

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Aeronautica



MODELLAZIONE DELL'INTERAZIONE TRA SISTEMI DI ASSORBIMENTO DI ENERGIA NELL'IMPATTO VERTICALE DI ELICOTTERI

Relatore: Chiar.mo Prof. Alessandro AIROLDI

Co-relatore: Ing. Benedetta CACCHIONE

Tesi di Laurea di:

Davide LUISON Matr.707873

Anno Accademico 2011-2012

Ringraziamenti

Alla fine del mio percorso universitario, lungo, tortuoso ma ricco di soddisfazioni, voglio rivolgere il mio grazie a chi ha creduto in me anche quando io stesso ho vacillato.

Grazie al Professor Alessandro Airoidi per la pazienza e l'attenzione che mi ha concesso durante il periodo di tesi, alla Dott.ssa Ing. Benedetta Cacchione per il supporto ed il tanto tempo che mi ha dedicato ed infine al professor Paolo Astori che ha collaborato al mio lavoro nelle fasi finali.

Grazie a papà, mamma e Daniele che sono stati e sono l'esempio da seguire e mi hanno permesso di compiere questo percorso supportandomi e sopportandomi anche nei periodi più complicati.

Grazie a Federica che ha avuto tanta pazienza condividendo emotivamente i successi e gli insuccessi del mio percorso, che mi è stata vicina con il suo amore.

Grazie a zia Sandra e Roberto.

Grazie a Diego e Marco, amici inseparabili e insostituibili di tutto il corso di laurea Specialistica e compagni estremamente PROfessionali.

Grazie a tutti gli amici che hanno "tifato" per me nel corso di questi anni: i ragazzi dell'orchestra, quelli del CREC, quelli della moto, quelli del calcetto, i colleghi della Fema.

In particolare un grazie di cuore a Paolo Giovanna e Rachele, Monica e Leonardo, Betta & Roby, mio cugino Robertone, Marco e Marica, Moreno e Rebecca, il mio nipotino Giorgio, Moope Poope Voope e i Noopi e a tutti quelli che non ho ricordato...

Grazie infine anche a Miola e Piera, le mie morbide gatte che hanno riempito le lunghe giornate di studio solitario con la loro affettuosa presenza.

1. SOMMARIO	1
2. INTRODUZIONE	3
3. DESCRIZIONE DEL MODELLO PER LO STUDIO DELL'IMPATTO	6
3.1 Atterraggio	10
3.2 Tecnica ibrida di modellazione.....	11
3.3 Manichino antropomorfo	12
3.4 Criteri di lesione.....	16
3.4.1 Lesioni ambientali	16
3.5 Sedile con dispositivo di assorbimento di energia.....	18
3.5.2 Cinture di sicurezza	21
3.6 Sottopavimento.....	21
3.7 Parametri coinvolti nella valutazione del livello di sicurezza passiva	25
4 VALIDAZIONE DEL MODELLO DI MANICHINO	26
4.1 Sedile rigido e cinture di sicurezza a due punti di ancoraggio.....	26
4.2 Sedile rigido e cinture di sicurezza a quattro punti di ancoraggio.....	29
4.3 Sedile deformabile equipaggiato con assorbitore di energia e cinture di sicurezza a 4 punti di ancoraggio	30
5 CONFIGURAZIONE CON SOTTOPAVIMENTO	33
5.1 Condizioni di prova	35
5.2 Messa a punto del modello di sedile e sottopavimento	35
6 SUPERFICI DI RISPOSTA	39
6.1 Pendenza del campo plastico degli assorbitori sedile.....	39
6.2 Creazione superfici.....	41
6.3 Condizioni di impatto.....	42

6.4	Risultati	43
6.4.1	Assorbitore Elastico Perfettamente Plastico.....	43
6.4.2	Dipendenza da K	50
6.5	Analisi dei picchi per $6500N < F_{sub} < 7000N$	53
6.5.1	Effetto K	53
6.5.2	Effetto F_{sub}	56
6.6	Conclusioni	62
7	COMPARAZIONE TRA METODI DI ALLOCAZIONE.....	63
7.1	Allocazione FullFactorial	64
7.2	Comparazione tra le superfici ottenute con i due metodi	66
8	ASSORBITORE DEL SOTTOPAVIMENTO CON OSCILLAZIONI.....	68
8.1	Risultati	71
8.2	Effetto della variazione del picco di attivazione	81
8.3	Effetto della variazione dell'ampiezza delle oscillazione	83
8.4	Considerazioni sui casi analizzati.....	84
8.5	Valutazione dell'effetto dei parametri introdotti.....	85
9	CONCLUSIONI E SPUNTI PER SVILUPPI FUTURI.....	90

1. SOMMARIO

Il lavoro di questa tesi si svolge nell'ambito della sicurezza passiva legata al settore elicotteristico.

L'attività principale ha riguardato lo studio di leggi costitutive da assegnare agli elementi preposti all'assorbimento di energia, al fine di limitare il carico lombare attraverso la deformazione programmata degli stessi.

Si avvale di un modello ibrido elementi finiti/multicorpo, sviluppato attraverso il codice di calcolo Simulia/Abaqus Explicit. Inoltre, per mezzo del programma di ottimizzazione [®]iChrome/Nexus, è stato eseguito uno studio di sensitività, in grado di indirizzare la progettazione di elementi strutturali atti all'assorbimento di energia in caso di impatto.

Sono stati analizzati e, in generale, resi più efficienti modelli, già disponibili, di manichino antropomorfo e di sedile. È stata introdotta una porzione di sottopavimento, completa di assorbitori di energia, ed è stata considerata una caduta puramente verticale. Infine è stata eseguita la parametrizzazione del modello per lo studio di diverse configurazioni.

La tecnica ibrida ha consentito una drastica riduzione del numero di gradi di libertà del modello limitando i tempi di analisi. È stato quindi possibile considerare un grande numero di configurazioni differenti attraverso la variazione dei parametri introdotti.

Capitolo 1

2. Introduzione

La progettazione della struttura di un elicottero, oggi, non può esimersi dal tenere in ampia considerazione gli aspetti legati alla sicurezza passiva, fin dalle fasi preliminari. L'obiettivo è la salvaguardia degli occupanti, in caso di impatto, tramite elementi preposti all'assorbimento di energia e disposti in punti strategici della struttura.

I requisiti per definire sicura una struttura sono il contenimento dei carichi e delle accelerazioni entro soglie considerate tollerabili dal corpo umano, la conservazione di uno spazio vitale sufficiente (assenza di elementi che vadano ad interferire con gli occupanti), la riduzione della velocità di impatto, la prevenzione di eventuali incendi ed, infine, la possibilità di abbandonare l'elicottero in seguito ad un incidente. La struttura di un elicottero deve prevedere quindi la presenza di elementi in grado di limitare l'energia cinetica trasmessa al carico pagante attraverso un collasso controllato, ipotizzando diversi scenari di impatto, che tengano in considerazione la tipologia e la consistenza del suolo nonché l'angolo di caduta. Gli elementi tipicamente preposti all'assorbimento di energia sono il carrello di atterraggio, i sedili ed il sottopavimento [1;2].

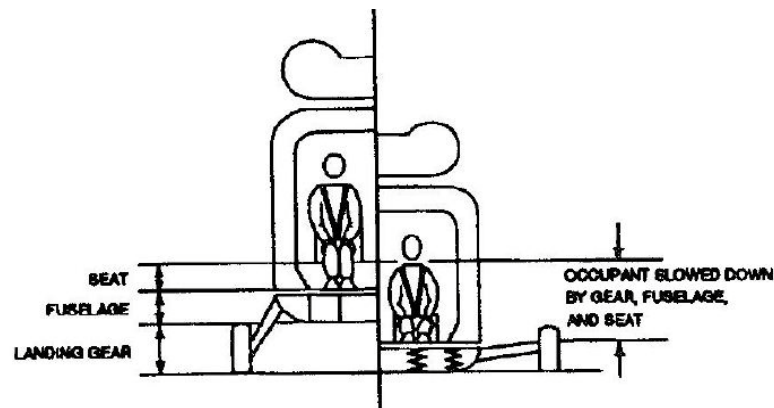


Figura 1 – Componenti coinvolti nell'assorbimento di energia in caso di incidente: carrello di atterraggio, sottopavimento e sedili con sistemi di assorbimento di energia

La sicurezza passiva non è l'unico aspetto che determina la configurazione finale di una struttura, che deve rispondere a molte altre esigenze: i carichi di manovra, la resistenza a fatica, le vibrazioni e nondimeno l'aerodinamica

Capitolo 2

guidano la progettazione che deve ricercare il miglior compromesso tra tutti i requisiti.

Storicamente la sicurezza passiva è nata in ambito automobilistico negli anni Cinquanta, mentre più tardi, negli anni Sessanta, si è estesa all'aeronautica. L'analisi di scenari di impatto, legati ad incidenti avvenuti sia in campo civile che militare, ha contribuito alla raccolta di informazioni sui parametri di impatto in termini di velocità, angolo, tipi di terreno ed alla relazione con i danni riscontrati sulle vittime degli incidenti e con le conseguenze riportate dalle strutture.

La raccolta di queste informazioni ha portato alla redazione di manuali contenenti linee guida per la progettazione ("Aircraft crash survival design guide" 1967 [3]) nonché all'emissione di normative che l'hanno regolamentata, secondo i criteri dettati dalla sicurezza passiva: "Light fixed and rotary-wing aircraft crashworthiness" [4], "Airworthiness standards for normal category (small) civil rotorcraft"[5], "Airworthiness standards for transport category (large) civil rotorcraft"[6]. Le normative in ambito civile sono successivamente state sostituite [7;8] per l'introduzione di nuovi criteri che introducono carichi di tipo sia statico che dinamico [9].

L'utilizzo di analisi numeriche si rivela un valido alleato nella progettazione delle strutture: il ricorso a campagne di prove sperimentali risulterebbe oneroso oltre ad introdurre gravi complicazioni nella riproduzione di eventi attinenti alla realtà. Soprattutto nelle fasi iniziali del progetto le analisi numeriche possono rappresentare un valido ausilio fornendo al progettista la possibilità di definire una configurazione fedele rispetto a quella che diventerà la struttura finale; solo allora, il ricorso alle prove sperimentali fornirà il riscontro alle simulazioni e la validazione del progetto.

