configurazioni in cui non tutti e tre i manichini mantengono livelli di carico lombare accettabili (campi non evidenziati) e ciò dipende essenzialmente dal posizionamento sul sottopavimento.

Si nota inoltre una diminuzione della corsa del sedile all'aumentare della forza di innesco dell'assorbitore e lo stesso si può dire anche per quanto riguarda la variazione dei carichi degli incroci del sottopavimento.

Si analizzano le curve di alcune combinazioni di assorbitori significative per capire meglio cosa accade negli istanti di attivazione di sottopavimento e sedile.

Per esempio vengono confrontati i due casi in cui il sottopavimento presenta assorbitori da 7000 N ed il sedile da 9000 N e 10000 N. Nel primo caso i carichi lombari sono al di sopra di limiti di sopportazione del corpo umano, mentre nel secondo risultano adeguati.

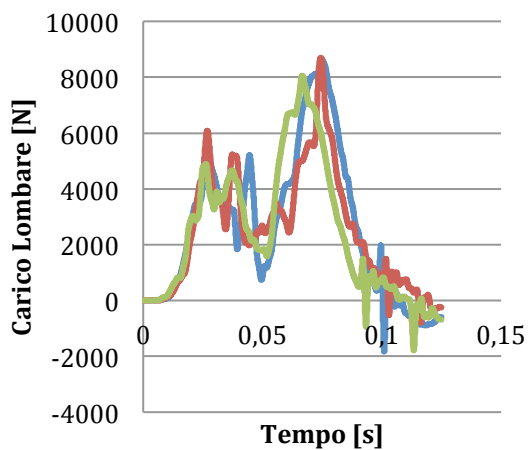


Figura 36 - Carichi lombari con assorbitori da 7000N – 9000N

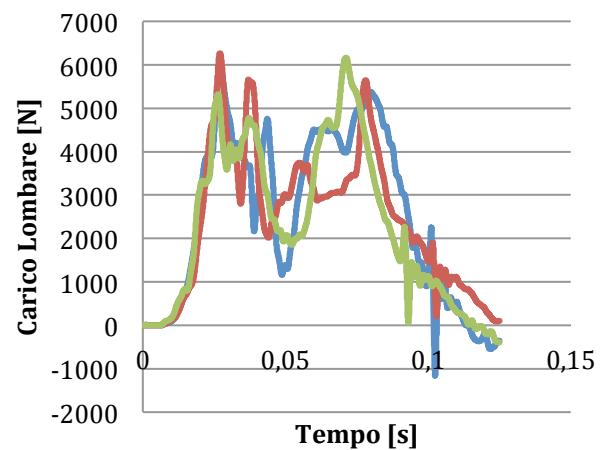


Figura 37 - Carichi lombari con assorbitori da 7000N – 10000N

Blu=Manichino1; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

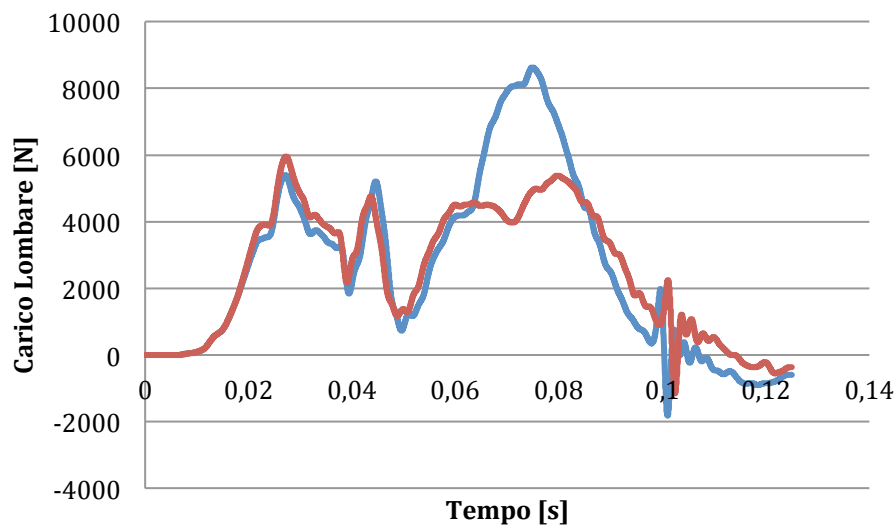


Figura 38 - Carichi lombari Manichino 1 con assorbitori del sedile differenti

Blu= SEDILE 9000 N ; Rosso = SEDILE 10000 N

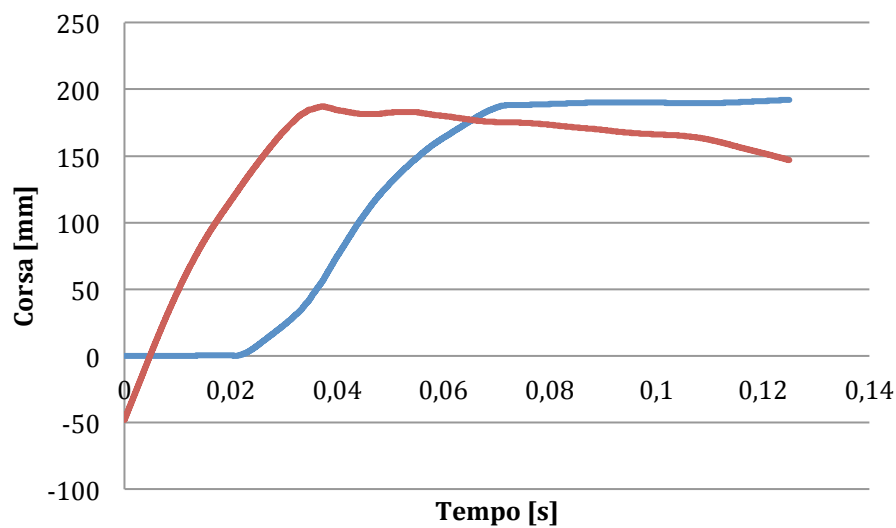


Figura 39 Corse Manichino 1 con assorbitori del sedile 9000 N

Blu= Corsa Sedile ; Rosso = Corsa Sottopavimento

Dai grafici di carico lombare si nota come il picco iniziale relativo al sottopavimento resti invariato in entrambe le configurazioni, cosa da ritenersi ragionevole in quanto

gli assorbitori nel sottopavimento sono i medesimi; la differenza di carico massimo sta nel fatto che l'assorbitore del sedile è quello che interviene direttamente nel secondo picco di carico.

I grafici delle corse del sottopavimento e del sedile fanno notare come i due lavorino in maniera quasi separata. Inoltre si può notare un leggero cambio di pendenza dell'assorbitore del sedile nel momento in cui il sottopavimento arriva allo schiacciamento massimo.

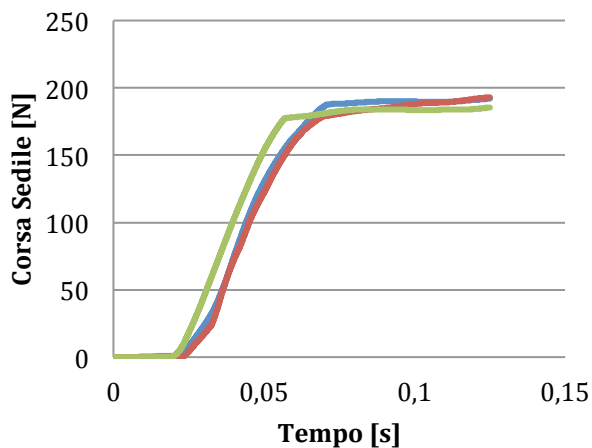


Figura 40 - Corse Sedili

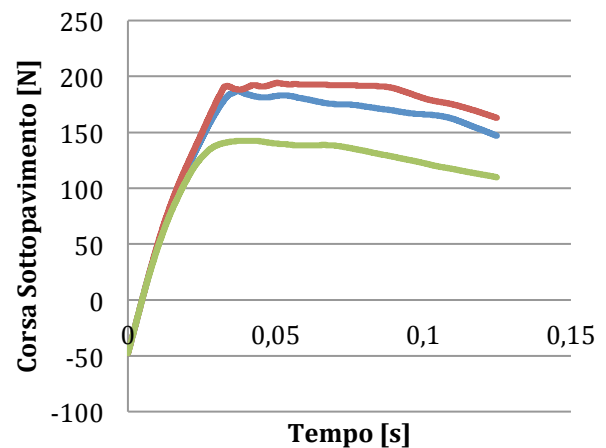


Figura 41 - Corse sottopavimento

Blu=Manichino1; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

Analizzando la diversità di comportamento in funzione della posizione del manichino sul sottopavimento si nota che gli occupanti centrali hanno comportamenti quasi identici sia in termini di carico lombare che di corse del sottopavimento e del sedile.

Il manichino frontale presenta dei carichi leggermente inferiori come anche schiacciamenti minori rispetto agli altri due manichini; questo è dovuto al fatto che i manichini centrali insistono entrambi sulle stesse file di assorbitori determinando uno schiacciamento costante, mentre quello frontale determina lo schiacciamento solo della parte su cui insiste.

3.2.2. Assorbitori elastici non perfettamente plastici

Gli assorbitori considerati fin'ora sono caratterizzati da una legge di tipo elastico perfettamente plastico. Si analizzano ora i risultati variando la tipologia di assorbitori del sedile ad elastici non perfettamente plastici in cui si ha un primo tratto elastico molto veloce ed un secondo descritto da una variazione lineare della parte plastica.

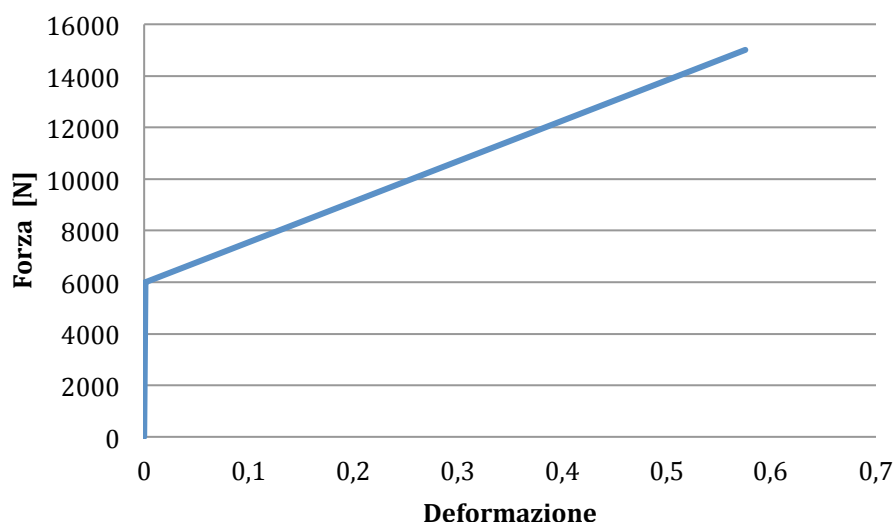


Figura 42 - Legge non perfettamente plastica degli assorbitori del sedile

La velocità considerata è sempre di 10 m/s, il valore di snervamento degli assorbitori del sottopavimento è stato mantenuto costante e pari a 6000 N, mentre i valori della variazione del campo plastico sono riportati di seguito:

Tabella 10 – Tratto plastico degli assorbitori analizzati

TRATTO PLASTICO LINEARE		
6000 - 12000	6000-15000	6000-18000
9000 - 12000	9000-15000	9000-18000

Nelle tabelle sottostanti vengono riportati i risultati ottenuti in termini di valori massimi di carico lombare, schiacciamento del sottopavimento e del sedile:

Tabella 11 - Risultati Manichino 1

	12000			15000			18000		
	C.L.	C.S.	C.SOTT.	C.L.	C.S.	C.SOTT.	C.L.	C.S.	C.SOTT.
6000	8041	192	185	7237	168	186	8550	142	187
9000	5662	184	187	7089	150	187	8486	127	187
C.L. = Carico Lombare ; C.S. = Corsa Sedile ; C.SOTT: = Corsa Sottopavimento									

Tabella 12 - Risultati Manichino 2

	12000			15000			18000		
	C.L.	C.S.	C.SOTT.	C.L.	C.S.	C.SOTT.	C.L.	C.S.	C.SOTT.
6000	8138	194	194	6374	172	194	7367	148	194
9000	6035	183	194	6310	154	193	7221	134	194

Tabella 13 - Risultati Manichino 3

	12000			15000			18000		
	C.L.	C.S.	C.SOTT.	C.L.	C.S.	C.SOTT.	C.L.	C.S.	C.SOTT.
6000	7634	187	138	5010	169	142	6420	143	144
9000	5235	184	142	5060	154	145	6339	129	147

Tra le configurazioni analizzate si evidenzia quella in cui tutti e tre i manichini mantengono un carico lombare accettabile, ovvero quella avente la parte plastica descritta da un tratto lineare da 9000 N a 12000 N.