Questo lavoro di tesi è strutturato come segue:

Capitolo 3 – Contesto in cui si inserisce la tesi, normative di riferimento, tecniche numeriche utilizzate

Capitolo 4 – Validazione dei modelli

Capitolo 5 – Introduzione del sottopavimento

Capitolo 6 – Risultati per l'assorbitore del sedile

Capitolo 7 – Confronto tra metodi di allocazione di punti nella costruzione delle superfici di risposta

Capitolo 8 – Risultati per gli assorbitori del sottopavimento

Capitolo 9 – Conclusioni e sviluppi futuri

3. Descrizione del modello per lo studio dell'impatto

Il concetto di sicurezza passiva, legato all'ambito elicotteristico, nasce dall'evidenza che alcune tipologie di impatto risultano sopravvivibili; questo approccio si affianca a quello della sicurezza attiva che lavora invece sul fronte della prevenzione degli incidenti stessi. Per studiare questo requisito, si rende necessaria una realizzazione ad hoc della struttura, con un forte impatto sulle caratteristiche stesse del progetto. Come già specificato, la definizione di tutti i parametri strutturali deve considerare diverse esigenze che nascono dal profilo di missione di un elicottero e solo a fronte di un involuppo di casi di incidente potenzialmente sopravvivibile statisticamente rilevanti, si progettano elementi in grado di migliorare l'assorbimento di energia, anche a scapito di aspetti quali il peso e i costi.

Gli impatti possono essere definiti attraverso diverse combinazioni delle componenti verticale ed orizzontale della velocità, che statisticamente possono giungere ai valori di 12m/s e di 30m/s rispettivamente e attraverso diversi angoli della traiettoria rispetto al suolo definiti in [10]. Tali valori rappresentano una casistica basata sulla registrazione di incidenti avvenuti ma non escludono che siano accaduti eventi a velocità di impatto superiori o che mai avverranno.

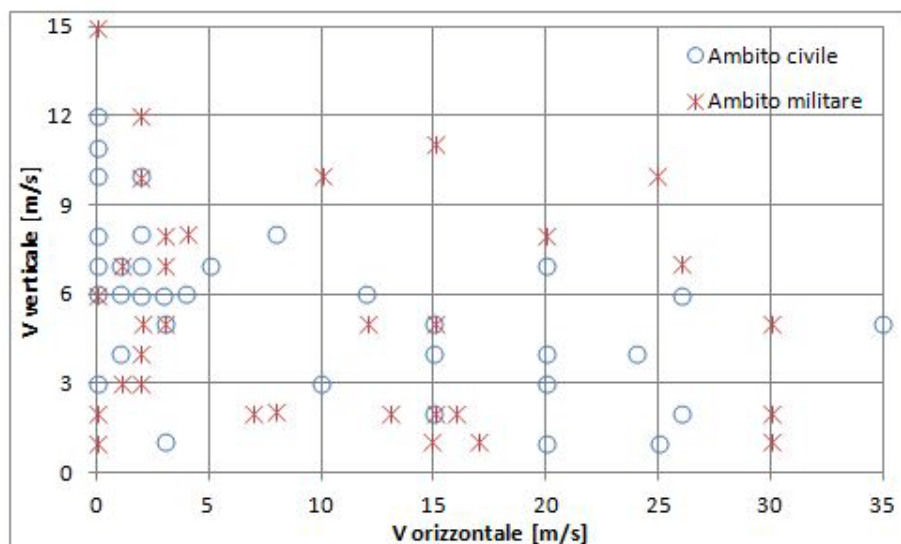


Figura 2 – Distribuzione di velocità per alcuni casi di incidente in ambito civile e militare [11]

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto

In tutti i casi riportati in Figura 2, almeno un occupante è sopravvissuto all'incidente. Gli scenari più ricorrenti sono quelli in cui una delle componenti di velocità è preponderante rispetto all'altra.

La tipologia di impatto verticale prevede tutti quei casi in cui l'angolo rispetto alla superficie sia di minimo 60° e conta 14 casi. Il 95% dei casi registrati si verifica ad una velocità orizzontale di 2,9m/s e di 11,5 m/s in direzione verticale.

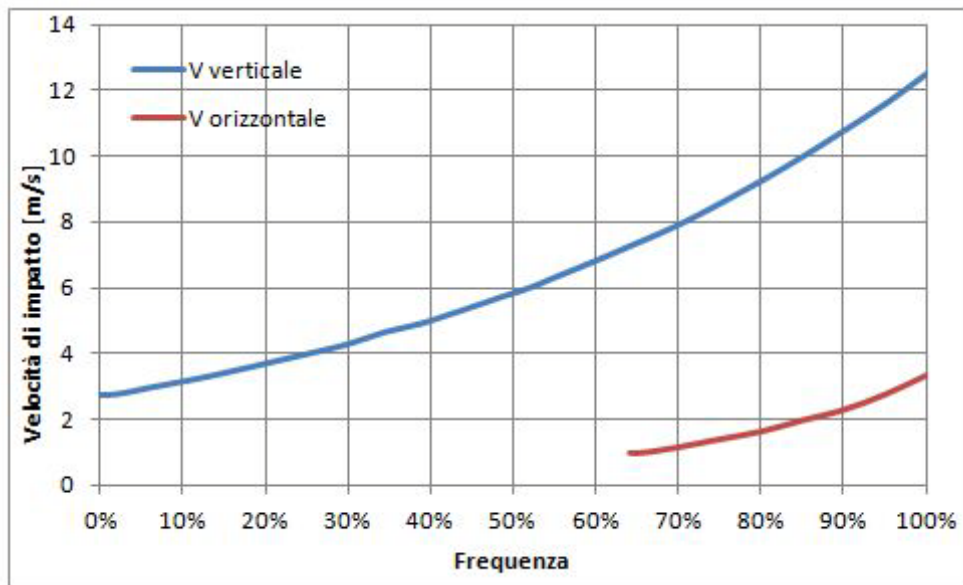


Figura 3 – Casi dello scenario di impatto verticale [11]

La tipologia di impatto orizzontale è invece definita da quei casi in cui l'angolo rispetto alla superficie è minore o uguale a 35° . Il 95% degli eventi registrati mostra una combinazione di 25,1m/s in direzione orizzontale e di 2,8m/s come mostra la figura 4.

Capitolo 3

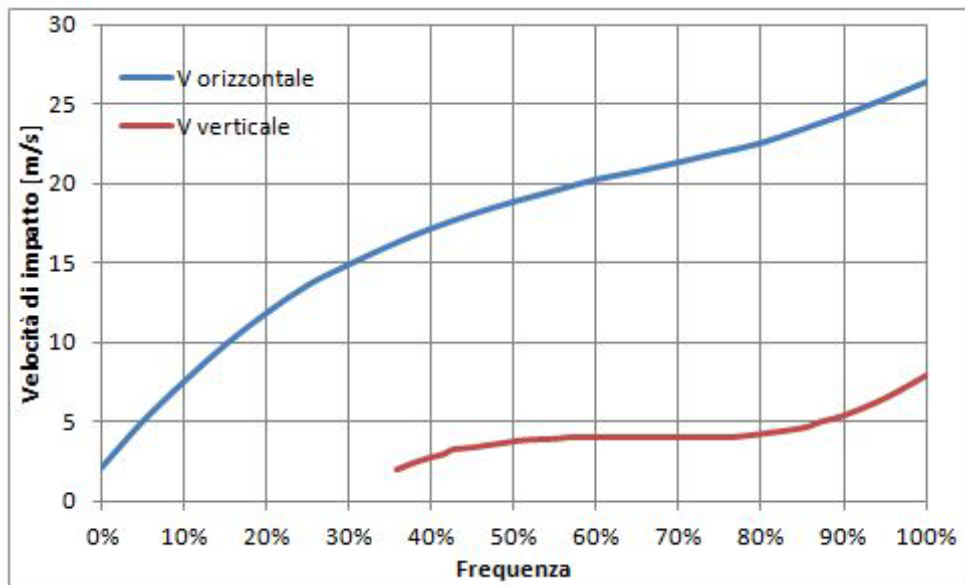


Figura 4 - Casi dello scenario di impatto verticale [11]

Definite le condizioni di impatto, diventa necessario intervenire, per limitare le conseguenze di questo evento, introducendo elementi in grado di attenuare le sollecitazioni trasmesse agli occupanti secondo le linee guida sviluppate nella letteratura tecnica e scientifica.

Gli assorbitori devono essere realizzati sfruttando le caratteristiche di assorbimento di energia legate alla deformazione plastica dei metalli o alla progressiva rottura dei materiali compositi.

In Figura 5 è presentato lo schema funzionale di una struttura completa di elementi adibiti all'assorbimento di energia in caso di incidente secondo le attuali tendenze nell'ambito della sicurezza passiva [2].

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto

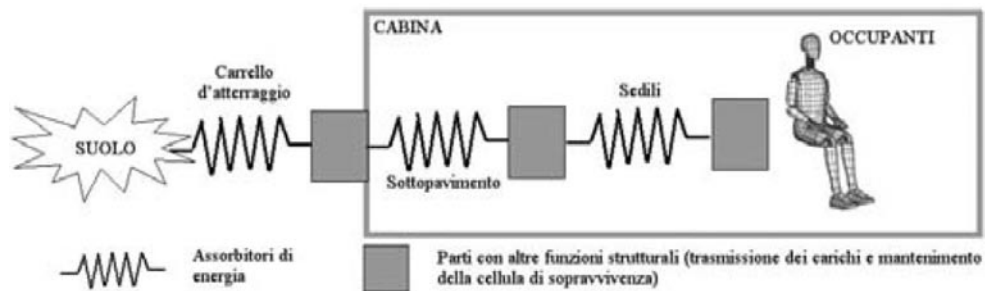


Figura 5 – Schema funzionale di una struttura completa di elementi per l'assorbimento di energia in caso di impatto con il suolo

Le normative relative al settore civile non regolamentano l'impatto della struttura completa dell'elicottero e si limitano a definire i parametri di funzionamento dei sedili con dispositivi di assorbimento di energia. Ciò non limita la possibilità di studiare un sistema in grado di deformarsi in modo programmato, che tenga in ampia considerazione la mutua interazione degli assorbitori attraverso una struttura in grado di trasmettere carichi che possono risultare molto superiori a quelli delle normali condizioni operative.

Inoltre risulta indispensabile il mantenimento della forma della cellula di sopravvivenza.

Nonostante l'assenza di normative specifiche a riguardo, sono state condotte prove su strutture complete attraverso programmi di ricerca [12] che hanno evidenziato come l'intera geometria dell'elicottero contribuisca a definire la risposta in condizioni di impatto, non ultimi proprio i dispositivi di assorbimento appositamente installati.

3.1 Atterraggio

È possibile prevedere alcuni scenari tipici di impatto che potrebbero verificarsi durante la normale vita operativa di un elicottero:

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 ammettere 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 delle accelerazioni sugli occupanti dell'abitacolo e tali da conservare l'integrità strutturale complessiva.

In ambito civile, quest'ultima condizione prevede il soddisfacimento delle condizioni prescritte anche senza carrello di atterraggio nel caso in cui quest'ultimo sia di tipo retrattile [9].

Le normative cogenti in ambito militare prevedono la medesima classificazione delle condizioni di atterraggio per gli atterraggi limite e pesante.

La condizione d'impatto, caratterizzata da una velocità massima verticale di 12,8 m/s richiede invece che:

- la struttura delle fusoliera sia abbastanza rigida e resistente da mantenere un volume sufficiente alla sopravvivenza dei passeggeri
- le masse sospese (organi di trasmissione, rotore e motore) non debbano invadere la cabina; è inoltre necessario evitare la presenza di oggetti taglienti e di spigoli e non si devono innescare incendi
- il carrello deve essere in grado di assorbire il 40% dell'energia totale di impatto dell'elicottero; per alcuni dei suoi componenti sono accettate deformazioni permanenti ed anche rotture se queste non influiscono significativamente sulle prestazioni di assorbimento di energia
- le accelerazioni sugli occupanti devono essere contenute entro i limiti prescritti in [4]

3.2 Tecnica ibrida di modellazione

Le tecniche numeriche costituiscono uno strumento a disposizione dei progettisti per definire una configurazione molto realistica di una struttura, al fine di compiere analisi di dettaglio prima che la struttura stessa sia fisicamente realizzata.

Il lavoro svolto in questa tesi si è avvalso di un modello ibrido usando contemporaneamente tecniche ad elementi finiti e multi corpo, sfruttando le potenzialità ed i vantaggi offerti da entrambi gli approcci.

La tecnica ad elementi finiti è principalmente utilizzata per il progetto dettagliato di singoli componenti poiché consente la modellazione di non linearità geometriche legate ad elevate deformazioni, risposte non lineari dei materiali in campo plastico e l'interazione tra superfici che vengono a contatto. Tutto ciò è a scapito dei tempi di analisi che sono molto onerosi, così come lo sforzo richiesto per la modellazione; è di difficile implementazione anche l'interazione tra i diversi dispositivi di assorbimento di energia, aspetto fondamentale di questo lavoro di tesi.

Per questa ragione è stata introdotta anche la tecnica multi corpo che con un basso costo computazionale è in grado di modellare il funzionamento e la risposta strutturale dei singoli componenti coinvolti nell'analisi. I modelli implementati per mezzo di questa tecnica sono più semplici rispetto a quelli realizzati con una tecnica ad elementi finiti ma consentono l'interconnessione tra diversi elementi strutturali imponendo vincoli cinematici altrimenti difficili da definire. È possibile attribuire una risposta lineare o non degli elementi strutturali alle sollecitazioni, definire meccanismi di blocco alle traslazioni ed alle rotazioni, prevedere il cedimento dei vincoli oppure l'attrito tra elementi a contatto.

Impiegando simultaneamente entrambe le tecniche di modellazione, è stato possibile generare un modello numerico complesso che comprende un manichino antropomorfo, un sedile deformabile, un sottopavimento deformabile ed una superficie rappresentativa del suolo di impatto. Tale modello è in grado di riprodurre la dinamica di impatto dell'intera struttura al suolo e fornire risultati con tempi di calcolo molto limitati (20 minuti circa tramite l'utilizzo di una CPU Intel® Core™ i7 Q740@1,73GHz e 8GB di RAM per una durata della simulazione di 0,125s).

La possibilità di sviluppare un modello con questa tecnica ibrida è fornita dal codice Simulia/Abaqus Explicit che permette l'utilizzo di elementi finiti non

Capitolo 3

lineari usati per lo studio di transitori molto rapidi, tipici dei fenomeni di impatto, ed una vasta libreria di elementi di interconnessione a cui assegnare leggi costitutive elastiche, elasto-plastiche, lineari e non lineari. La tecnica multi corpo consente inoltre una facile implementazione di modelli parametrici che permettono di eseguire studi di sensitività al variare delle caratteristiche salienti degli elementi strutturali.

Un'ulteriore possibilità offerta di questa tecnica è il contatto tra elementi con compenetrazione tra corpi, attraverso la definizione di leggi di contatto tra superfici di diversa natura.

3.3 Manichino antropomorfo

La nascita dei primi manichini antropomorfi è da collocarsi negli anni Settanta sulla base di una serie di studi per il rilevamento dei parametri antropometrici condotti su volontari, animali e cadaveri di esseri umani: tutto ciò è servito a definire i limiti di tollerabilità alle sollecitazioni e le accelerazioni supportabili dal corpo umano, in termini sia di intensità che di durata. I risultati sono stati raccolti nelle curve di Eiband che sintetizzano graficamente i limiti di tolleranza del corpo umano su base statistica sperimentale e che costituiscono tutt'oggi un riferimento nell'ambito della sicurezza passiva [3].

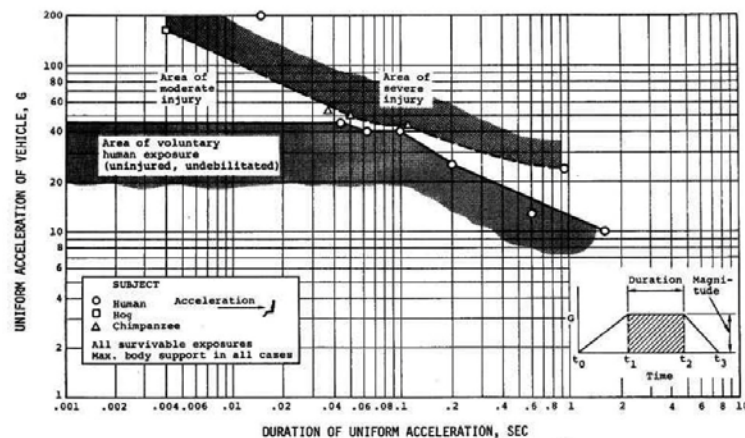


Figura 6 - Curve di Eiband: limiti di tollerabilità del corpo umano ad accelerazioni uniformi di durata variabile in direzione orizzontale

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto

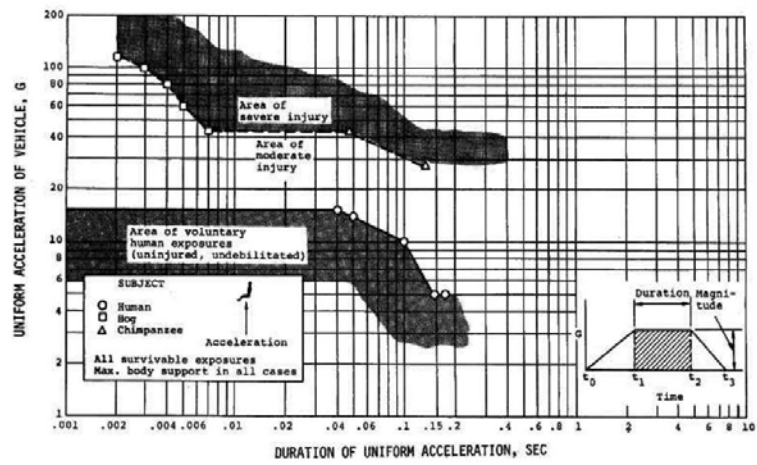


Figura 7 - Curve di Eiband: limiti di tollerabilità del corpo umano ad accelerazioni uniformi di durata variabile in direzione verticale

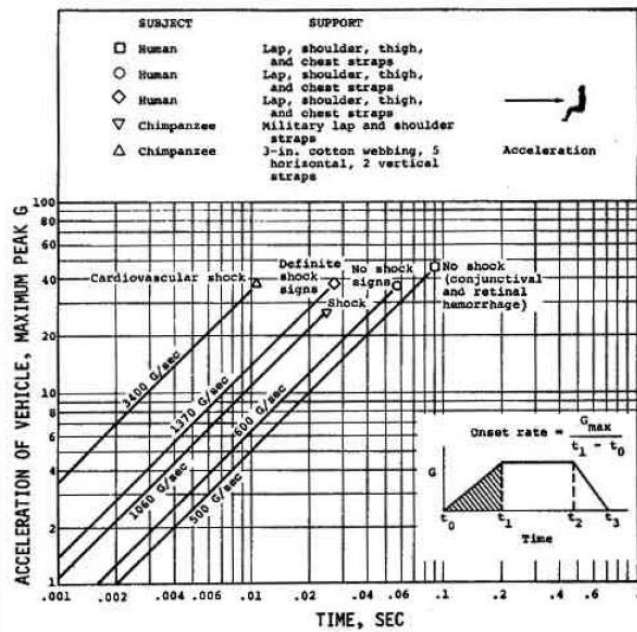


Figura 8 - Curve di Eiband: limiti di tollerabilità del corpo umano a picchi di accelerazione in direzione orizzontale

Capitolo 3

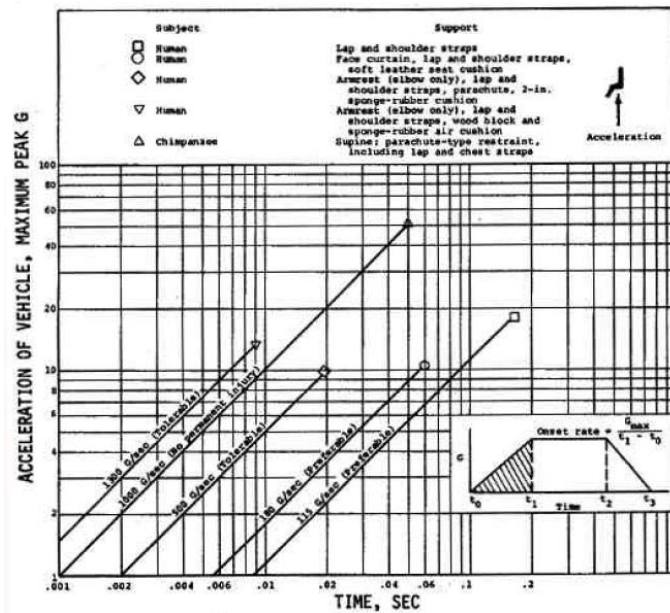


Figura 9 - Curve di Eiband: limiti di tollerabilità del corpo umano a picchi di accelerazione in direzione verticale

Lo sviluppo di manichini per ha permesso di disporre di un modello di un potenziale occupante che fosse anche un vero e proprio sensore in grado di rilevare ciò che accade durante le fasi di impatto.

Il manichino deve essere il più possibile biofedele in termini di distribuzione di massa, momenti di inerzia e cinematica dei movimenti. È inoltre importante l'adeguata riproduzione dei contatti tra le diverse parti del corpo che possono avvenire durante le fasi di impatto, la scelta dei materiali che riproducono la struttura, i tendini ed i tessuti molli.

Il manichino modellato numericamente è rappresentativo del cinquantesimo percentile della famiglia degli Hybrid III dalla massa dichiarata di 78Kg.

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto



Figura 10 – Manichino antropomorfo Hybrid III – Cinquantesimo percentile

La verificata correlazione numerico sperimentale rende il modello numerico del manichino un valido alleato alla progettazione, funzionale ed economico, nonché uno strumento di verifica alternativo rispetto alle prove sperimentali.