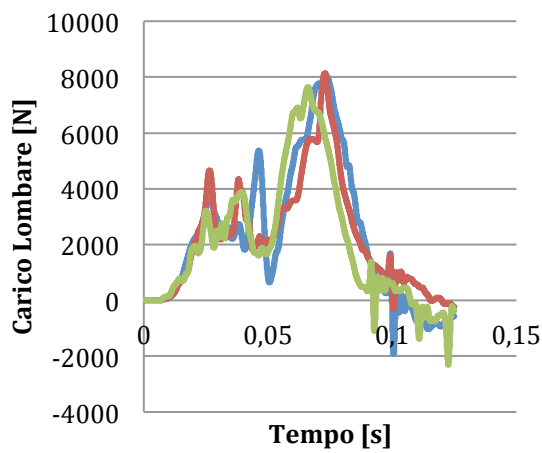


Figura 43 - Carichi lombari assorbitori campo plastico 6000N-12000N

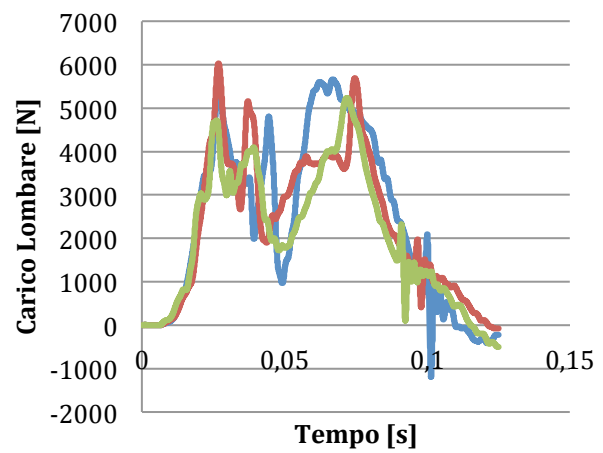


Figura 44 - Carichi lombari assorbitori campo plastico 9000N-12000N

Blu=Manichino1; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

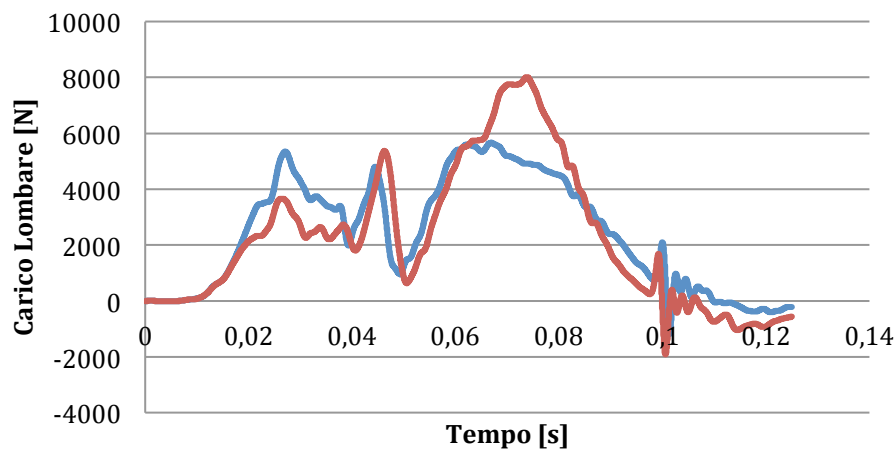


Figura 45 - Carico lombare Manichino 1 al variare dell'assorbitore del sedile
 Blu= 9000 N ; Rosso = 6000 N

I grafici del carico lombare evidenziano come il secondo picco generato dallo schiacciamento dell'assorbitore del sedile sia molto maggiore nell'assorbitore da 6000 N rispetto a quello da 9000N. Nel secondo caso, infatti, la parte assorbita dal sottopavimento rimane molto ben equilibrata rispetto a quella assorbita dal sedile. Inoltre isolando il carico riferito al Manichino1 si evidenzia come la parte assorbita dal sottopavimento sia molto maggiore nel caso a 9000 N per il fatto che il sedile ritarda ad attivarsi lasciando assorbire ulteriore energia al sottopavimento. Questo fatto viene confermato dal confronto delle curve delle corse del sedile riportate di seguito.

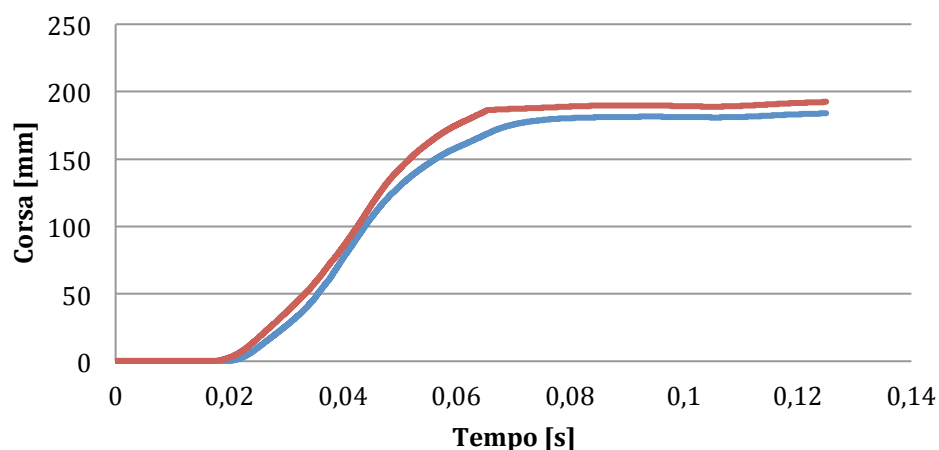


Figura 46 - Corsa del sedile del Manichino 1 al variare dell'assorbitore del sedile
 Blu= 9000 N ; Rosso = 6000 N

3.3. Indagine sull'effetto della velocità di impatto

Si analizza ora come la velocità d'impatto influenzi i valori di carico lombare al variare delle combinazioni di assorbitori considerate.

Sono state eseguite delle analisi variando la velocità di caduta mantenendo fissi o gli assorbitori del sedile o quelli del sottopavimento ed andando a confrontare i dati.

Nella tabella vengono riportati i valori degli assorbitori e delle velocità analizzate con i relativi picchi di carico lombare e corse del sedile:

Tabella 14- Risultati ottenuti Manichino 1

		INCROCI							
		5000 N		6000 N		7000 N		8000 N	
SEDILE		C.L.	C.S.	C.L.	C.S.	C.L.	C.S.	C.L.	C.S.
9000 N	8 m/s	5055	125	5266	137	5406	153	5595	163
	10 m/s	10880	197	8788	194	8621	192	9174	193
10000 N	8 m/s	5498	105	5740	117	5900	129	6020	141
	10 m/s	7256	197	6195	194	5948	192	6323	192
11000 N	8 m/s	5820	91	6069	102	6325	115	6591	125
	10 m/s	7615	196	5938	183	6349	175	6539	180

Tabella 15 - Risultati ottenuti Manichino 2

		INCROCI							
		5000 N		6000 N		7000 N		8000 N	
SEDILE		C.L.	C.S.	C.L.	C.S.	C.L.	C.S.	C.L.	C.S.
9000 N	8 m/s	5041	125	5487	132	5975	146	6483	157
	10 m/s	9711	198	9122	195	8690	193	7983	194
10000 N	8 m/s	5418	106	5609	111	6177	126	6794	135
	10 m/s	9866	197	7846	193	6269	193	6627	195
11000 N	8 m/s	5726	91	6128	94	6249	108	6933	118
	10 m/s	10404	194	8391	184	6346	174	6638	177

Tabella 16 - Risultati ottenuti Manichino 3

		INCROCI							
		5000 N		6000 N		7000 N		8000 N	
SEDILE		C.L.	C.S.	C.L.	C.S.	C.L.	C.S.	C.L.	C.S.
9000 N	8 m/s	5184	144	5226	157	5106	161	5067	163
	10 m/s	6225	186	7504	185	8065	186	8872	186
10000 N	8 m/s	5557	125	5677	136	5574	142	5495	146
	10 m/s	5344	184	5358	184	6160	185	6978	186
11000 N	8 m/s	5841	109	6012	119	6049	126	6034	130
	10 m/s	5624	163	5782	168	5794	176	5695	186

All'aumentare della rigidezza degli assorbitori del sedile, a parità di assorbitore del sottopavimento, la corsa alla stessa velocità diminuisce, mentre invece a parità di assorbitore del sedile all'aumentare del valore dell'assorbitore del sottopavimento la corsa del sedile aumenta.

Un risultato interessante si ha notando che a parità di assorbitori un aumento di velocità fa diminuire il carico lombare massimo. Si riportano quindi i grafici dei carichi lombari e le corse dei sedili per cercare di capire meglio questi risultati di non immediata comprensione.

SEDILO 10000 N – SOTTOPAVIMENTO 7000 N

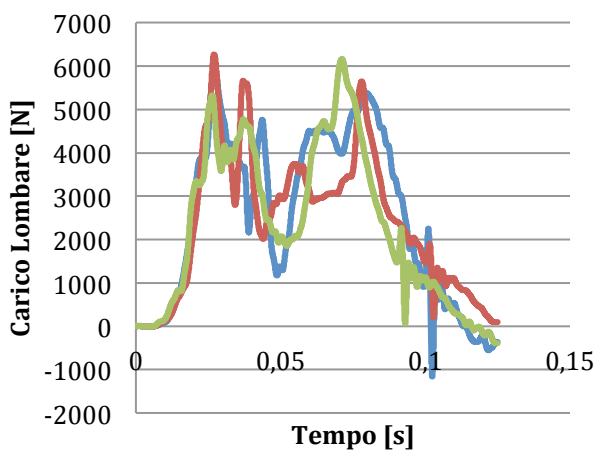


Figura 47 – Carichi lombari a 10 m/s

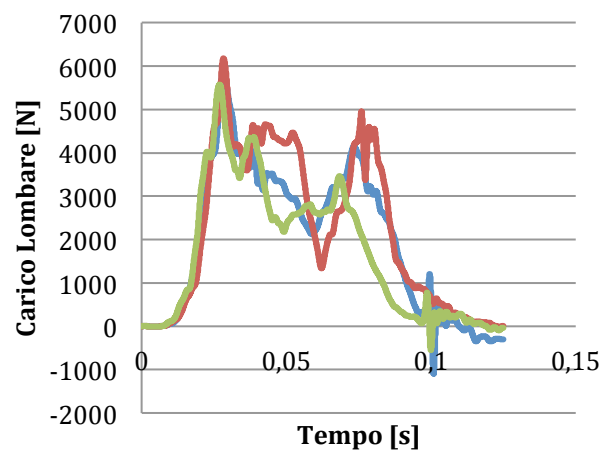


Figura 48 - Carichi lombari a 8 m/s

Blu= Manichino1 ; Rosso = Manichino2; Verde=Manichino3

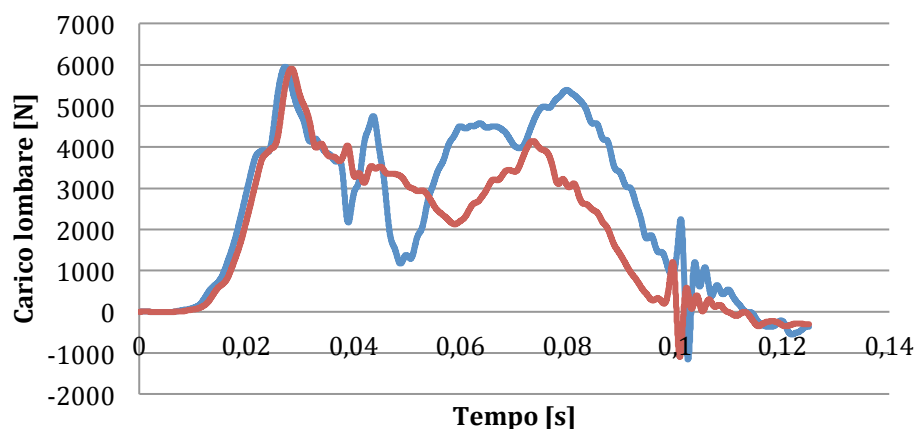


Figura 49 - Carico lombare Manichino 1 al variare della velocità di impatto

Blu= 10 m/s ; Rosso = 8 m/s

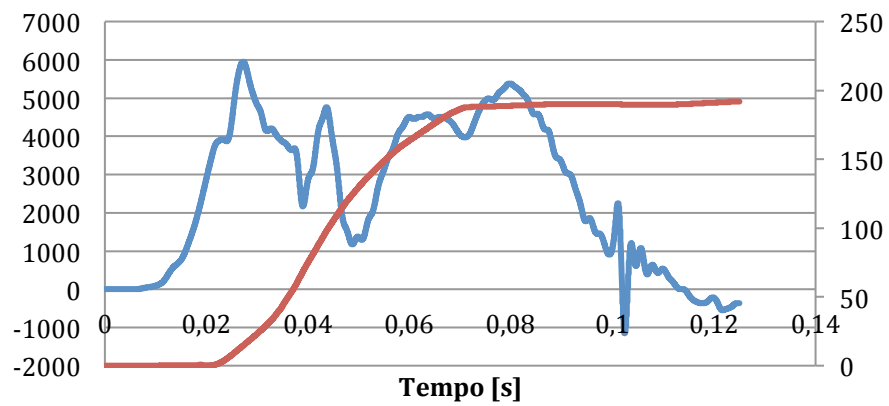


Figura 50 - Carico lombare e corsa sedile Manichino 1 a 10 m/s
 Blu= Carico Lombare [N]; Rosso = 8 m/s

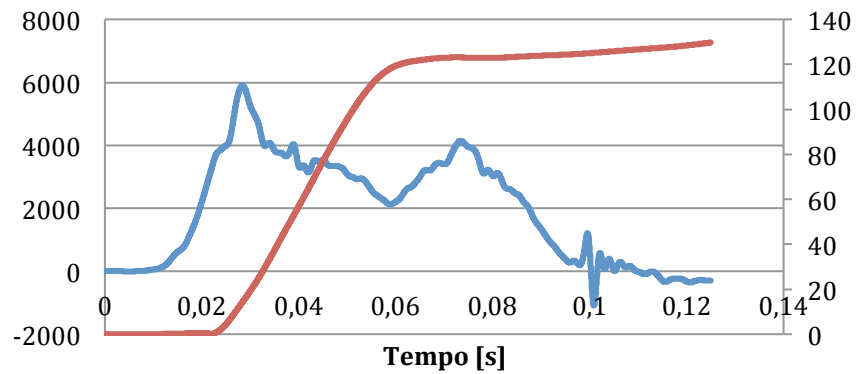


Figura 51- Carico lombare e corsa sedile Manichino 1 a 8 m/s
 Blu= Carico Lombare [N]; Rosso = Corsa Sedile [mm]

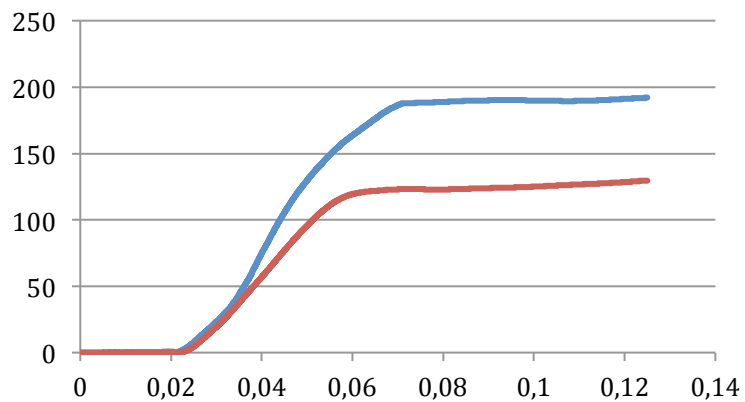


Figura 52 - Corsa sedile Manichino 1 a 8 m/s e 10 m/s
 Blu= 10 m/s; Rosso = 8 m/s

I carichi rimangono circa gli stessi per il fatto che il valore massimo è dato sempre dal picco iniziale causato dallo schiacciamento del sottopavimento. Il secondo picco, considerando la velocità d'impatto ad 8 m/s, risulta essere molto più contenuto rispetto a quello a 10 m/s ed anche le corse del sedile sono molto inferiori. Nel caso a 10 m/s, inoltre, il sottopavimento raggiunge lo schiacciamento massimo e la corsa del sedile varia la sua pendenza generando un picco (circa 0,5 secondi).

Individuando, quindi, una combinazione di assorbitori che permetta di massimizzare le capacità di assorbimento di energia degli incroci del sottopavimento e dell'attenuatore di energia installato nel sedile è possibile ottenere curve di carichi lombare inferiori ai valori limite per entrambe le velocità di impatto.