Il manichino è costituito da ventotto corpi rigidi che riproducono testa, torace, arti ecc. uniti per mezzo di giunti cinematici in grado di consentire e riprodurre i movimenti del corpo. Non è riprodotta la partecipazione attiva della muscolatura mentre è simulata quella passiva per mezzo di giunti resistenti alla torsione. La colonna vertebrale, valutata essere tra le zone più a rischio in caso di impatto, è modellata ad elementi finiti. Per impedire movimenti irrealistici del modello sono state introdotte leggi di coppie torcenti tra segmenti adiacenti e le caratteristiche dei corpi rigidi sono state assegnate attraverso una campagna di validazione rispetto alle prove sperimentali.

3.4 Criteri di lesione

Le prove su corpi umani piuttosto che su animali dalle caratteristiche biomeccaniche assimilabili a quelle umane, sono state necessarie per definire i criteri di lesione e la tolleranza alle sollecitazioni massime.

Le ferite traumatiche derivanti da incidenti aerei possono essere classificate come ferite da contatto, piuttosto che da accelerazione. Possono considerarsi entrambe derivanti dall'applicazione di forze agli occupanti del velivolo, per mezzo di un'area di contatto che subisce una accelerazione impulsiva [16].

Le ferite da accelerazione sono caratterizzate da un'area di applicazione ampia e non provocano lesioni localizzate. La lesione avviene in realtà lontano dall'area di applicazione dell'accelerazione ed è causata dalla risposta inerziale del corpo. Un esempio di questo tipo di lesione è rappresentato dalla rottura dell'aorta che subisce un'accelerazione attraverso l'applicazione di una forza da parte del sedile, attraverso le cosce, i lombi e la schiena dell'occupante. La risposta inerziale all'accelerazione verticale, genera le forze di taglio che inducono questa grave ferita.

La prevenzione di questo tipo di lesioni richiede l'attenuazione delle accelerazioni trasmesse al corpo per mezzo di sistemi di assorbimento di energia mentre le lesioni da contatto possono essere evitate soltanto impedendo che oggetti potenzialmente pericolosi possano colpire con i passeggeri. Quest'ultimo tipo di lesioni viene limitato prevedendo sistemi di ritenzione piuttosto che rinforzi alla struttura per evitare l'intrusione di materiali all'interno dell'abitacolo.

3.4.1 Lesioni ambientali

Sono classificate come lesioni ambientali tutti gli eventi traumatici che possono avvenire nella fase appena successiva all'impatto e la condizione di maggior pericolo è sicuramente rappresentata dagli incendi.

Le lesioni di tipo ambientale sono riassunte dall'acronimo CREEP [16]:

C: contenitore. Si tratta della cabina dell'elicottero che comprende sia lo spazio riservato ai passeggeri che di quello riservato ai piloti che deve essere sufficientemente robusta da prevenire l'intrusione della struttura in quest'area.

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto

R: ritenzione. Sedile, cinture di sicurezza e agganci di queste ultime devono contenere i passeggeri e resistere per i massimi carichi scaturiti da un impatto potenzialmente sopravvivibile anche in presenza di deformazioni macroscopiche.

E: Energia. L'assorbimento di energia per gli elicotteri è problematico per il poco spazio a disposizione per ridurre i carichi derivanti da un impatto, soprattutto se dominato dalla componente verticale di velocità. Diventa fondamentale lo sfruttamento degli spazi disponibili e degli organi in grado di fornire un supporto all'introduzione di assorbitori di energia. In generale è possibile individuare queste aree nel carrello di atterraggio, nel sottopavimento e nel sedile con dispositivi di assorbimento di energia.

E: Ambiente (Environment). In questa voce si classifica il posizionamento degli arredi, studiato per minimizzare la possibilità di collisione tra questi e gli occupanti della cabina a seguito di un incidente. Partendo dal presupposto che gli spazi sono estremamente ridotti, nel caso in cui sia impossibile assicurare che non avvengano collisioni tra occupanti ed oggetti posti all'interno della cabina, diventa necessario prevedere sistemi in grado di limitare le conseguenze di tali eventi.

P: Post Incidente. I sopravvissuti ad un incidente corrono rischi anche nelle fasi immediatamente successive all'impatto per le minacce rappresentate dallo scenario in cui si trovano. Il fuoco, il fumo, piuttosto che i fluidi fuoriusciti dagli impianti dell'elicottero sono altri elementi che possono pregiudicare la salvaguardia degli occupanti. La maggiore minaccia è sicuramente rappresentata dalla forte probabilità di innesco di un incendio. La migliore strategia è l'allontanamento dal relitto il più rapido possibile ma è indispensabile che siano verificate le condizioni che la consentono.

3.5 Sedile con dispositivo di assorbimento di energia

È stato implementato in Abaqus il modello di un sedile aeronautico prodotto dalla Martin Baker, costituito di due entità principali: una parte fissata al suolo della cabina ed una parte mobile che comprende seduta e schienale, vincolata alla precedente. La struttura è realizzata in alluminio e ricoperta da un'imbottitura morbida per il comfort degli occupanti.

La parte fissa è modellata per mezzo di due corpi rigidi vincolati al pavimento della cabina in quattro punti mentre la parte mobile è costretta a muoversi, rispetto alla parte fissa, lungo la direzione imposta da tre giunti traslazionali. L'assorbitore di energia, posto tra parte fissa e parte mobile del sedile, è modellato tramite un elemento di trave la cui legge costitutiva elasto-plastica definisce parte dell'oggetto di studio di questa tesi. Questo elemento è affiancato da una molla non lineare che agisce in parallelo, in grado di simulare l'effetto di finecorsa e di limitare la stessa entro i vincoli di progetto. L'effetto dell'imbottitura di seduta e schienale è modellato tramite leggi di contatto che tengono in considerazione la compenetrazione e l'attrito tra le superfici.

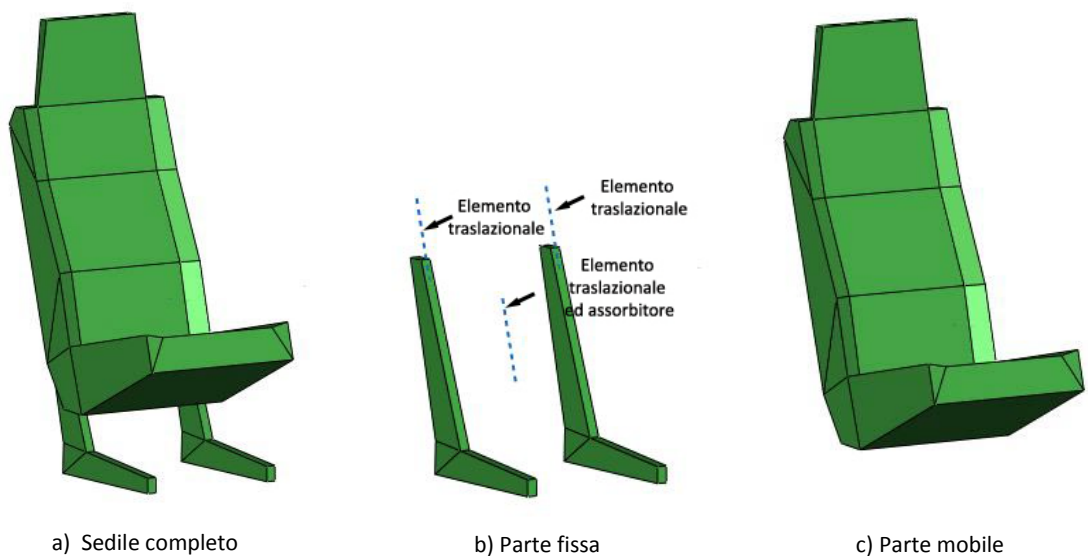


Figura 11 – Modello sedile completo Martin Backer

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto

L'assorbitore di energia, posto sul sedile, risulta una soluzione efficace ai fini del contenimento del carico lombare. Questo elemento non è direttamente sollecitato da un contatto fisico nell'impatto, come lo sono invece i dispositivi posti sul carrello o nel sottopavimento.



Figura 12 – Sedile Martin Backer

L'assorbitore installato sul sedile della Martin Backer è costituito da un tubo realizzato in materiale metallico, due rotelle ed un cursore. Le rotelle montate sul cursore deformano plasticamente il tubo durante le fasi di scorrimento del sedile lungo le guide, assorbendo l'energia cinetica scaturita nell'impatto.

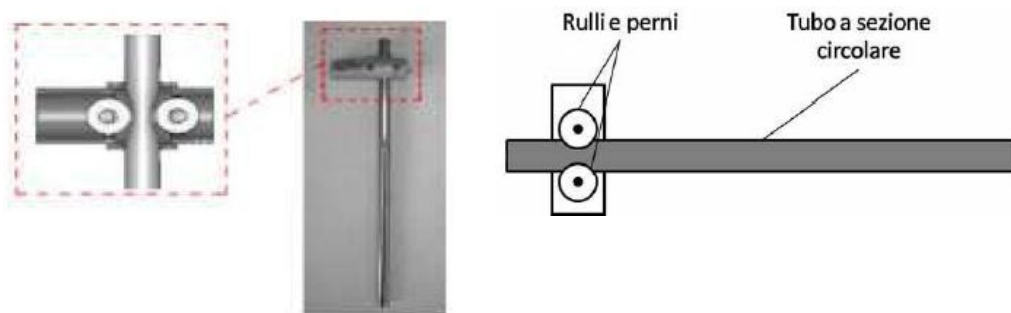


Figura 13 – Assorbitore di energia

Esistono altre strategie, sempre basate sulla deformazione plastica dei materiali, per ottenere i medesimi effetti.

Capitolo 3

Gli assorbitori possono essere progettati per fornire un certo livello di forza, pressoché costante, durante la loro corsa di deformazione. Il funzionamento risulterà differente in base al peso dell'occupante: un passeggero più leggero rispetto al cinquantesimo percentile potrebbe accusare un carico lombare superiore rispetto ai valori stimati in fase di progetto mentre uno più pesante sfrutterebbe una maggiore quantità di corsa disponibile.

Esistono altri tipi di assorbitori che hanno una legge costitutiva non perfettamente plastica che dunque rispondono con un diverso livello di forza in base alla quantità di corsa sfruttata.

Il lavoro svolto in questa tesi si propone di implementare un metodo in grado non di valutare il funzionamento di un assorbitore in base alle condizioni di utilizzo, bensì di emettere le specifiche di realizzazione perché funzioni in certe condizioni.

3.5.2 Cinture di sicurezza

Il modello di sedile analizzato è dotato di cinture di sicurezza a quattro punti, riprodotte per mezzo di elementi monodimensionali collegati alla struttura tramite molle atte al precarico delle stesse. Il materiale è stato definito attraverso prove sperimentali condotte alla Delft University of Technology nel 2002 [9] i cui risultati sono riportati in Figura 14.

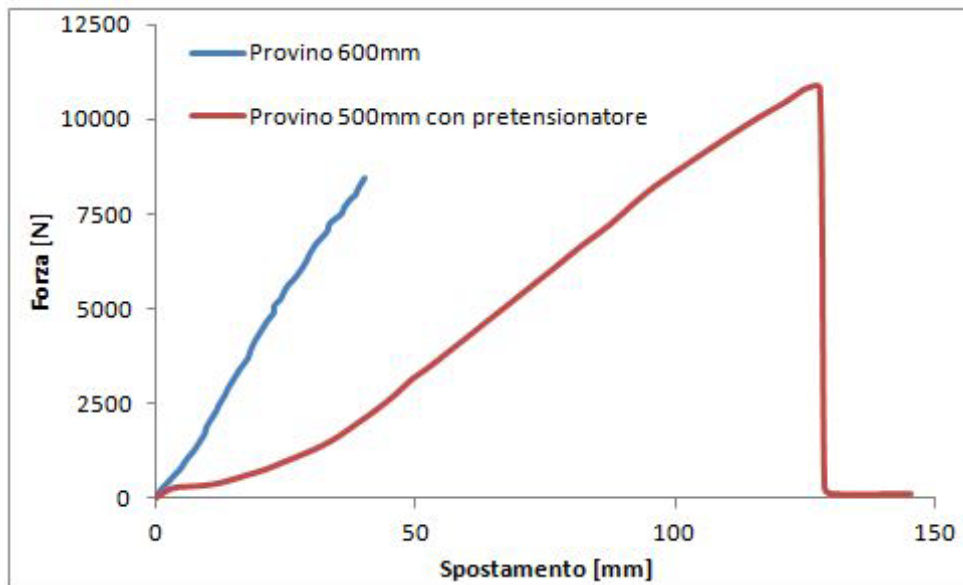


Figura 14 – Diagrammi forza spostamento delle cinture di sicurezza con e senza avvolgitore

3.6 Sottopavimento

Il sottopavimento è una parte della struttura dell'elicottero, disposta sotto la cabina, che può essere sfruttata per l'inserimento di dispositivi di assorbimento di energia, incrementando la corsa utile alla riduzione della velocità. Può inoltre contribuire a garantire una parziale continuità al pavimento interno della cabina nel caso di un impatto con il suolo.

La realizzazione di un sottopavimento in grado di migliorare il comportamento della struttura in termini di sicurezza passiva prevede il posizionamento, tra il pavimento della cabina e il rivestimento esterno della struttura, di elementi di assorbimento connessi a componenti in grado di trasferire carichi, quali longheroni e centine di fusoliera. L'ampia superficie che caratterizza questa

Capitolo 3

zona permette di sfruttarla per distribuire il carico e ridurre la pressione concentrata, attraverso uno schiacciamento che risulti il più possibile uniforme.

In Figura 15 è riportata la struttura tipica del sottopavimento di un elicottero.

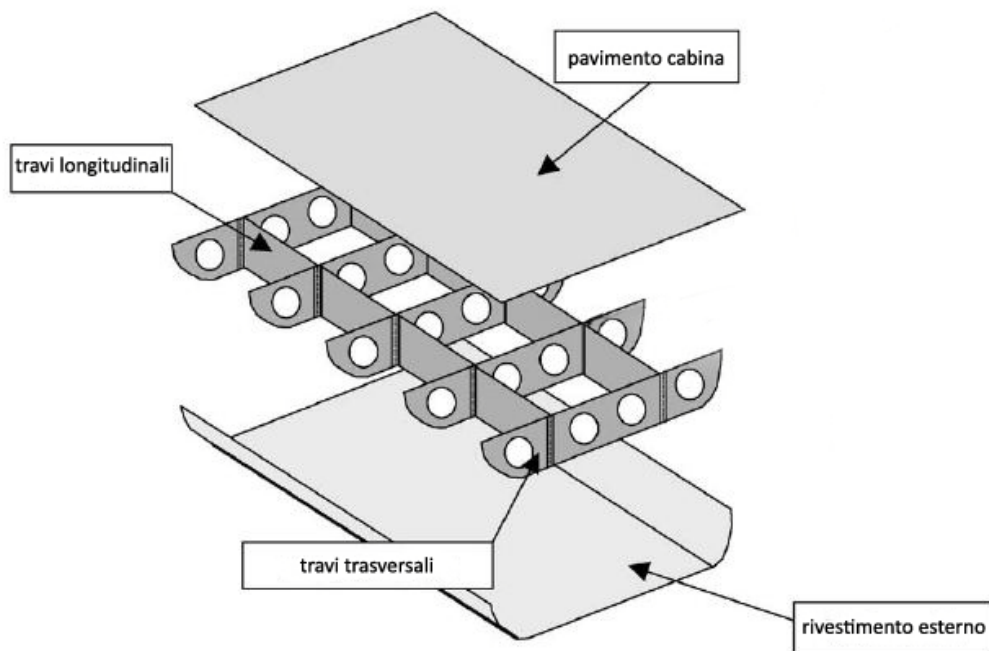
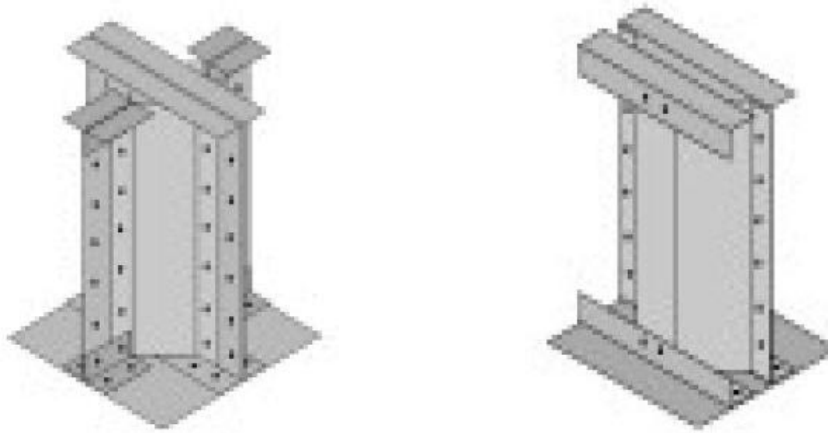


Figura 15 – Struttura tipica del sottopavimento di un elicottero [13]

I longheroni ed i rinforzi trasversali della struttura del sottopavimento sono progettati secondo i criteri aeronautici di massima leggerezza e realizzati con travi a pareti sottili. Gli incroci di questi elementi si prestano all'installazione di assorbitori di energia poiché tali zone ben si adattano al trasferimento di carichi assiali lungo la direzione trasversale alle travi stesse (Figura 16).

Vengono inoltre collocati assorbitori intermedi distribuiti lungo i longheroni, che ampliano la possibilità di limitare il carico trasferito in cabina.

Descrizione del modello per lo studio dell'impatto



a) Assorbitori posti agli incroci tra le travi del sottopavimento

b) Assorbitori distribuiti

Figura 16 – Assorbitori di energia tipici del sottopavimento

In Figura 17 è riportato uno schema semplificato di una porzione di sottopavimento completa di assorbitori concentrati e distribuiti.

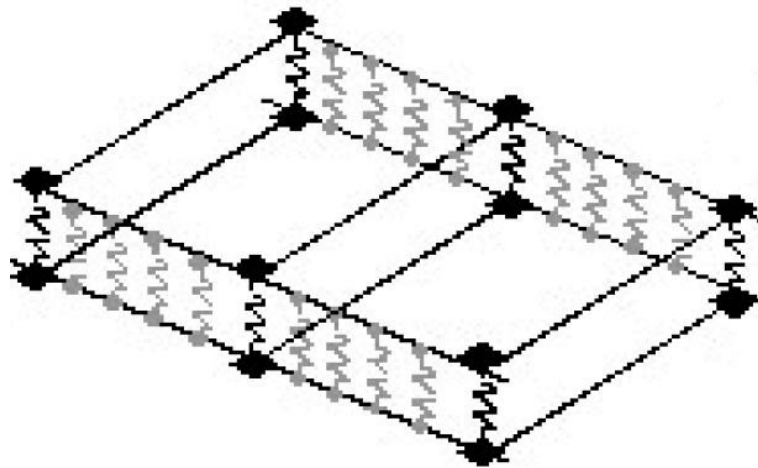


Figura 17 – Schema semplificato di sottopavimento completo di assorbitori concentrati e distribuiti

Capitolo 3

Il collasso della struttura di un assorbitore concentrato è generalmente caratterizzato da un picco di attivazione seguito da oscillazioni di entità minore attorno ad un valore che può essere ritenuto circa costante. Tale andamento è frutto del cedimento controllato dell'elemento sottoposto a carico assiale. L'area sottesa dalla curva rappresenta la quantità di energia che questo componente è in grado di assorbire (Figura 18).

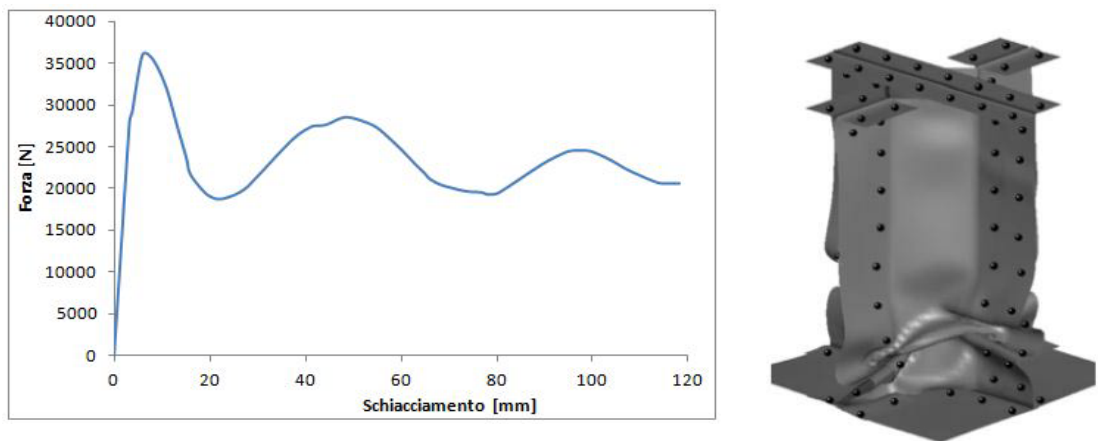


Figura 18 – Cedimento tipico di un elemento di intersezione riprodotto tramite analisi numerica [14]

Gli assorbitori distribuiti sono generalmente realizzati con l'impiego di lamine di alluminio che compongono una scatola chiusa e garantiscono un comportamento stabile ed efficiente. La Figura 19 mostra l'andamento della curva forza/schiacciamento di un assorbitore distribuito tipico.