4. Modellazione del carrello di atterraggio

4.1. Carrello anti-crash

Gli elementi di assorbimento di energia da installarsi nei sottopavimenti, come detto nel capitolo xx, possono essere realizzati sfruttando il collasso plastico controllato di elementi in lega d'alluminio caricati assialmente. Per quanto riguarda i carrelli di atterraggio, stadi addizionali di assorbimento di energia possono essere realizzati con tubi in lega leggera di alluminio e installati negli ammortizzatori oleopneumatici per permettere al carrello di fornire un adeguato contributo in condizioni di *crash*. La Fig. 26 mostra i possibili schemi strutturali per l'introduzione dello stadio addizionale di energia in un carrello la cui struttura comprende elementi a rottura programmata (punti a, b e c in Figura 53-A). La rottura di tali vincoli permette lo scorrimento relativo fra le parti del carrello e l'ingaggio dell'elemento sacrificale che si deforma assorbendo energia (Figura 53-B).

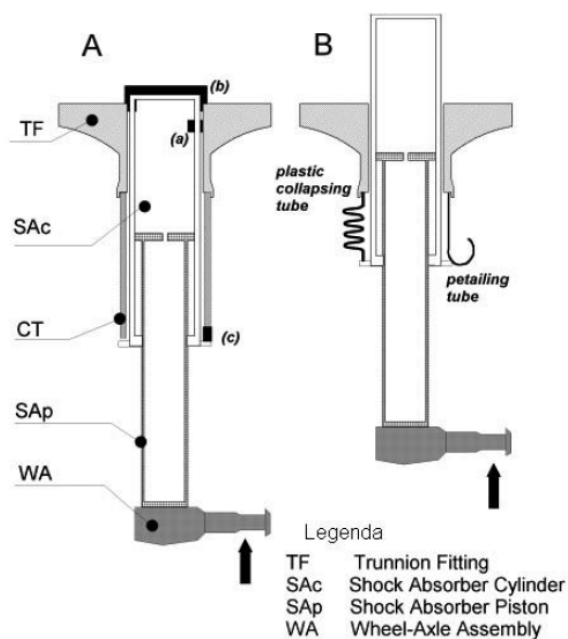


Figura 53
Schema strutturale della cartuccia a crash

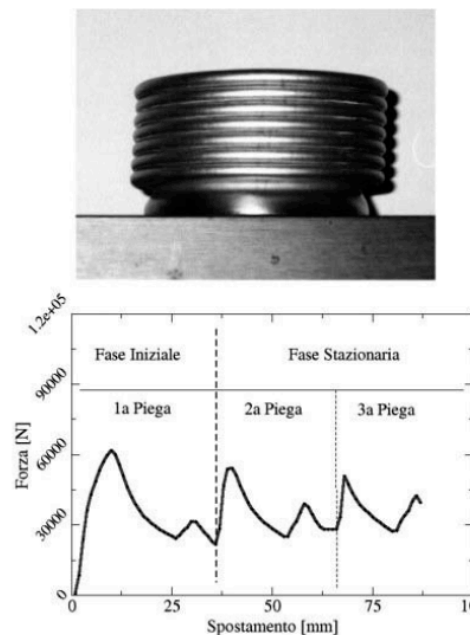


Figura 54
Collasso Plastico di un tubo cilindrico

Il funzionamento di questi sistemi può essere analizzato, nei suoi aspetti generali, indagando il collasso plastico di cilindri in lega d'alluminio che avviene tipicamente con la formazione di pieghe successive, come evidenziato nell'esempio in Fig. 54. La risposta dell'elemento soggetto ad uno schiacciamento in direzione assiale è

caratterizzata da una serie di oscillazioni, che corrispondono alla formazione delle pieghe, attorno ad un livello costante di forza.

La curva in Fig.54 è caratteristica di questo tipo di assorbitori. La progettazione dei sistemi d'assorbimento di energia deve tenere conto dei vincoli di progetto rappresentati dalla corsa disponibile, s_{max} , che è sempre comunque limitata dagli ingombri del veicolo, e dalla massima forza ammissibile, F_{max} , determinata dalle massime sollecitazioni che possono essere trasmesse alla struttura o agli occupanti. Tali vincoli comportano che la massima efficienza dell'assorbitore si ottiene massimizzando il fattore di ricoprimento del rettangolo $F_{max} \cdot s_{max}$ da parte delle curva forza-schiacciamento.

Si massimizza in questo modo l'energia assorbita per un dato schiacciamento, s .

4.2. Modello multi-corpo carrello

Come carrello d'atterraggio è stato utilizzato come riferimento una configurazione standard ricreata in Abaqus/Explicit con un modello multicorpo.

Ad esso è stato aggiunto un elemento in parallelo all'ammortizzatore per simulare la presenza della cartuccia anti-*crash*.

Lo sviluppo del lavoro si è quindi concentrato sulla progettazione di un carrello che consentisse l'installazione del sistema, risolvendo numerose problematiche funzionali e strutturali. Le analisi del carrello sono state eseguite utilizzando un modello multicorpo a parametri concentrati ed elementi rigidi. Con questo schema semplificato è stato possibile verificare la modellazione della cinematica del sistema e la risposta dell'assorbitore di energia e del pneumatico.

Con questo schema sono state eseguite le verifiche delle prestazioni del carrello in *normal* e *hard landing*, condizioni in cui le prestazioni sono determinate esclusivamente dal comportamento della parte oleodinamica dell'ammortizzatore e del pneumatico e sono state eseguite delle analisi anche in condizioni di *crash landing* per verificare l'effettiva deformazione della cartuccia inserita ed il suo corretto comportamento.

Di seguito viene descritto il modello di carrello creato concentrandosi principalmente sugli elementi di assorbimento.

4.2.1. Schema a corpi rigidi

4.2.1.1. Sistemi di Riferimento

Il modello multi corpo è stato strutturato attraverso corpi rigidi e travi deformabili. Definiamo, all'interno del modello, i seguenti sistemi di riferimento:

- Un sistema detto *assi elicottero*, con asse x coincidente con l'asse di beccheggio dell'elicottero e diretto da destra verso sinistra, asse y diretto come l'asse di rollio, rivolto verso la coda del velivolo e asse z diretto come l'asse d'imbardata e rivolto verso l'alto.
- Un secondo sistema di riferimento detto *assi modello*, con asse x coincidente con l'asse x nel sistema elicottero e ruotato di -5° rispetto allo stesso asse. Le coordinate nodali del modello sono riferite agli assi modello.
- Un sistema di riferimento, indicato come *assi cilindro*, solidale al cilindro, con asse x coincidente con l'asse dell'assorbitore e asse z coincidente con l'asse x in assi modello.

Gli assi modello ed assi elicottero restano fissi durante tutto l'intervallo di tempo di analisi.

Tutti i vincoli cinematici, applicati direttamente sui gradi di libertà dei nodi, vengono riferiti alle coordinate assi modello.

Le grandezze vettoriali, risultati dall'analisi, sono riferite al medesimo sistema di riferimento.

Il carrello è posto con un'inclinazione di 5° in avanti rispetto alla verticale del terreno per ridurre il pericolo di impuntamenti all'inizio della fase di rotazione durante il collasso della cartuccia.

4.2.1.2. Elemento Fusoliera

La struttura dell'elicottero è modellata attraverso un corpo rigido chiamato fusoliera. L'elemento fusoliera è definito da 4 nodi: 3 nodi, che indichiamo rispettivamente come *CernieraCollare*, *CernieraRetroazioneaTerra* e *CernieraMartinetto*, sono posti in corrispondenza della proiezione, sul piano di simmetria dell'elicottero, dei punti di vincolo degli sbracci, dell'attacco in fusoliera dell'asta di retroazione e del punto d'attacco in fusoliera del martinetto di retroazione; il 4° nodo, indicato come *NodoMassa* è posto ad una distanza di 100 mm lungo l'asse z, in assi modello, dalla superficie superiore del cilindro, d'ora in avanti indicata come cielo del cilindro. In corrispondenza del *NodoMassa* è applicata una massa concentrata di 1600 kg.

La struttura del carrello è schematizzata con due corpi rigidi definiti cilindro e pistone; in questo modello sono state trascurate tutte le restanti parti, ininfluenti dal

punto di vista della cinematica e della verifica delle prestazioni in condizioni diverse dal quelle di *crash*.

4.2.1.3. Elemento Cilindro

E' definito con 3 nodi, rispettivamente detti *NodoCilindro*, *NodoCieloCilindro*, *CernieraRetroazioneCilindro*.

Il *NodoCilindro* è posto in corrispondenza della traccia, sul piano xy, dell'asse degli sbracci del collare, coincidente con il *NodoCernieraCollare*.

Il *NodoCieloCilindro* è posto in corrispondenza del punto centrale della superficie superiore del cilindro, detta *CieloCilindro*

Il *NodoCernieraRetroazioneCilindro* è posto in corrispondenza della traccia, sullo stesso piano, dell'asse dell'asole d'attacco dell'asta di retroazione al cilindro.

Sul *NodoCilindro*, assunto come riferimento per il corpo rigido, è applicata una massa concentrata di 12 kg.

4.2.1.4. Elementi Cartuccia Anti-crash

Il corpo rigido è definito attraverso tre nodi: il primo è il nodo relativo al collegamento della cartuccia con la retroazione del carrello; questo permette alla struttura di traslare assieme alla cartuccia mentre essa si deforma. Il secondo è un nodo creato ad una distanza di 266mm , pari alla lunghezza della cartuccia, dal *NodoCernieraCollare*, mentre il terzo corrisponde al nodo superiore coincidente al *NodoMassachiamato NodoCollare* che permette le rotazioni del carrello.

4.2.1.5. Elemento Pistone

L'elemento pistone è strutturato con 3 nodi, rispettivamente detti *NodoPistone*, *NodoAssePistone* e *NodoPiedePistone*.

Il *NodoPistone* è collocato in corrispondenza del centro della superficie superiore del pistone, denominata *CieloPistone*.

Il *NodoPiedePistone* è posto sull'asse del mozzo, in corrispondenza della verticale, in assi elicottero, del punto di contatto tra il pneumatico e il suolo.

Il *NodoAssePistone* è posto in coincidenza dell'intersezione tra l'asse del pistone e l'asse del mozzo.

Sul *NodoPistone*, assunto come riferimento per il corpo rigido, è applicata una massa concentrata di 12 kg.

Oltre ai corpi rigidi, sopra elencati, il modello presenta tre gruppi di 5 travi deformabili rappresentanti rispettivamente le due aste di retroazione ed il martinetto di retroazione.

4.2.1.6. Pneumatico

Lo pneumatico è stato modellato attraverso un elemento monodimensionale, indicato come *Spring_Tyre*, con caratteristica lineare a tratti come riportato nella figura sottostante:

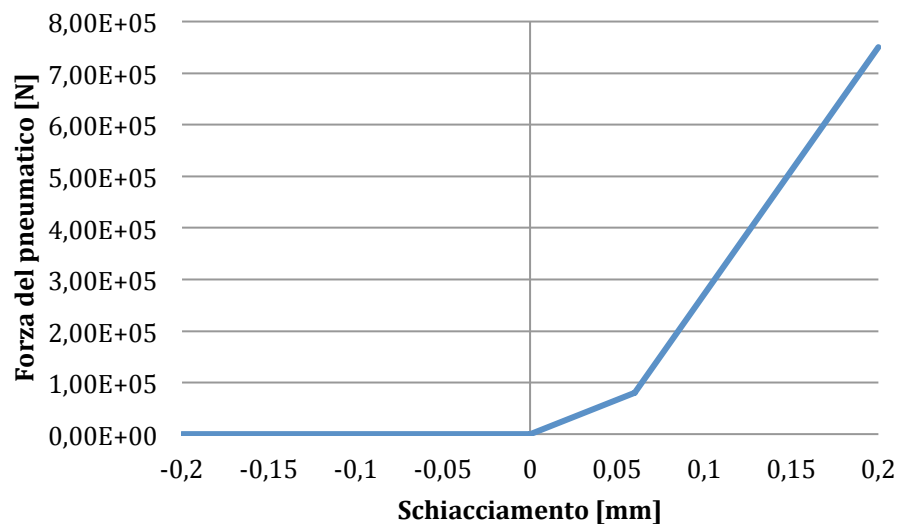


Figura 55
Legge costitutiva del pneumatico

La legge costitutiva del pneumatico è stata determinata riferendosi a comportamenti tipici reperibili in letteratura.

Il dimensionamento del pneumatico e delle parti direttamente collegate, quali cerchione, mozzo e portamozzo, è un aspetto della progettazione che non è stato affrontato durante il lavoro fin qui svolto. La curva di risposta di un pneumatico con schiacciamento massimo, prima del fine corsa, si considera, da letteratura, di 80 mm.

La caratteristica del pneumatico è riprodotta come una molla lineare a tratti:

per Δx negativi, fisicamente interpretabili come il sollevamento del pneumatico da terra, la forza corrisposta è nulla.

Per Δx positivi, la forza è direttamente proporzionale allo schiacciamento, con una rigidità $k = 9,98E + 003 \text{ N/m}$.

Si definiscono un *NodoPneumatico* posto nel punto di contatto del pneumatico con il suolo, e un nodo, detto *NodoAttaccoRuota*, coincidente all'istante iniziale con la posizione del *NodoTerra*.

L'elemento molla è interposto tra *NodoPneumatico* e *NodoAttaccoRuota*.

Sul *NodoPneumatico* è applicata una massa concentrata di 5 kg.

4.2.1.7. 1° Asta di retroazione

Strutturata con 6 elementi monodimensionali deformabili collega il cilindro, dal *Nodo CernieraRetroazioneCilindro* al martinetto di retroazione e alla 2° asta di controventatura.

I nodi delle travi sono nominati *NodiBeam1* fino a *NodiBeam7*, partendo con la numerazione dalla 2° asta di retroazione fino al cilindro.

4.2.1.8. 2° Asta di retroazione

Strutturata con 4 elementi monodimensionali deformabili collega la fusoliera, dalla *CernieraRotazioneaTerra* al martinetto di retroazione e alla 1° asta di controventatura.

I nodi delle travi sono nominati *NodiBeam21* fino a *NodiBeam25*, partendo dalla cerniera in fusoliera fino alla 1° asta di retroazione.

4.2.1.9. Martinetto di retroazione

Strutturata con 4 elementi monodimensionali deformabili collega la fusoliera, dalla *CernieraMartinetto* alle due aste di retroazione.

I nodi delle travi sono nominati *NodiMartinetto1* fino a *NodiMartinetto5*, partendo dalla cerniera a terra fino alla 1° asta di retroazione.

Oltre agli elementi descritti, s'introducono nel modello alcuni nodi isolati:

4.2.1.10. Riferimenti fissi

S'introducono due nodi di riferimento fissi durante tutta l'analisi numerica.

Il primo nodo, detto *NodoTerra*, è posto ad una distanza di 200 mm, calcolati lungo l'asse z negativo in assi modello, sulla verticale, in direzione z in assi elicottero, passante per il Nodo Piede Pistone, all'istante iniziale.

Il secondo nodo, detto *NodoRiferimentoMassa*, è posto in corrispondenza del *NodoMassa* all'istante iniziale

I due nodi permettono di definire relazioni cinematiche con altre parti del modello, avendo un riferimento solidale con il terreno, durante tutta l'analisi numerica.

4.2.1.11. Connessioni tra i corpi rigidi

Le interazioni tra i corpi rigidi e le travi del sistema di retroazione sono modellate attraverso elementi funzionali, definiti *connector* che sono privi di caratteristiche strutturali, ma stabiliscono esclusivamente delle relazioni tra i gradi di libertà dei nodi che coinvolgono.

- Cerniera tra fusoliera e cilindro
- Cerniera tra pneumatico e pistone
- Cerniere del sistema di retroazione
- Cerniera tra nodo massa e nodo collare
- Moto relativo tra Cilindro e Pistone
- Caduta verticale della Massa
- Traslazione Verticale del pneumatico
- Moto planare del pneumatico

4.2.1.12. Modellazione dell'assorbitore di energia

Gli elementi di connessione, oltre ad introdurre vincoli cinematici tra due nodi, consentono di definire una legge costitutiva associata al moto relativo imposto. Sfruttando questa caratteristica, è possibile modellare la risposta dell'ammortizzatore, attraverso la creazione di tre elementi translator disposti in parallelo sulla medesima coppia di nodi.

4.2.1.13. Modellazione della trasformazione adiabatica del gas

E' stato creato un elemento di tipo *translator*, che identifichiamo come *ConnectorAdiabatic*, applicato alla coppia di nodi *CieloCilindro* e *CieloPistone*, imponendo una legge di moto relativo vincolata lungo l'asse x in assi cilindro.

Successivamente è stata imposta, al *connector*, una legge costitutiva elastica non lineare che riproduce la risposta adiabatica dell'ammortizzatore.

Il comportamento è stato modificato per valori negativi del Δx , corrispondenti all'espansione dell'ammortizzatore, per simulare la reazione di equilibrio tra cilindro e pistone dovuta alla forza statica F_0 .

Per valori $\Delta x < 0$ la curva presenta un andamento lineare con rigidità pari alla forza statica $F_0=9,055E+006$ N/m. Si assume un punto di equilibrio per l'assorbitore di energia a $\Delta x = -1$ mm.

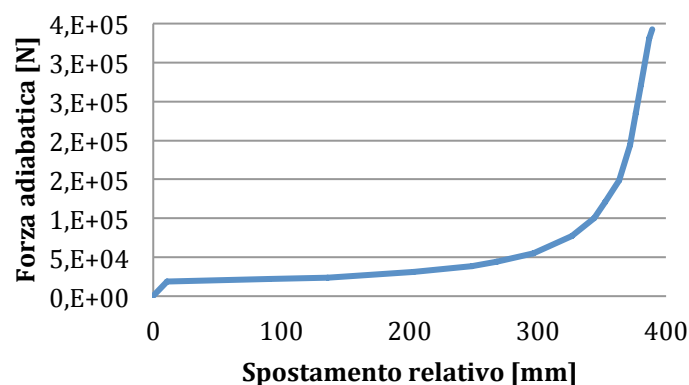


Figura 56

Andamento della curva di risposta dell'elemento *ConnectorAdiabatic*.

Si noti l'andamento molto ripido nel primo tratto per la modellazione della reazione tra cilindro e pistone alla forza di precarica

4.2.1.14. Modellazione della componente viscosa

La modellazione è stata eseguita realizzando un *elementotranslator* tra i nodo *CieloCilindro* e *CieloPistone*.

La curva viscosa, è stata descritta come segue:

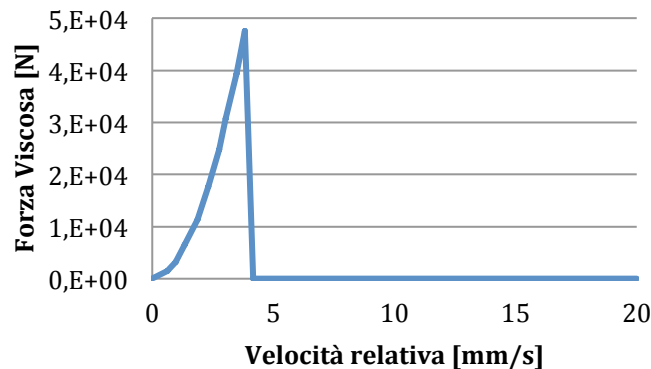


Figura 57
Comportamento viscoso

Al connector, che indichiamo come *ConnectorDamperK1*, è stato assegnato un comportamento viscoso relativo alla costante K_1 .

4.2.1.15. Modellazione della cartuccia Anti-Crash

La cartuccia anticrash è stata inserita in parallelo al cilindro modellandola con un elemento di trave in lega leggera di alluminio, caratterizzata con una *beam general section*, imponendo le dimensioni di diametro, spessori ed inerzie relative ad un tubo d'alluminio delle dimensioni riportare di seguito:

Altezzacartuccia	266,80 mm
raggiomedio	56,500 mm
spessore	2,200 mm

La forza a cui deve resistere è un carico assiale di 7500N. Questo deriva dal fatto che si sta considerando il carrello posteriore dell'elicottero sul quale insiste una massa di circa 1500Kg. Inoltre il carrello, come descritto nel primo capitolo, viene progettato in condizione di hard landing poiché ciò che si vuole è che esso si deformi parzialmente in queste condizioni di atterraggio ammettendo sforzi anche superiori al limite elastico dei materiali, mantenendo un margine di plasticizzazione per permettere ulteriore assorbimento di energia in condizioni di atterraggio *crash*.

La resistenza assiale deve dunque essere:

$$Cs \times W \times g = (5 \times 9,81 \times 1500) N = 7500 N$$

Dove con Cs si è indicato il Coefficiente di sicurezza pari a 5 in condizioni di hard landing, con W la massa che insiste sul carrello e con g l'accelerazione di gravità. La cartuccia sarà dunque fatta deformare nel momento in cui la forza assiale supera questo limite.

4.3. Prove di collaudo del modello

Il carrello è stato provato nelle tre condizioni di atterraggio ed i risultati ottenuti sono stati i seguenti:

4.3.1. Normal landing

E' stata applicata, a tutti i nodi del modello una velocità di caduta iniziale di 3,05 m/s. Dovendo inserire le condizioni al contorno in assi modello, la velocità è stata scomposta nelle due componenti. In assi modello, e nel sistema di misura adottato :

$$v_z^{\text{lim}} = -3.038394E + 003 \text{ mm/s} \quad e$$

$$v_y^{\text{lim}} = 2,65825E + 002 \text{ mm/s}$$

In condizione di contingenza si considera da normativa, un fattore di portanza residua $L/R=0,67$. Si è tenuto conto di questo valore della portanza applicando alle masse concentrate del modello una forza verticale pari a 1/3 della forza di gravità.

I risultati ottenuti dimostrano la capacità del carrello di assorbire completamente l'energia cinetica che si sviluppa. La massa applicata al carrello viene completamente rallentata, fino all'inversione.

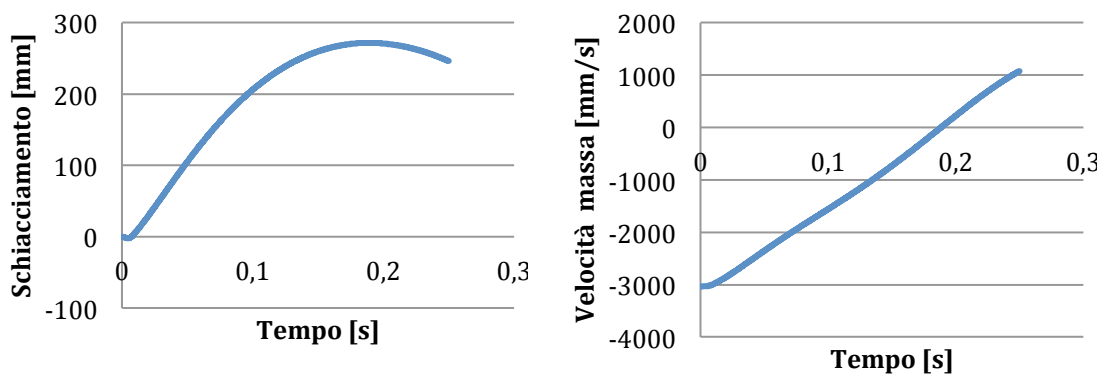


Figura 58 – Andamento della corsa del carrello e delle velocità della massa nel tempo

La corsa complessiva del carrello è di 305,4 mm (Fig.58).

La forza che si sviluppa nell'assorbitore di energia (Fig. 59) raggiunge il valore massimo di 36700 N nello stesso istante, con una corsa massima effettuata 269 mm (Fig.61).

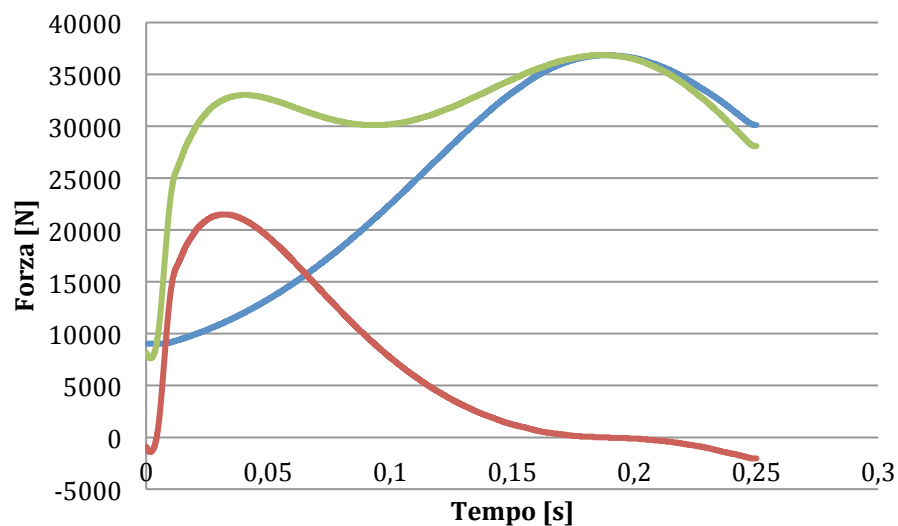


Figura 59 - Andamento della risposta dell'assorbitore di energia in funzione del tempo
Rosso = Viscosa ; Blu = Adiabatica ; Verde = Risposta totale

L'andamento della curva di risposta dell'ammortizzatore presente due picchi corrispondenti agli istanti di massimo contributo della parte viscosa, in concomitanza con la massima velocità relativa dell'assorbitore, e della forza di compressione adiabatica del gas, nel punto di massima compressione.

I picchi decrescenti nei primissimi istanti della prova numerica sono imputabili all'effetto, sulla risposta adiabatica, dell'espansione iniziale dell'assorbitore, dovuta al precarico del gas, prima del raggiungimento del fondo corsa.

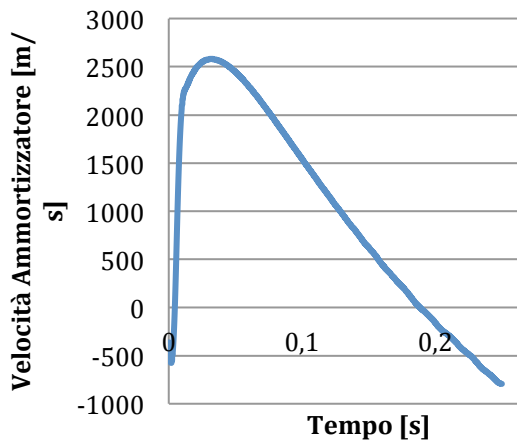


Figura 60
Curva della velocità dell'ammortizzatore

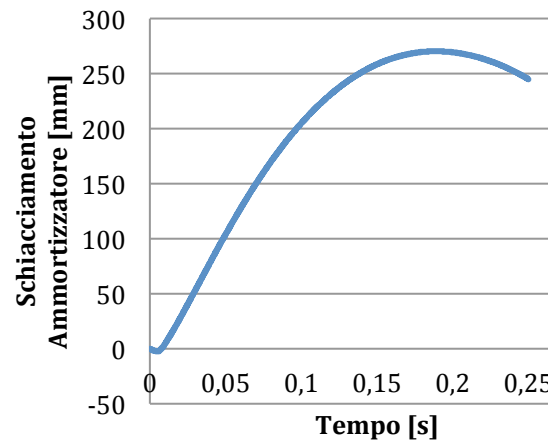


Figura 61
Curva dello schiacciamento dell'ammortizzatore

La risposta del pneumatico mostra un andamento del tutto simile a quello della forza all'interno dell'assorbitore, con una reazione massima al suolo di 37505,9 N. La differenza tra i valori di forza massima è imputabile al diverso sistema di riferimento, con le rette di applicazione ruotate tra loro di 5° , e alle forze d'inerzia del pistone, che non influenzano la risposta dell'ammortizzatore, ma che si scaricano sul pneumatico.

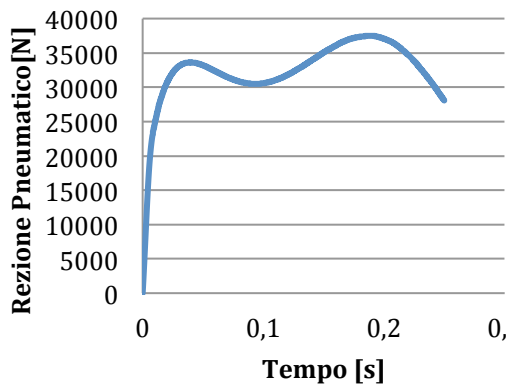


Figura 62 - Reazione del pneumatico

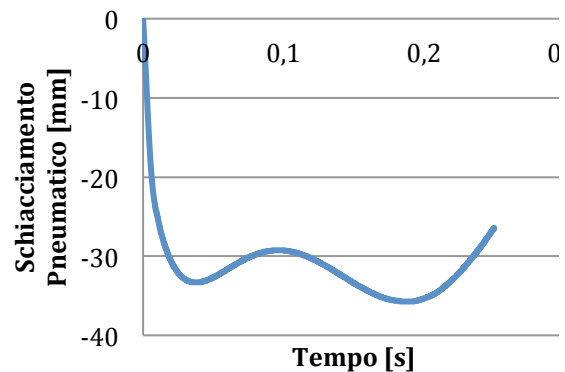


Figura 63 - Schiacciamento del pneumatico

Si verifica, dall'analisi delle curve relative al pneumatico, il mancato raggiungimento del fondo corsa, confermato da uno schiacciamento massimo di 35,76 mm nell'istante di massima forza

Dalla forza applicata alla massa, è possibile ricavare il fattore di carico al carrello in funzione del tempo e della corsa totale del carrello (Fig. 64 – Fig. 65).