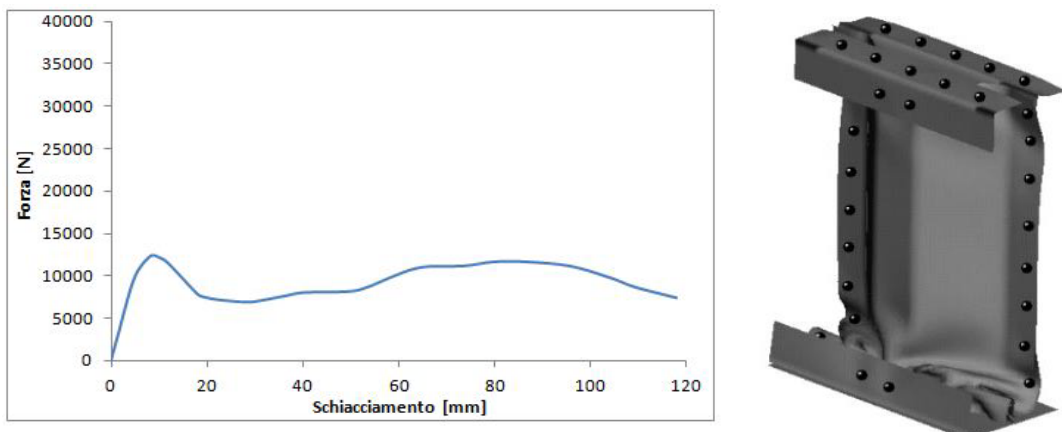


Figura 19 - Cedimento tipico di un assorbitore distribuito riprodotto tramite analisi numerica [14]

Gli elementi descritti sono riproducibili tramite il codice ad elementi finiti che risulta uno strumento efficiente per studiarne caratteristiche e potenziali sviluppi.

L'analisi della struttura assemblata deve però essere demandata ad un codice multi corpo per evitare che le molte interazioni tra diversi elementi comportino un aggravio del costo computazionale della prova eseguita per mezzo del modello numerico.

3.7 Parametri coinvolti nella valutazione del livello di sicurezza passiva

Le analisi numeriche, svolte nell'arco di questo lavoro di tesi, sono caratterizzate da una velocità di impatto di 10m/s, in direzione puramente verticale. I parametri tenuti in considerazione per la valutazione del livello di sicurezza raggiunto tramite i dispositivi di assorbimento di energia, descritti nei prossimi capitoli, sono il carico lombare, la corsa della parte mobile del sedile e degli elementi disposti nel sottopavimento.

Il carico lombare, per l'impatto verticale, è da considerarsi il criterio per stabilire il livello di sicurezza raggiunto ed il limite definito come soglia di probabile sopravvivenza è pari a 6670N.

4 Validazione del modello di manichino

Il modello di manichino antropomorfo impiegato nelle prove numeriche è stato validato in tre condizioni che prevedono l'utilizzo di un sedile rigido e di un sedile aeronautico certificato completo di sistemi di assorbimento di energia. I risultati sperimentali sono il frutto di un'intensa campagna di prove condotte presso il TNO di Delft finalizzate ad un sostanziale incremento della sicurezza passiva in ambito elicotteristico.

Grazie ad essa sono noti molti dei comportamenti ad impatto del manichino Hybrid III rappresentativo del cinquantesimo percentile nelle tre situazioni riportate in questo capitolo, sia per quel che riguarda la risposta globale, sia riguardo le singole parti che lo compongono.

Le prove sono state eseguite su diverse tipologie di sedile e con diversi sistemi di ancoraggio per mezzo delle cinture di sicurezza.

4.1 Sedile rigido e cinture di sicurezza a due punti di ancoraggio

La prima prova di validazione è stata eseguita su un sedile rigido, montato su una slitta mobile in grado di conferire un'accelerazione secondo un profilo temporale prestabilito. Il sedile è disposto con un angolo di 60° tra seduta e slitta, mentre il sistema di ritenzione del passeggero è costituito da una cintura di sicurezza in nylon a due punti di ancoraggio in corrispondenza della parte bassa del bacino (Figura 21). L'accelerazione imposta ha un profilo triangolare e raggiunge all'apice massimo un valore pari a 30g dopo 0,031s secondo le normative che regolamentano le prove di certificazione dei sedili [8;9].

Validazione del modello di manichino

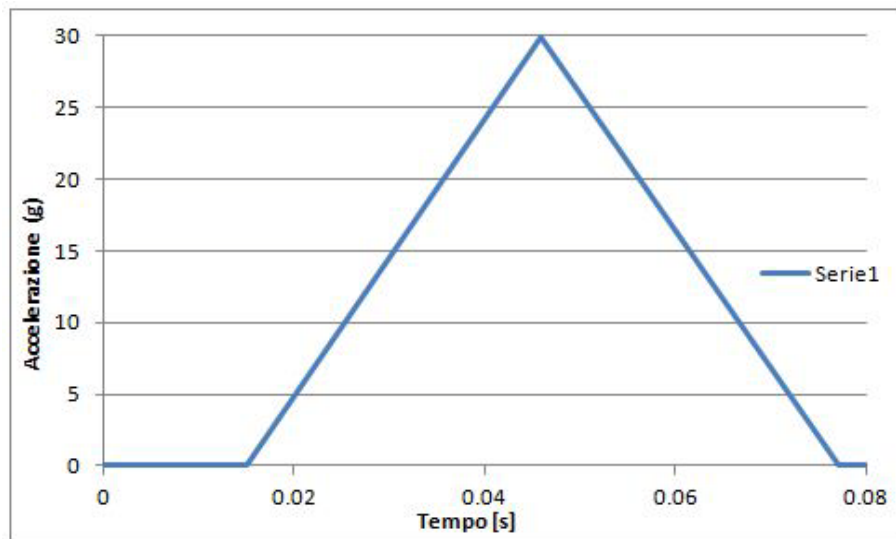


Figura 20 – Profilo di accelerazione applicato alla slitta



Figura 21 – Prova sperimentale sul manichino Hybrid III 50° percentile disposto su sedile rigido con sistema di ritenzione a due punti di ancoraggio

Il sedile è costituito da due piastre di acciaio che formano un angolo tra seduta e schienale di 90°; può essere considerato una struttura rigida poiché è formato da lastre di 30mm di spessore. La seguente Figura 22 mostra il confronto tra carichi lombari ottenuti nel caso della prova sperimentale e in quello dell'analisi numerica con modello di manichino validato.

Capitolo 4

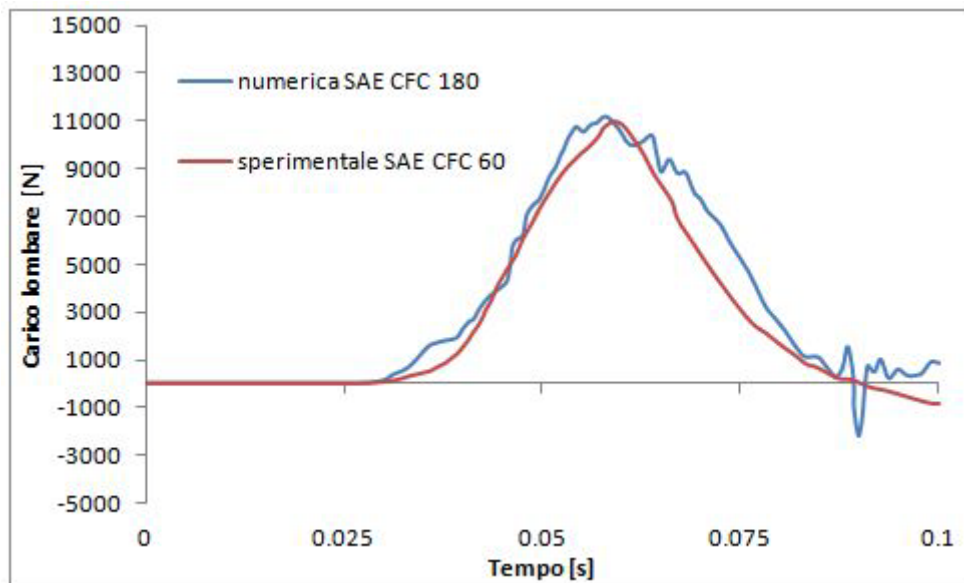


Figura 22 – Correlazione numerico sperimentale del carico lombare per il manichino disposto su sedile rigido con sistema di ritenzione a due punti di ancoraggio

Le Figure 23 e 24 presentano la dinamica dell’impatto durante la prova sperimentale di certificazione e per mezzo dell’analisi numerica:

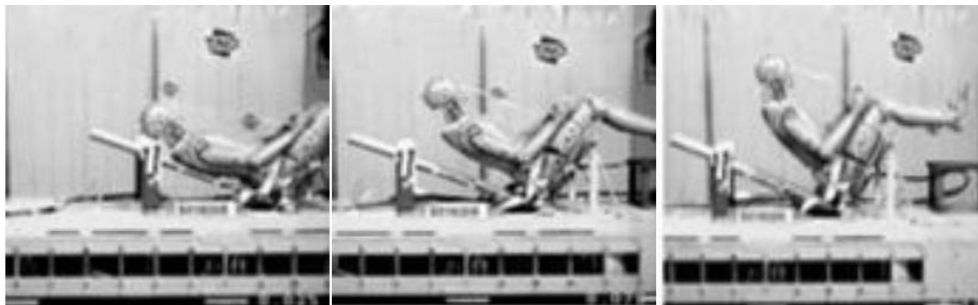


Figura 23 - Sequenza temporale della prova su sedile rigido con cintura di sicurezza a due punti di ancoraggio

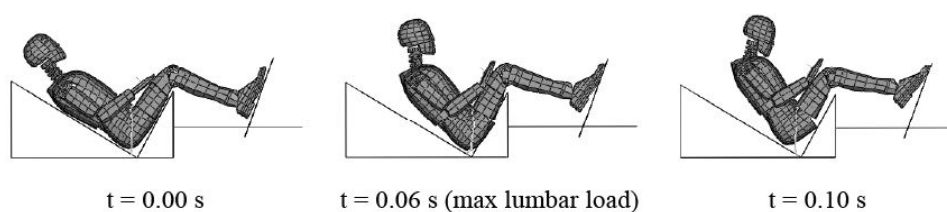


Figura 24 – Sequenza temporale dell'analisi numerica condotta su sedile rigido con cintura di sicurezza a due punti di ancoraggio

Il carico lombare supera abbondantemente il limite ammissibile di 6670N definito da normativa, ma il confronto tra le curve ottenute nel caso numerico e in quello sperimentale è confortante.

4.2 Sedile rigido e cinture di sicurezza a quattro punti di ancoraggio

Le condizioni di prova sono le medesime del caso descritto nel capitolo precedente, ma questa volta si analizza un sistema di ritenzione a quattro punti di ancoraggio con cinture di sicurezza in nylon che passano anche sopra le spalle dell'occupante.