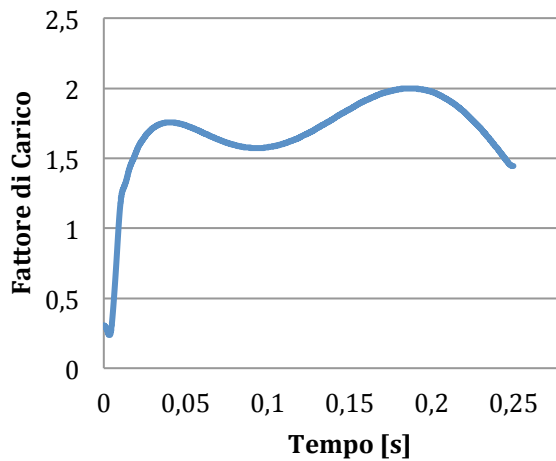


Figura 64 - Fattore di carico al carrello

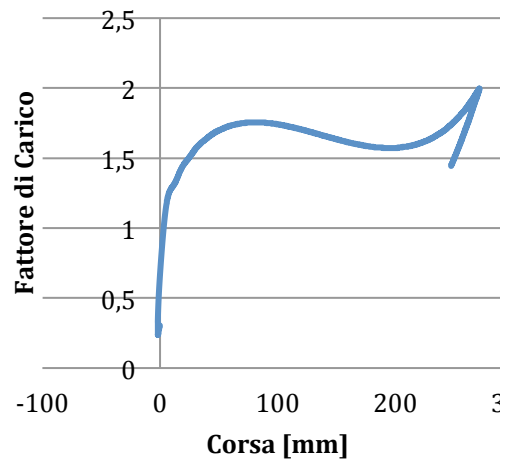


Figura 65 - Fattore di carico in funzione della corsa complessiva del carrello

Considerando il fattore di portanza residua si può determinare il fattore di carico baricentrico. Il valore massimo raggiunto è: $N_{LG}=1,998$ e $n_{CG}=2,668$

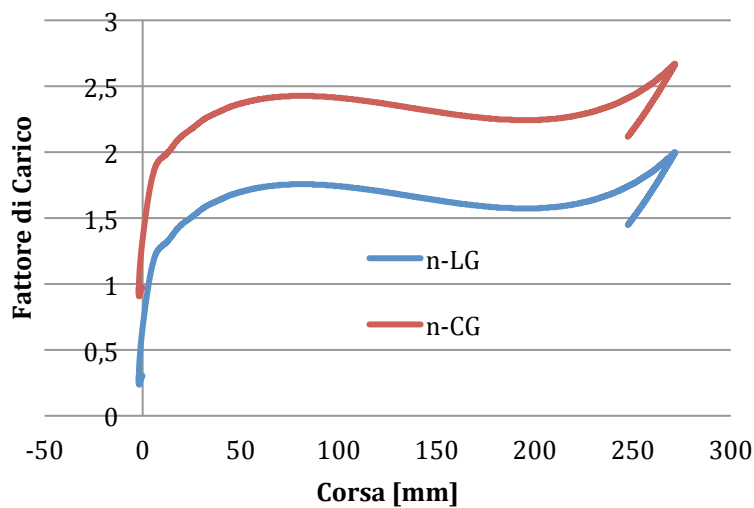


Figura 66 - Fattore di carico al carrello (n-LG) e al baricentro (n-CG) della corsa complessiva del carrello

Valutando anche lo schiacciamento della cartuccia anticrash si nota che esso resta molto piccolo in quanto non si hanno forze in gioco tali da deformare plasticamente la cartuccia:

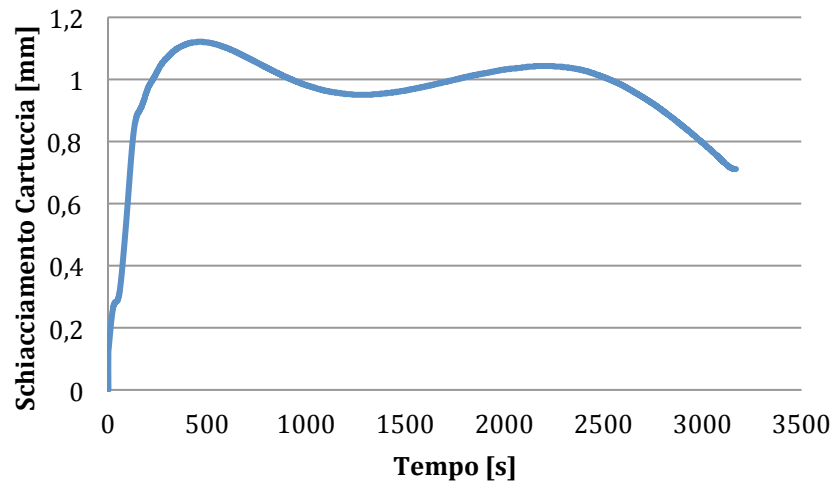


Figura 67 - Schiacciamento della cartuccia

4.3.2. Hard Landing

E' stata imposta una velocità di caduta iniziali di 4,57 m/s.

La velocità è stata scomposta nelle due componenti in assi modello e nel sistema di misura adottato:

$$v_z^{hard} = -4.55261E+003 \text{ mm/s} \quad e$$

$$v_y^{hard} = 3,99273E+002 \text{ mm/s}$$

In condizione di hard landing si considera da normativa un fattore di portanza residue $L/R=1$.

Si è tenuto conto di questo valore della portanza trascurando il contributo delle forza di gravità.

Anche in queste condizioni il carrello risponde ai requisiti, senza manifestare l'intervento il collasso della cartuccia.

La massa applicata al carrello viene completamente rallentata, fino all'inversione, nel tempo di 0,1513 s, come mostra la Fig.68.

La corsa complessiva sviluppata dall'intero carrello è 325,8 mm.

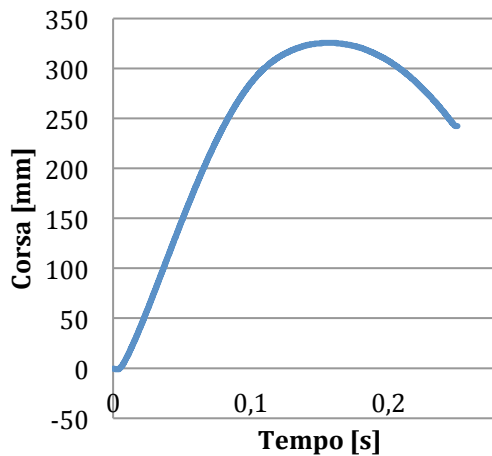


Figura 68 - Andamento della corsa complessiva del carrello

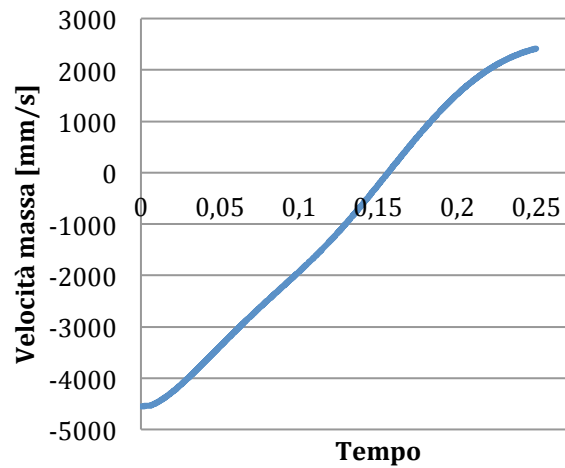


Figura 69 - Andamento della velocità della massa

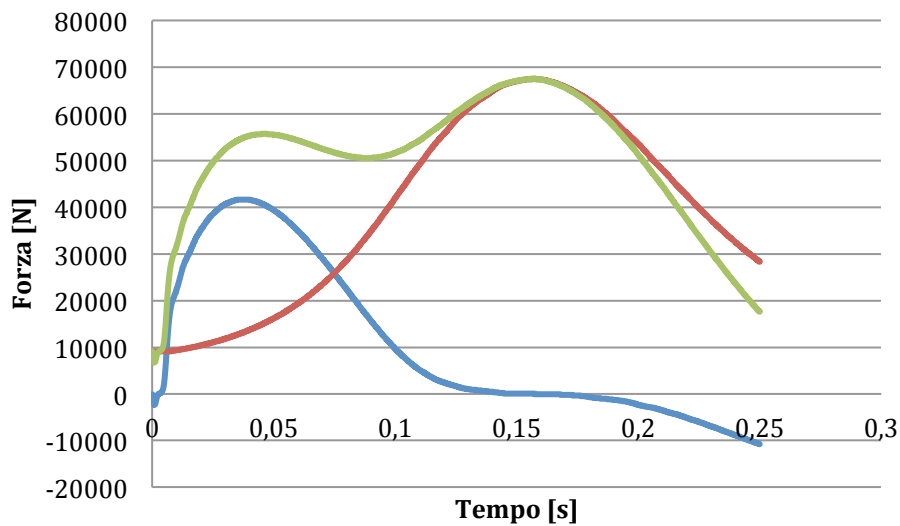


Figura 70 Andamento della risposta dell'assorbitore di energia in funzione del tempo
Rosso = Adiabatica ; Blu = Viscosa ; Verde = Risposta totale

L'andamento della curva di risposta dell'ammortizzatore presente due picchi caratterizzati dagli istanti di massimo contributo della parte viscosa, all'istante di massima velocità relativa dell'assorbitore, e della forza di compressione adiabatica del gas, nel punto di massima compressione.

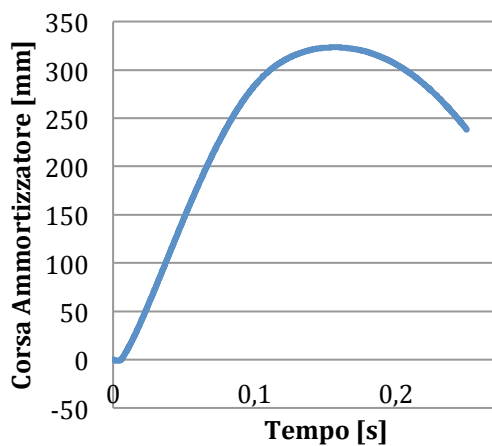


Figura 71 - Schiacciamento dell'ammortizzatore

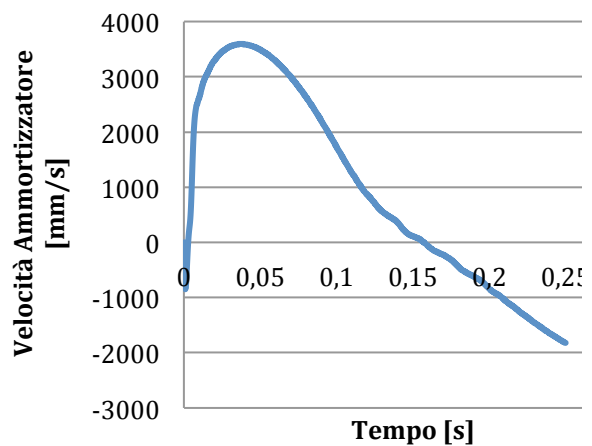


Figura 72 - Velocità dell'ammortizzatore

La risposta del pneumatico mostra una reazione massima al suolo di 69181 N.

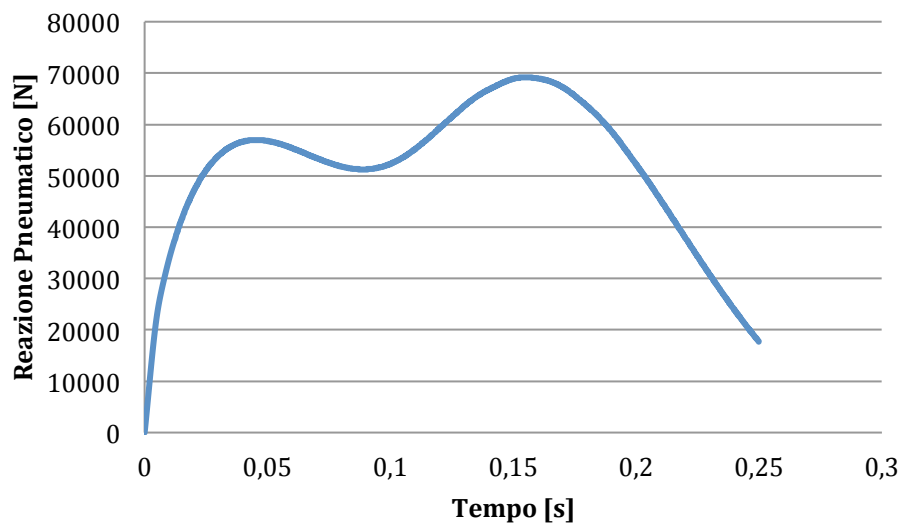


Figura 73 - Reazione verticale sviluppata dal pneumatico

Anche in condizioni di *hard landing* la corsa del pneumatico rimane al di sotto della corsa massima disponibile; lo schiacciamento massimo in queste condizioni è di 67,4 mm nell'istante di massima forza verticale.

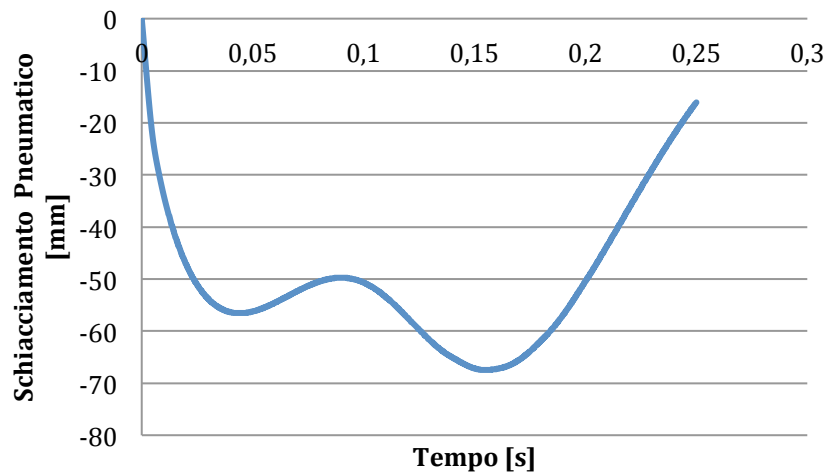


Figura 74 - Schiacciamento del pneumatico

Analizzando i risultati dei carichi trasmessi alla massa, al netto della forza peso e della portanza residua, si osserva una forte somiglianza, a meno delle forze di inerzia relative alle massa concentrate di cilindro e pistone, con la componente lungo l'asse z, in assi elicottero, della forza nell'assorbitore.

Dalla forza applicata alla massa, è possibile ricavare il fattore di carico al carrello in funzione del tempo e della corsa totale del carrello.

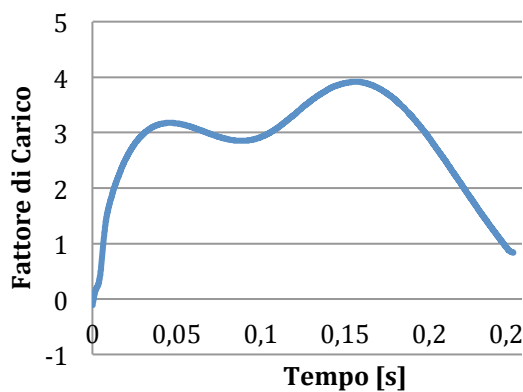


Figura 75 - Fattore di carico al carrello in funzione del tempo

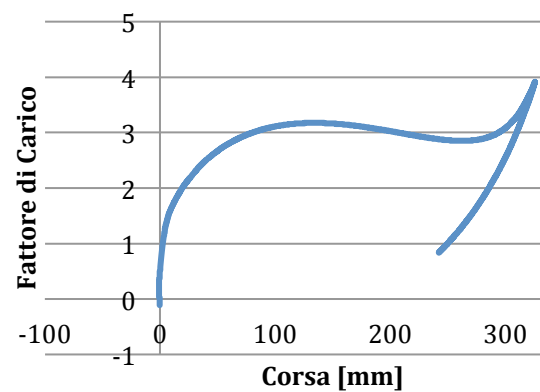


Figura 76 - Fattore di carico al carrello in funzione della corsa complessiva

Considerando il fattore di portanza residua si può determinare il fattore di carico baricentrico. Il valore massimo raggiunto è: $n_{LG}=3,918$ e $n_{CG}=4,918$

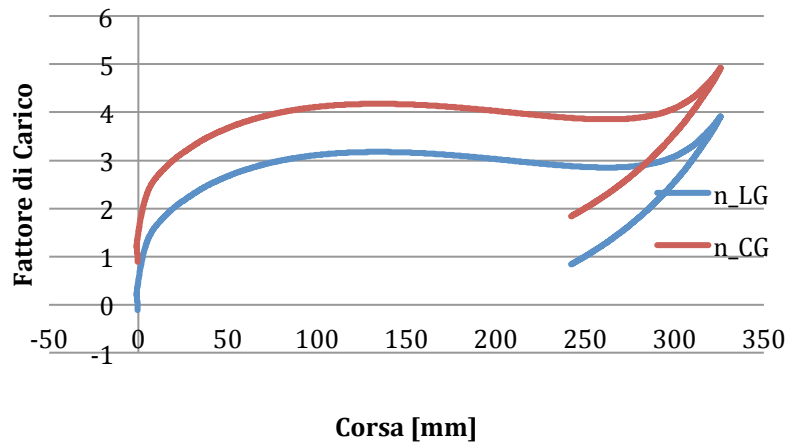


Figura 77 - Fattore di carico al carrello (n_{LG}) e al baricentro (n_{CG}) in funzione della corsa complessiva del carrello

Si può inoltre valutare lo schiacciamento della cartuccia anticrash che, naturalmente, dovrà restare minimo come quello del caso precedente. Dal grafico si ricava lo schiacciamento massimo pari a 2,37mm.

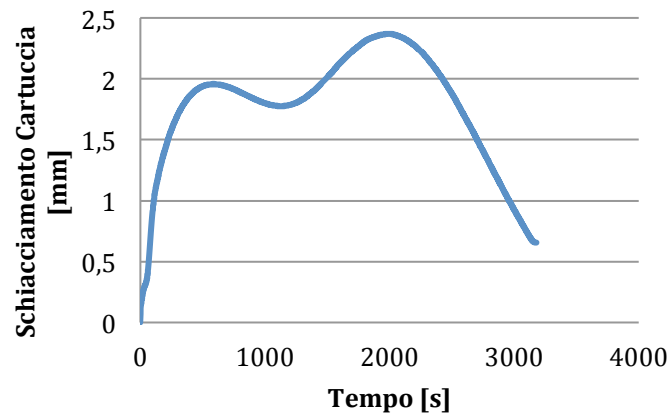


Figura 78 - Schiacciamento della cartuccia

4.3.3. Crash Landing

La velocità di caduta ora applicata è di 12.8m/s scomposta nelle due componenti:

$$v_z^{hard} = -12.75E + 003 \text{ mm/s} \quad e$$

$$v_y^{hard} = 1.115E + 003 \text{ mm/s}$$

Riferendoci alla documentazione militare, consideriamo un fattore di portanza residua $L/R=1$.

Dall'analisi dei risultati, considerando il comportamento dinamico, si nota come la cartuccia vada effettivamente ad attivarsi modificando sostanzialmente il funzionamento del carrello. Analizzando infatti lo schiacciamento della cartuccia si nota come questa vada a deformarsi completamente. Non essendo stati inseriti degli stop si deforma fino allo schiacciamento totale:

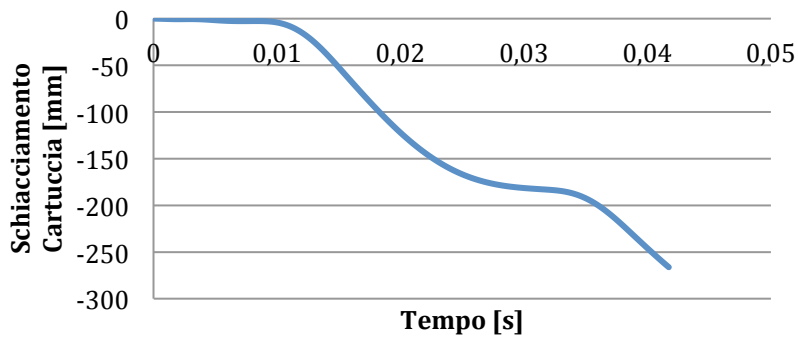


Figura 79 - Schiacciamento della cartuccia

Si nota che la cartuccia non si deforma con continuità, ma lavora insieme all'ammortizzatore generando due fasi distinte di schiacciamento.

La velocità di caduta viene chiaramente ridotta, anche se non in maniera importante come nei casi precedenti:

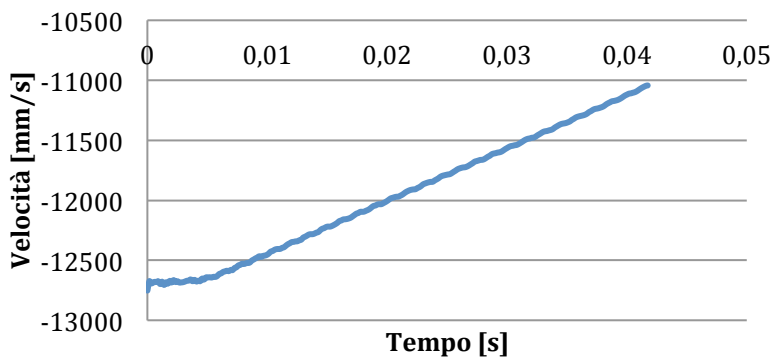


Figura 80 - Velocità della massa

Anche la corsa totale continua ad aumentare per effetto della combinazione di ammortizzatore e cartuccia.

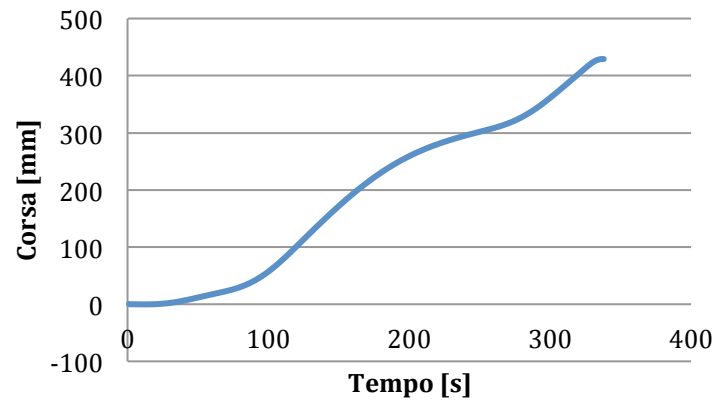


Figura 81 - Corsa totale del carrello

Ulteriore conferma del comportamento combinato dell'ammortizzatore con la cartuccia si ha dal grafico della risposta dell'assorbitore di energia che presenta due picchi di forza ben distinti, intervallati da un tratto centrale in cui la cartuccia *anticrash* viene deformata .

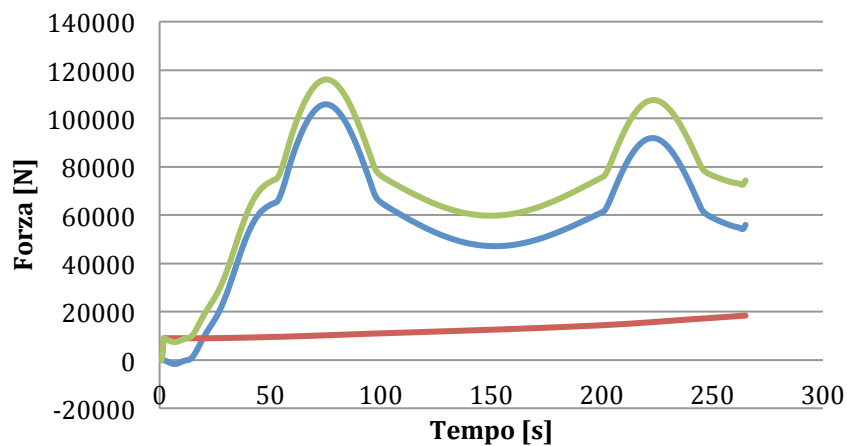


Figura 82 - Andamento della risposta dell'assorbitore
Blu = Adiabatica ; Rossa = Viscosa ; Verde = Forza totale

5. Analisi di impatto con carrelli anti-crash estesi

5.1. Connessione fra il carrello e il sottopavimento

Per inserire il carrello nel modello descritto in precedenza è stato necessario aggiungere la descrizione di un contatto tra il nodo inferiore dello pneumatico ed il suolo ed assegnare al carrello la gravità e la velocità di caduta, uniformandolo al modello d'insieme.

Il contatto è descritto attraverso un *contactpair*, nello stesso modo di quello tra la pelle inferiore del sottopavimento ed il suolo. L'unica differenza sta nel fatto che, mentre il contatto tra il pavimento dell'elicottero e la pelle esterna è definito tra due superfici, quello con il carrello è gestito attraverso un contatto nodi-superficie che è stato utilizzato per aggiungere anche tutti i nodi che descrivono la retroazione del carrello ed il nodo massa.

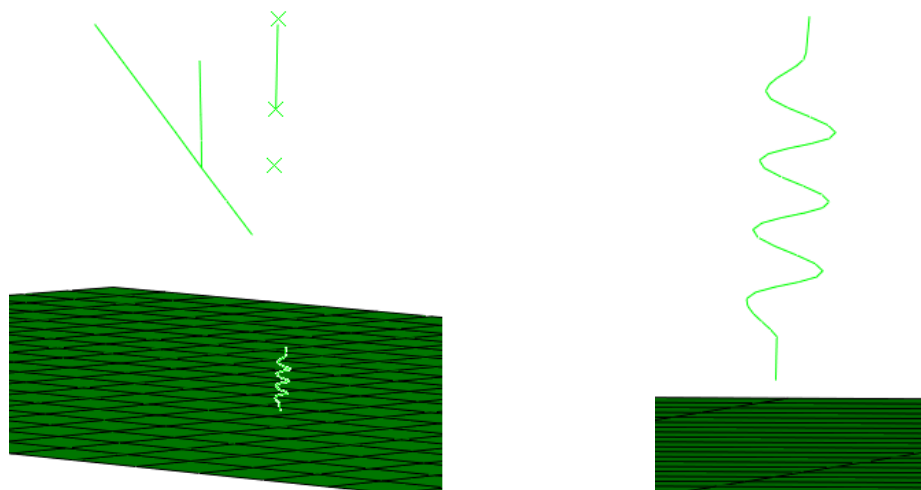


Figura 83
Carrello in configurazione di caduta verticale

Il funzionamento del carrello è stato analizzato in normal, hard e crash verificando che a crash avvenga il collasso della struttura anche a seguito del contatto tra la struttura ed il suolo.

Vengono riportati i grafici relativi alla corsa ed ai fattori di carico relativi e alle velocità delle configurazioni di hard e normallanding:

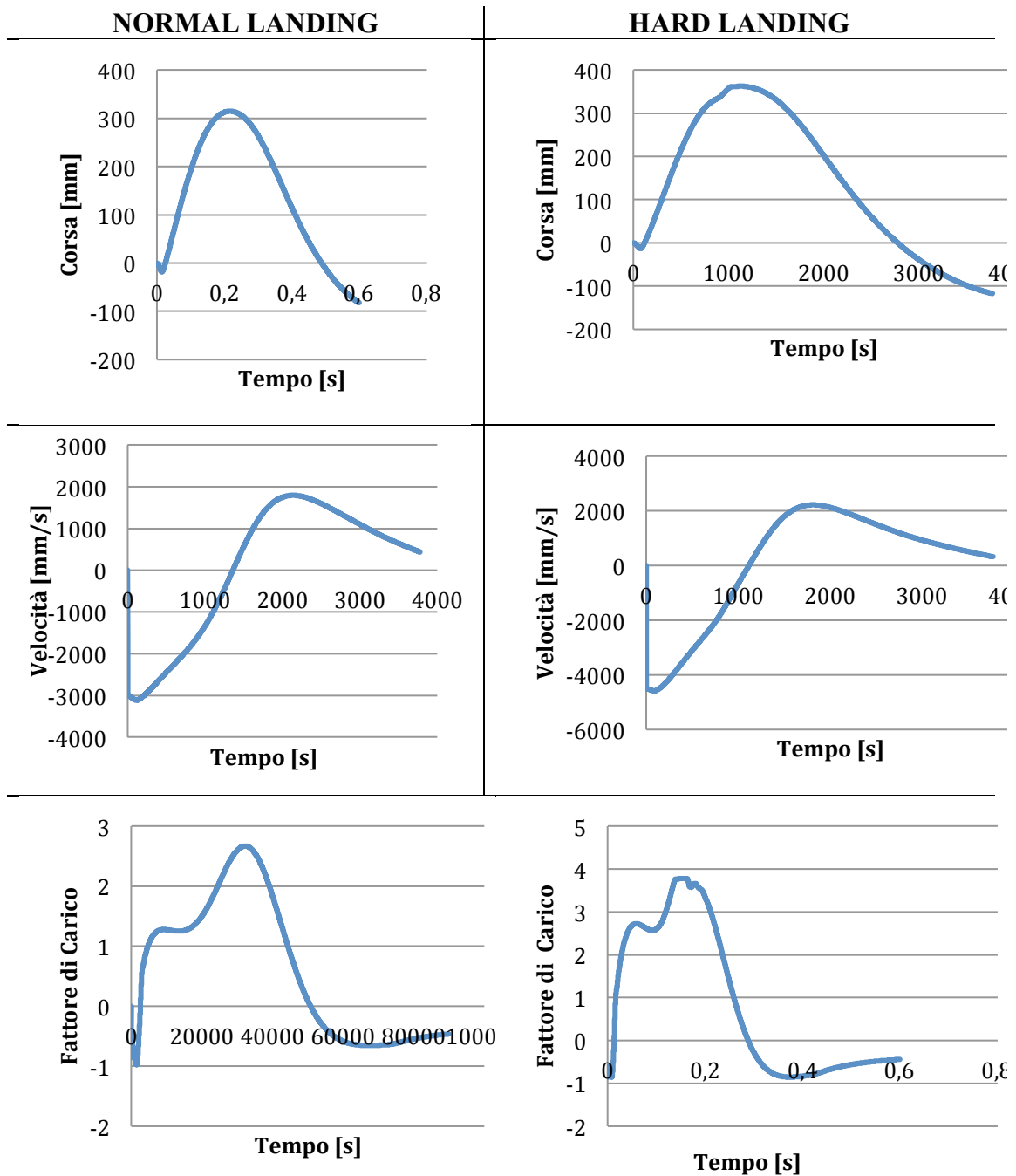


Figura 84 - Andamenti di corsa, velocità e fattore di carico in Normal landing

Figura 85 - Andamenti di corsa, velocità e fattore di carico in Hard Landing

A *crash* l'analisi viene interrotta nel momento in cui la cartuccia raggiunge il fondo corsa in quanto si è deciso di modellare successivamente, attraverso il collegamento con l'assieme, il distacco tra il carrello e la rimanente struttura nel momento in cui il carrello non contribuisce più all'assorbimento di energia.