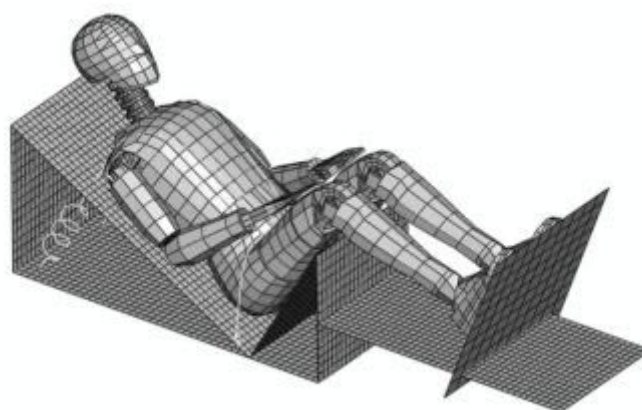


Figura 25 – Modello per analisi numerica sul manichino Hybrid III 50° percentile disposto su sedile rigido con sistema di ritenzione a quattro punti di ancoraggio

Capitolo 4

Questo accorgimento limita lo spostamento della parte superiore del manichino a seguito dell'impatto. In Figura 26 è riportato il grafico di confronto tra le curve di carico lombare ottenute in questa condizione durante la prova sperimentale e nell'analisi numerica.

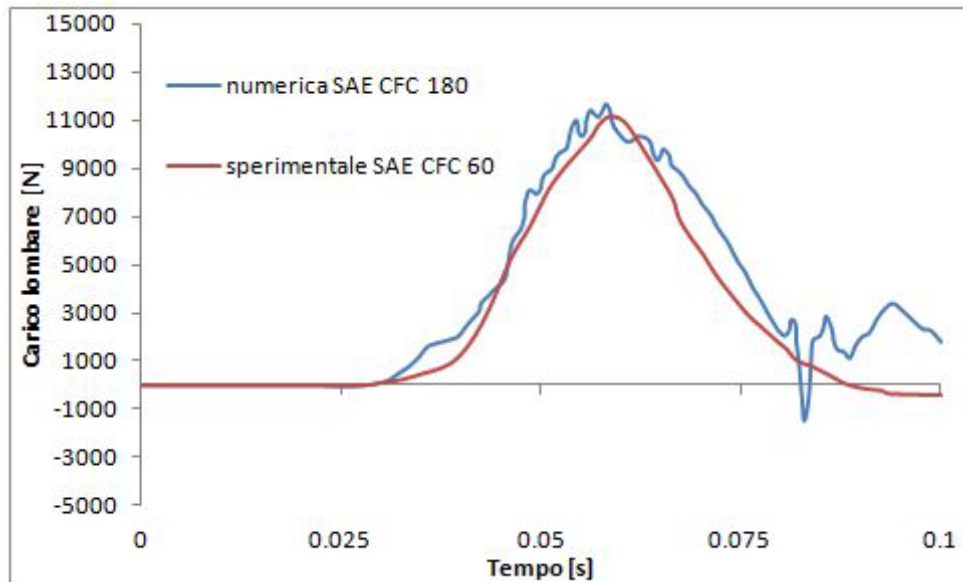


Figura 26 - Correlazione numerico sperimentale del carico lombare per il manichino disposto su sedile rigido con sistema di ritenzione a quattro punti di ancoraggio

Le curve ottenute mostrano una correlazione soddisfacente tra il caso sperimentale e i risultati numerici soprattutto nelle fasi salienti dell'impatto.

4.3 Sedile deformabile equipaggiato con assorbitore di energia e cinture di sicurezza a 4 punti di ancoraggio

L'ultima configurazione prevista per la validazione del modello numerico del manichino antropomorfo prevede l'utilizzo di un sedile deformabile, equipaggiato con un assorbitore di energia e con sistema di ritenzione del passeggero costituito da cinture di sicurezza a quattro punti di ancoraggio. Le condizioni di prova sono le medesime considerate in precedenza.

La corsa del sedile è stata limitata, sia nella prova sperimentale che nell'analisi numerica, a 120mm.

I risultati del confronto numerico sperimentale sono riportati in Figura 27 e 28.

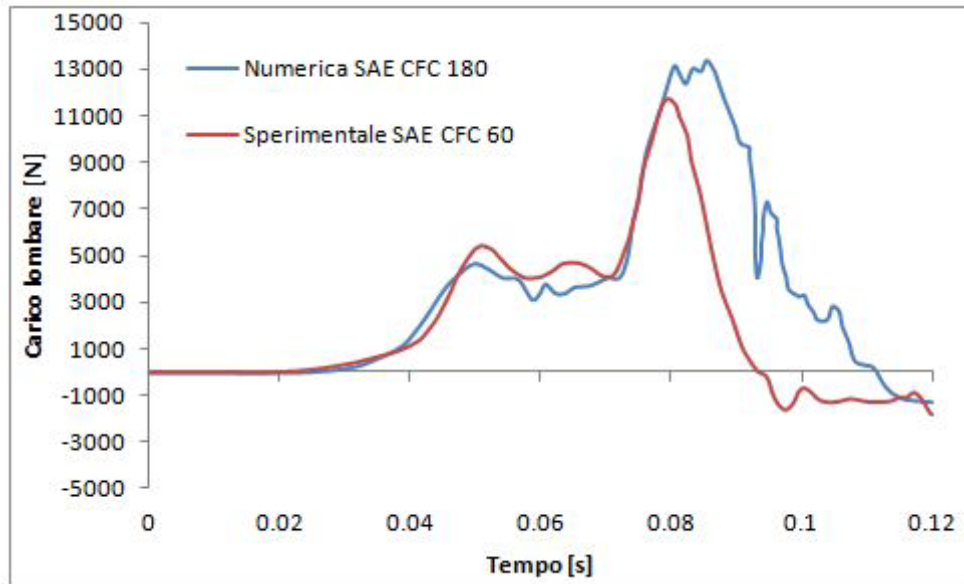


Figura 27 - Correlazione numerico sperimentale sul carico lombare per il manichino disposto su sedile deformabile con sistema di ritenzione a quattro punti di ancoraggio

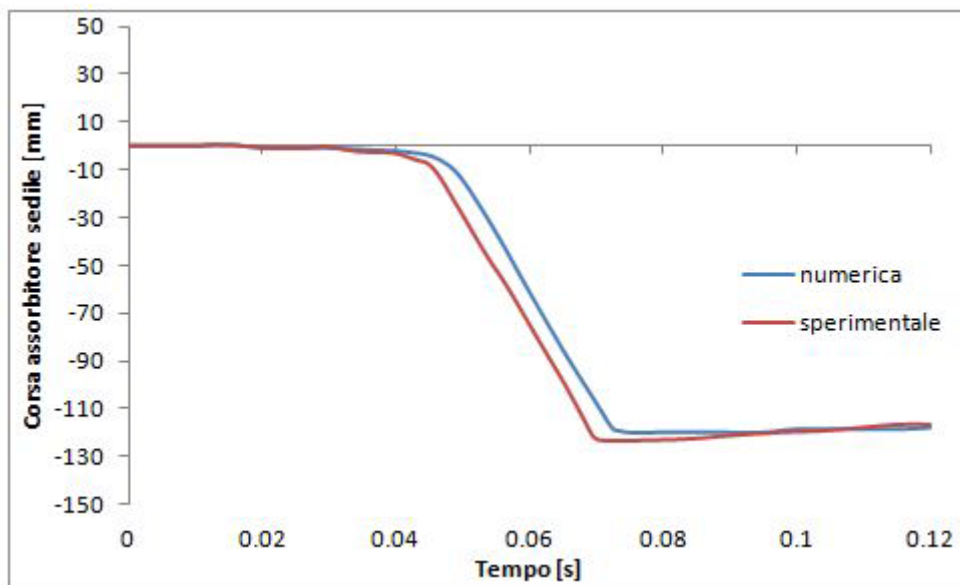


Figura 28 - Correlazione numerico sperimentale sulla corsa dell'assorbitore per il manichino disposto su sedile deformabile con sistema di ritenzione a quattro punti di ancoraggio

Capitolo 4

La correlazione è anche in questo caso buona, soprattutto nelle fasi che precedono il raggiungimento del finecorsa: lo scostamento tra i carichi lombari che si verifica oltre gli 0,08s è da mettere in relazione al raggiungimento del finecorsa dell'assorbitore del sedile, identificabile nel brusco cambio di pendenza che in Figura 28 è riscontrabile al medesimo istante temporale.

5 Configurazione con sottopavimento

La prova di impatto si avvale di due elementi adibiti all'assorbimento di energia:

- Sedile deformabile
- Sottopavimento con incroci

Il sottopavimento è, in realtà, una piccola porzione che riproduce una struttura a "tre baie", con il sedile posizionato al centro di una di esse (Figura 29).

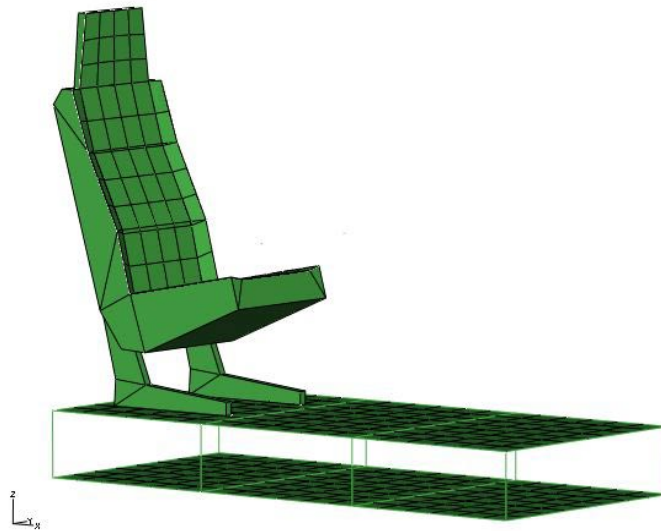


Figura 29 – Sedile e sottopavimento

Ogni baia misura 556mm in senso longitudinale e 780mm in senso trasversale. La distanza tra pavimento e sottopavimento è di 200mm, pari alla corsa massima degli assorbitori di energia, posti agli estremi di ogni baia.

Le superfici del pavimento e del sottopavimento sono modellate per mezzo del metodo a elementi finiti con elementi di piastra dallo spessore di 5mm.

I rinforzi longitudinali e trasversali sono costituiti da elementi di trave dalla forma a "T" con le dimensioni riportate in Figura 30.

Capitolo 5

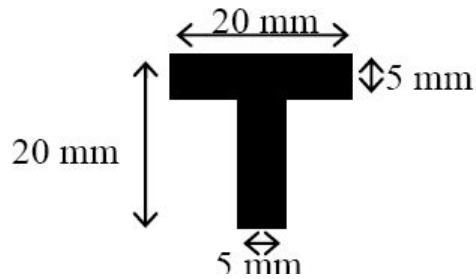


Figura 30 – Sezione tipica degli elementi di trave longitudinali e trasversali

Rispetto alle configurazioni di sottopavimento abitualmente impiegate in ambito aeronautico, che prevedono la presenza di assorbitori distribuiti lungo longheroni e travi trasversali, sono qui previsti solo assorbitori concentrati agli incroci tra i suddetti elementi.