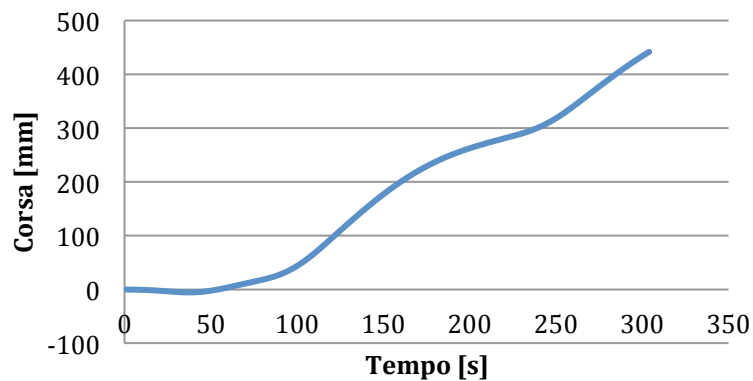


Figura 86 - Corsa complessiva del carrello

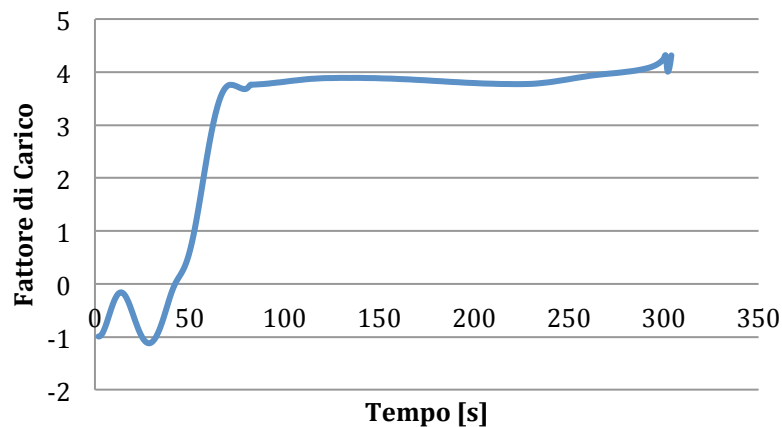


Figura 87 - Fattore di carico al carrello

Il valore di Fattore di Carico resta inalterato fintanto che la cartuccia si deforma. Ciò che accade successivamente non è significativo a causa dell'intervento degli assorbitori della struttura dell'assieme.

Si passa quindi all'inserimento dei carrelli nell'assieme analizzato in precedenza dopo aver triplicato il carrello secondo la numerazione riportata nel capitolo 2 per evitare che insorgano problemi relativi a nodi od elementi con numerazione identica. Una difficoltà riscontrata è stata quella dell'individuazione dei system corretti per la traslazione dei tre carrelli. Infatti non è stato sufficiente, come nei manichini, inserire

una traslazione del sistema di riferimento nella giusta posizione, ma è stato necessario modificare le tre orientazioni locali descritte all'interno del carrello.

Nei manichini non si ha questo problema per il fatto che le Orientazioni locali delle cerniere sono descritte in direzione orizzontale, che implica il fatto che una traslazione in direzione X e Y non altera assolutamente il comportamento del manichino.

Risolti i problemi di traslazione e rotazione dei carrelli sono state necessarie le seguenti operazioni per collegarli alla struttura esistente in maniera tale da essere il più realistici possibile per l'analisi numerica:

- inspessimento delle travi del sottopavimento collegate ai carrelli

Le travi sulle quali il carrello andrà a collegarsi sono state inspessite rispetto alle altre per permettere ai carichi introdotti dal carrello di non influenzare eccessivamente la conformazione del sottopavimento.

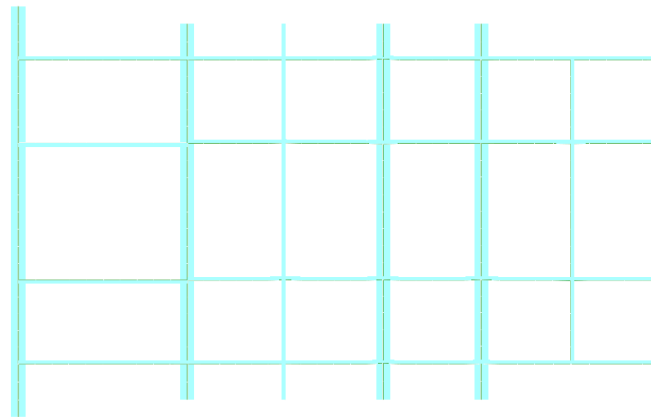


Figura 88
Travi inspessite del sottopavimento

- creazione castello e collegamenti carrello

Sono state create delle travi rigide di sezione cilindrica d'alluminio in maniera tale da formare un castello in grado di fissare i carrelli alla struttura del sottopavimento:

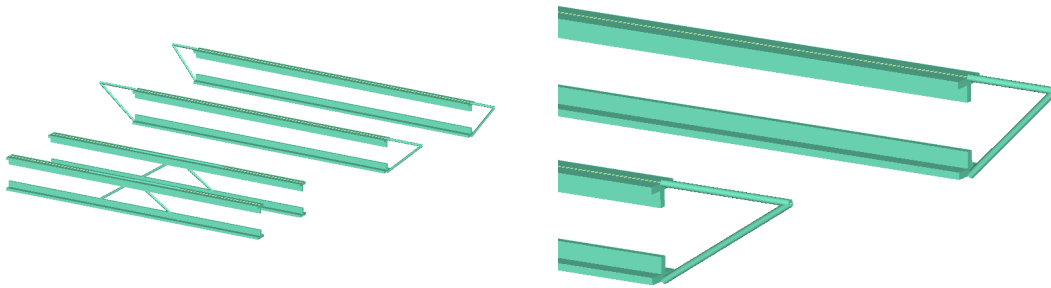


Figura 89
Castello di travi per il collegamento dei carrelli

I nodi per la creazione delle travi sono stati posti orizzontalmente alle travi di riferimento del sottopavimento ad una distanza lungo l'asse trave di 300mm. Sono stati creati due coppie di nodi sovrapposti situati accanto alle travi di collegamento uniti da un *connectorweld*. Il connector è stato definito in maniera tale da poter permettere al carrello di staccarsi dalla struttura nel momento in cui i carichi assiali sul collegamento risultano essere troppo elevati. Il connector relativo al nodo dell'asse carrello si rompe nel momento in cui la forza assiale supera i 3750 N, mentre quello in prossimità della trave posteriore si rompe a momento ricavato come prodotto tra la forza assiale imposta sul nodo anteriore moltiplicata per la distanza tra le due travi del sottopavimento.

I carrelli vengono posizionati ad un'altezza tale da permettere al sottopavimento di intervenire nel momento in cui la cartuccia a crash raggiunge circa la metà della sua lunghezza per far lavorare la cartuccia in parallelo alla struttura complessiva durante l'ultima fase di schiacciamento prima che i carrelli si scolleghino dalla struttura. Sono inoltre collegati in configurazione completamente estratta, quindi l'altezza totale iniziale non è quella dell'elicottero a terra.

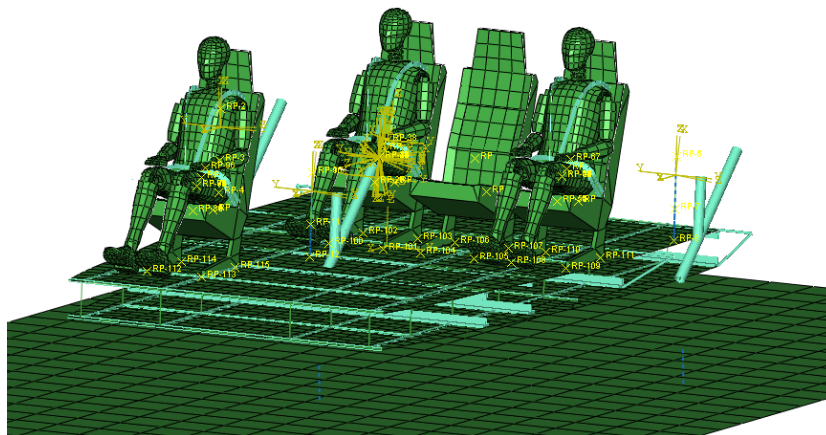


Figura 90 - Configurazione complessiva di carrelli

Come si nota in Fig.90 i carrelli penetrano all'interno della struttura; ovviamente questo non ha generato alcun problema dal punto di vista dell'analisi numerica in quanto non è modellato il collegamento tra struttura carrello e assieme totale. I carrelli sono collegati alla struttura semplicemente attraverso i connector descritti precedentemente.

Per permettere al carrello di funzionare a crash è stata aggiunta sul NodoMassa di ogni carrello una quantità di massa tale da permettere di avere un peso complessivo dell'assieme di 40000 N. Inoltre il peso è stato distribuito per la maggior parte sui due carrelli posteriori (12000 N) ed in parte minore su quello anteriore (8000 N). La mancata introduzione di queste masse nel modello non permetterebbe la deformazione della cartuccia in quanto la massa della restante parte della struttura modellata non sarebbe sufficiente ad innescare la deformazione.

5.2. Risultati numerici

Sono state analizzate due tipologie di configurazioni scegliendo due combinazioni di assorbitori (Tab. 17) tra quelle precedentemente considerate e che avevano permesso di ottenere risultati soddisfacenti in termini di carico lombare con il modello senza carrelli.

Tabella 17 - Combinazione di assorbitori per le analisi effettuate

NOME	SEDILE	SOTTOPAVIMENTO
CONF.1	10000 N	7000 N
CONF.2	9000-12000 N	6000 N

Le velocità considerate sono state di 8 m/s e 10 m/s. In Tab. 18 sono riportati i risultati ottenuti sia con assorbitori del sedile con comportamento elastico-perfettamente plastico che con comportamento elastoplastico:

Tabella 18 - Risultati ottenuti al variare degli assorbitori e della velocità di caduta

8 m/s – SEDILE: 10000 N – SOTTOPAVIMENTO: 7000 N			
	MANICHINO 1	MANICHINO 2	MANICHINO 3
C.L.	4262 N	3823 N	4896 N
C.S.	99 mm	91 mm	136 mm
C.L. = Carico Lombare ; C.S. = Corsa Sedile			

10 m/s – SEDILE: 10000 N – SOTTOPAVIMENTO: 7000 N			
	MANICHINO 1	MANICHINO 2	MANICHINO 3
C.L.	7063 N	8462 N	9541 N
C.S.	186 mm	182 mm	200 mm

8 m/s – SEDILE: 9000-12000 N – SOTTOPAVIMENTO: 6000 N			
	MANICHINO 1	MANICHINO 2	MANICHINO 3
C.L.	5068 N	3962 N	5696 N
C.S.	85 mm	75 mm	125 mm

10 m/s – SEDILE: 9000-12000 N – SOTTOPAVIMENTO: 6000 N			
	MANICHINO 1	MANICHINO 2	MANICHINO 3
C.L.	5538 N	6613 N	8664 N
C.S.	189 mm	184 mm	200 mm

Analizzando i valori massimi si nota come a 8 m/s i risultati siano molto soddisfacenti in quanto i carichi lombari si mantengono molto al di sotto del valore massimo richiesto da normativa. Anche le corse sono limitate e la cartuccia a crash presente nel carrello non si deforma completamente; questo significa che esiste ancora margine per assorbire ulteriori quantità di energia.

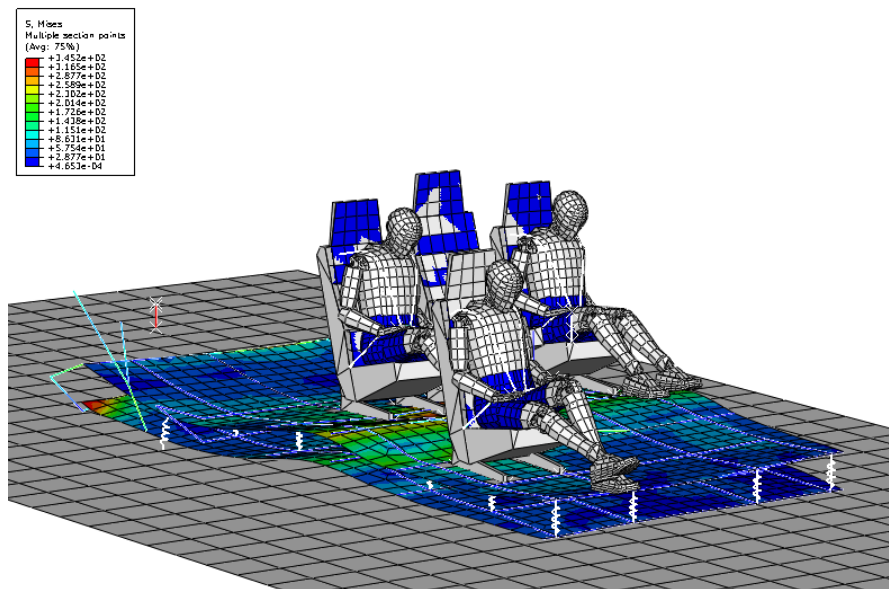


Figura 91
Frame relativo allo schiacciamento massimo della cartuccia

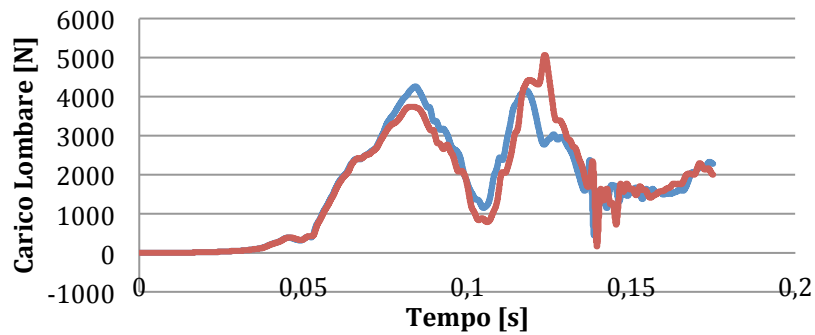


Figura 92 Carico lombare al variare della configurazione degli assorbitori del Manichino 1 a 8 m/s
 Blu= CONF.1; Rosso = CONF.2

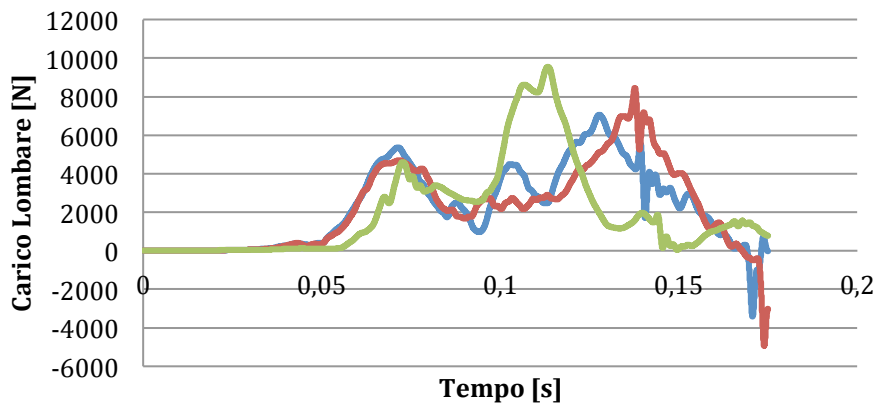


Figura 93- Carichi lombari in CONF 2 a 10 m/s
 Blu = Manichino1 ; Rosso = Manichino2 ; Verde = Manichino3

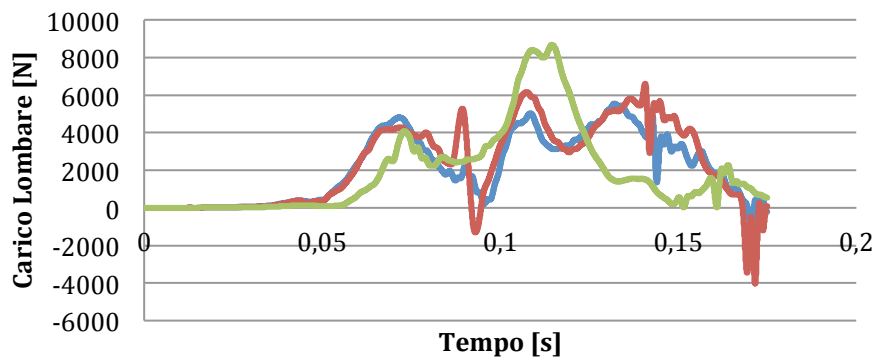


Figura 94 - Carichi lombari in CONF. 2 a 8 m/s
 Blu = Manichino1 ; Rosso = Manichino2 ; Verde = Manichino3

Si nota una differenza sostanziale per quanto riguarda i carichi che gli occupanti subiscono a seconda della posizione sul sottopavimento; infatti, analizzando la caduta senza carrelli, non si aveva una grande differenza a seconda del posizionamento del manichino, cosa che invece, nella configurazione con i carrelli, si nota a colpo d'occhio osservando sia i grafici che la dinamica dell'analisi. Il manichino frontale (manichino 3) risulta essere quello maggiormente sollecitato; questo può essere dovuto al fatto che si trova esattamente in corrispondenza delle travi a cui è collegato il carrello anteriore a differenza degli altri due occupanti che sono posizionati più avanti rispetto alle travi inspessite.

Una dinamica strana del comportamento del manichino3 è anche il fatto che un piede si impunta e non scorre in avanti come accadeva in tutte le precedenti analisi; questo porta a dire che l'aumento del carico lombare potrebbe essere causato dalla dinamica del manichino frontale a seguito di deformazioni del sottopavimento successive all'impatto con il terreno.

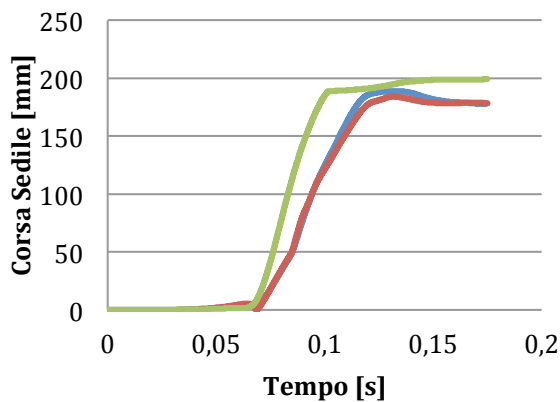


Figura 95 - Corse dei sedili a 10 m/s in CONF.2

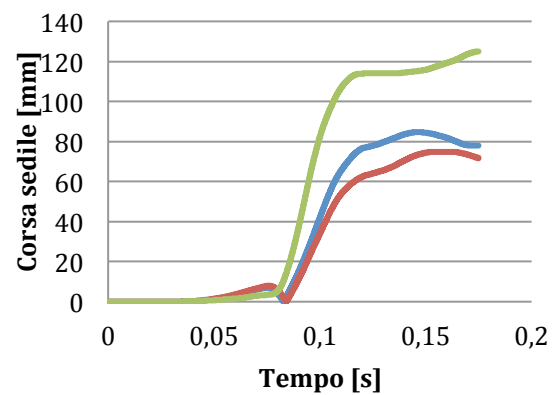


Figura 96 - Corse dei sedili a 8 m/s in CONF.2

Blu = Manichino 1 ; Rosso = Manichino 2 ; Verde = Manichino 3

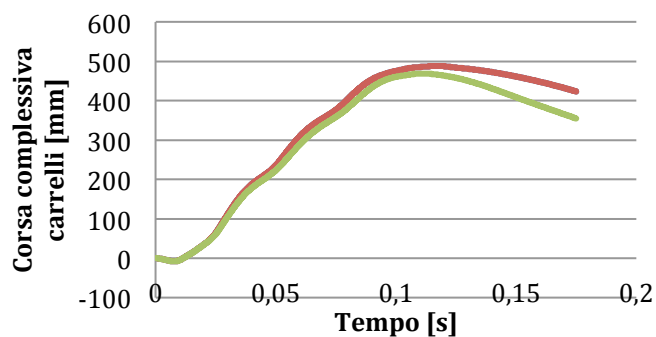


Figura 97 - Corsa complessiva dei carrelli in CONF 2 a 8 m/s

Rosso = Carrello Posteriore Destro e Sinistro ; Verde = Carrello Anteriore

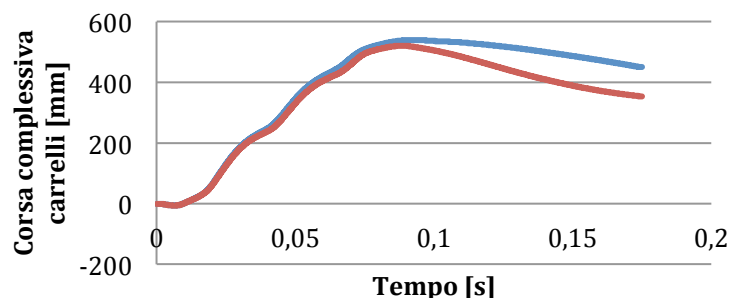


Figura 98 - Corsa complessiva dei carrelli in CONF.2 a 10 m/s
 Blu = Carrello Posteriore Destro e Sinistro ; Rosso = Carrello Anteriore

Analizzando i grafici relativi alla corsa complessiva dei carrelli, composta dallo schiacciamento dell'ammortizzatore più la cartuccia a crash, si nota come il comportamento di quelli posteriori sia perfettamente identico, mentre si nota una corsa leggermente inferiore di quello anteriore; il comportamento è corretto in quanto il carrello anteriore è caricato con una massa inferiore rispetto a quelli posteriori. Inoltre il carico che insiste sul carrello per quanto riguarda la struttura composta anche dai manichini è differente da quella dei carrelli posteriori.

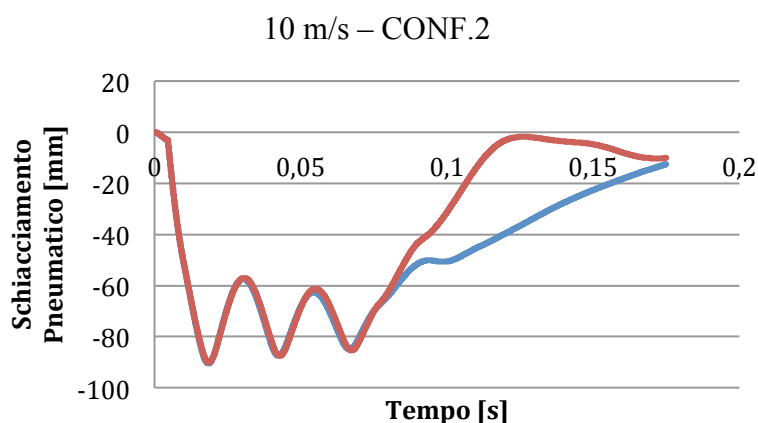


Figura 99 - Schiacciamento del pneumatico in CONF.2 a 10 m/s
 Rosso = Pneumatico Post. Destro e Sinistro ; Rosso = Pneumatico Ant.

Nell'analisi a 10 m/s si nota come il carrello si stacchi dal castello che lo collega anteriormente al sottopavimento nel momento in cui la cartuccia risulta essere totalmente deformata non creando errori di calcolo e quindi permettendo all'analisi di procedere. Nel grafico dello schiacciamento del pneumatico si evidenziano tre fasi di schiacciamento che corrispondono agli istanti in cui la cartuccia si deforma sino ad arrivare al distacco del carrello che provoca una diminuzione progressiva dello schiacciamento.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Il modello finale comprensivo di carrelli rappresenta a tutti gli effetti una configurazione completa e realistica di un impatto dovuto da un atterraggio a crash; infatti il peso totale dell'insieme rispecchia quello di un elicottero completo, la posizione degli occupanti è quella di una possibile configurazione e gli assorbitori all'interno del modello permettono di ricreare condizioni di sicurezza passiva verosimili. Chiaramente i risultati ottenuti sono relativi alla più semplice condizione di impatto, quella verticale, che permette di analizzare i comportamenti di tutta la struttura e di tutti gli assorbitori che lavorano, a meno di differenze dovute alla posizioni degli occupanti, in maniera analoga.

Inoltre la distribuzione di massa totale è stata ricreata aggiungendo puntualmente della massa direttamente in corrispondenza dei carrelli; si potrebbe pensare di introdurre nel modello la struttura della cabina, riproducendo in maniera più realistica la collocazione delle masse, e cercare di ricostruire l'effettiva distribuzione dei differenti componenti presenti nel velivolo. Questo fatto risulta comunque avere un'importanza relativa in quanto, a tutti gli effetti, gli assorbitori sono sollecitati da forze che rispecchiano abbastanza fedelmente i carichi reali.

Sviluppi futuri possono essere, innanzi tutto, l'ottimizzazione degli assorbitori presenti nel velivolo effettuando analisi al variare dei valori di carico di collasso. Inoltre potrebbero essere eseguite analisi di impatto con componenti di velocità non solo verticali ma anche in direzione longitudinale, oppure con un assetto non livellato. Potrebbe anche essere variata la posizione o il numero degli occupanti.

Sarebbe, infine, molto interessante avere a disposizione i risultati di prove sperimentali di impatti verticali della configurazione comprensiva di carrelli per verificare la correlazione numerico-sperimentale dei risultati ottenuti.

Ringraziamenti

Al termine del mio percorso di studi desidero ringraziare, in primo luogo, il professor A. Airoidi e l'ing. B. Cacchione per il tempo che mi hanno dedicato durante il periodo di preparazione della tesi.

Grazie ai miei compagni di corso Davide e Diego con i quali ho passato gran parte del mio tempo durante tutto il percorso di laurea specialistica e sviluppato la preparazione di esami e progetti che, da solo, sarebbero stati molto più problematici e soprattutto molto più noiosi.

Un grazie speciale ai miei genitori che hanno reso possibile il mio percorso di studi; hanno sempre creduto in me e nelle mie potenzialità e, in particolar modo nell'ultimo anno, mi sono stati di grande aiuto morale. Grazie perché mi hanno dato la garanzia di un lavoro che mi ha fatto crescere, maturare e comprendere meglio l'importanza degli studi e dei sacrifici compiuti.

Grazie ai miei amici con i quali ho condiviso le mie passioni: grazie ai miei coristi, grazie agli amici del ballo, grazie agli amici del calcetto e a quelli del venerdì e sabato sera.

Grazie a don Roberto che ha saputo sempre darmi lo spunto di riflessione giusto ed è stato sempre presente nel momento del bisogno sia come prete che come amico.

Grazie a Marika che mi ha dato la vera motivazione per terminare i miei studi, mi ha sopportato nei momenti di nervosismo e supportato nelle mie insicurezze.

Infine grazie a tutti coloro che hanno pregato per me e per i miei esami; la Sua presenza è sempre stata quella marcia in più che mi ha permesso di raggiungere questo grande traguardo di vita.

Bibliografia

- [1] Art. A. Airoidi - *Proprietà significative delle leghe leggere d'alluminio nella progettazione ad assorbimento di energia delle strutture aeronautiche*
- [2] Art. L. Lanzi, A. Airoidi e E. C. Chirwa – *Numerical Techniques for the Design of Crashworthy Sottopavimentos*
- [3] Art. B. Cacchione, A. Airoidi, P. Astori – *Hybrid finite element/Mmulti-body model to design Energy absorption devices to be installed on helicopters*
- [4] Art. A.Airoidi - *Proprietà significative delle leghe leggere d'alluminio nella progettazione ad assorbimento di energia delle strutture aeronautiche*
- [5] Tesi L. Vertemati – *Progetto di un carrello di elicottero con assorbitore di energia per atterraggi in super velocità*
- [6] <http://www.faa.gov> - Sito internet che contiene la normativa FAR29