Agli incroci della struttura del sottopavimento è stata assegnata una legge costitutiva Forza-Spostamento con forza media del campo plastico variabile tra 2000N e 12000N e con possibilità di cambiarne la forma secondo i criteri descritti nel prossimo capitolo.

Il terreno di impatto, assunto indeformabile, è stato modellato per mezzo di un corpo rigido. È stato implementato un contatto tra la struttura e il suolo considerando un coefficiente di attrito di 0,3.

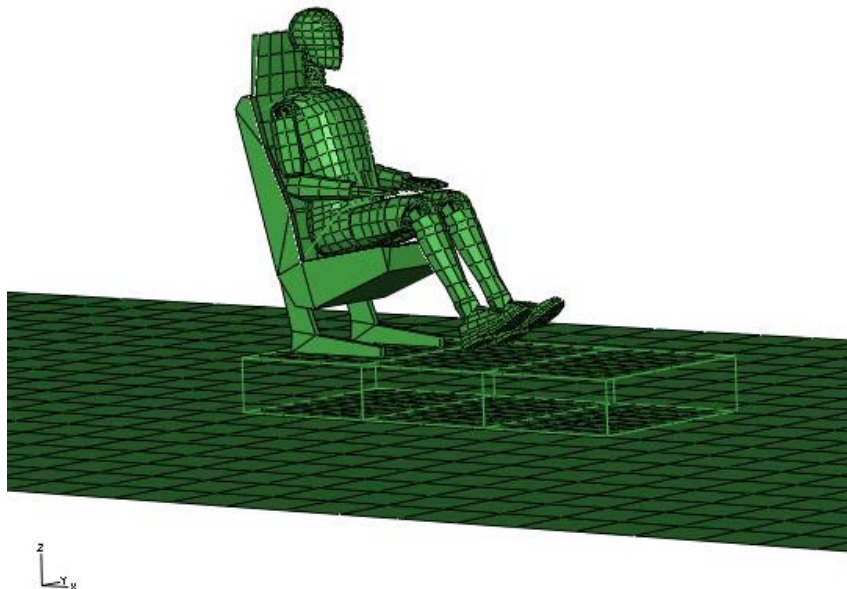


Figura 31 – Modello caduta completo

5.1 Condizioni di prova

La condizione di caduta prevede un'unica direzione di movimento - verticale - e una velocità di impatto di 10m/s.

Per l'analisi di questa configurazione, il manichino validato attraverso le prove descritte nel capitolo 3, viene utilizzato come sensore del carico lombare durante l'impatto.

L'efficienza dimostrata dal modello di manichino ci consente di utilizzare i risultati che derivano dalle analisi numeriche.

5.2 Messa a punto del modello di sedile e sottopavimento

Il modello di manichino ha subito un processo di validazione per mezzo delle prove riportate nel capitolo 3.

Durante le analisi svolte sulla configurazione di impatto puramente verticale è stato raggiunto il valore di blocco di un vincolo cinematico, evento che non si è mai verificato precedente, per altre configurazioni di prova

Attraverso un'analisi di sensitività sui parametri del modello, sono emersi risultati in disaccordo con l'andamento mostrato dal carico lombare in funzione delle leggi costitutive assegnate agli assorbitori del sedile e del sottopavimento che hanno rivelato la presenza di un'imprecisione nella definizione del manichino antropomorfo numerico.

In particolare, le leggi che definivano i movimenti del collo erano la causa del raggiungimento dei blocchi della rotazione dello stesso, introducendo oscillazioni spurie nella curva di carico lombare.

L'evidenza di tale problema è riscontrabile nel seguente grafico in Figura 32

Capitolo 5

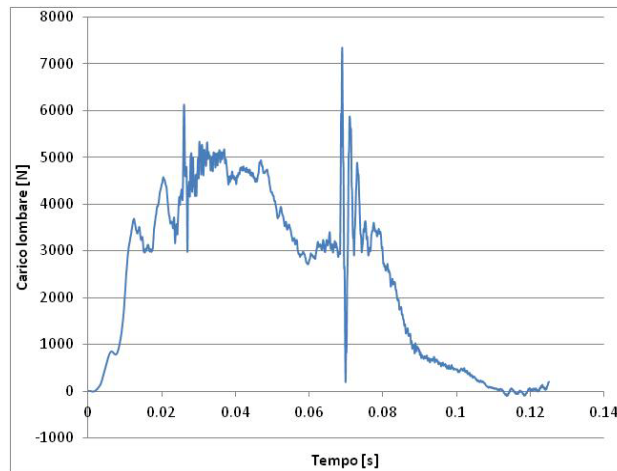


Figura 32 – Carico lombare con blocco del collo a 0,07s

L'oscillazione instaurata dal blocco del collo genera un massimo nella curva di carico lombare, corrispondente ad un picco .

Il blocco nel movimento del collo si evince dalle curve dell'angolo di rotazione rispetto al tempo e di velocità angolare rispetto al tempo riportate in Figura 33:

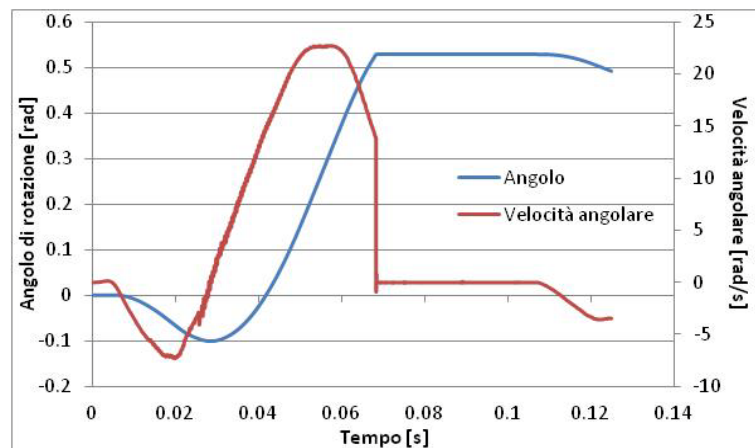


Figura 33 – Angolo di rotazione e velocità angolare del giunto tra collo e spina dorsale

Sono chiaramente visibili il raggiungimento del blocco meccanico del collo, dove la curva blu si stabilizza, per un intervallo di tempo, ad un valore di regime, e l'azzeramento della velocità angolare sulla curva rossa. Entrambi i fenomeni si manifestano nel medesimo istante temporale.

Il blocco genera un picco di momento che si riflette sul carico lombare.

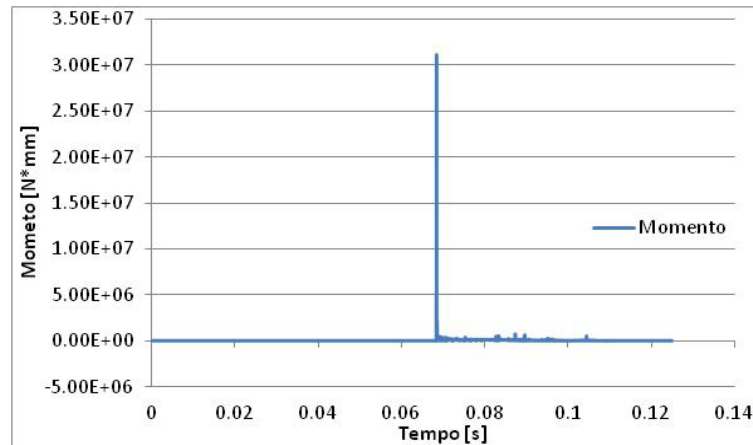


Figura 34 – Curva di momento nel giunto tra collo e spina dorsale

L’evento appena descritto non è mai stato riscontrato prima nelle analisi numeriche di prove con condizioni al contorno differenti; le particolarità di queste ultime, come già illustrato, consistono in una caduta puramente verticale e nella presenza di un sottopavimento predisposto all’assorbimento di energia.

La soluzione proposta prevede un intervento sugli angoli di blocco della rotazione del collo.

La seguente Tabella 1 riporta le variazioni apportate al modello.

Tabella 1 – Variazione dei valori di angolo di blocco nella rotazione del collo del manichino antropomorfo

	Rotazione positiva [Rad]	Rotazione negativa [Rad]
Originale	-0,35	+0,53
Modificato	-1	+1

Dopo aver riscontrato il problema, sono stati inizialmente rimossi i blocchi sugli angoli di rotazione: il risultato è definito in una curva di carico lombare sovrapponibile a quella originale, fino all’istante di blocco del collo.

Capitolo 5

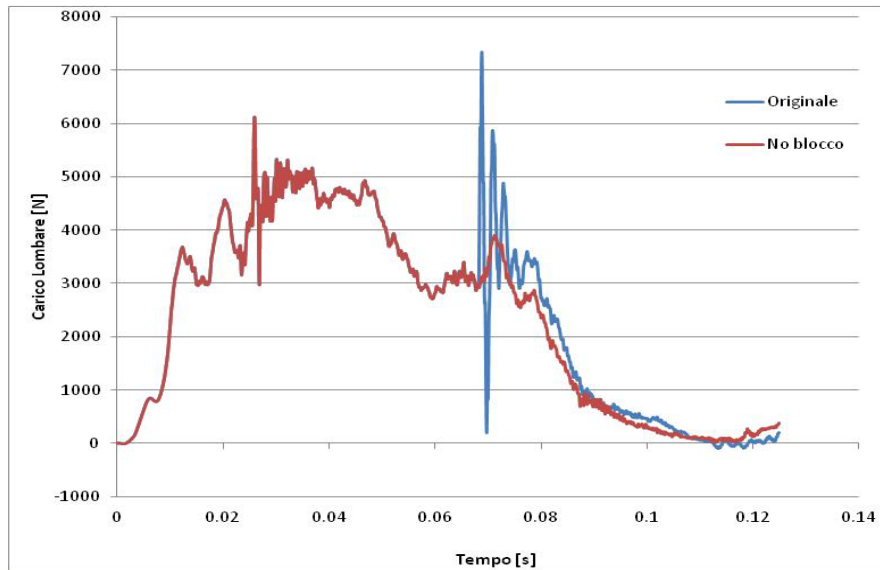


Figura 35 – Confronto tra le curve di carico lombare per i modelli con blocchi della rotazione a $-0,35$ e $+0,53$ rad e con blocchi rimossi

Sono quindi stati introdotti blocchi più fedeli a quelli del manichino, sia rispetto al caso originale che a quello totalmente privo di limitazioni alla rotazione.

Con il manichino così corretto sono state eseguite le analisi di sensibilità descritte nel prossimo capitolo ed oggetto di questo lavoro di tesi.

6 Superfici di risposta

Il seguente capitolo si propone di indagare, attraverso l'utilizzo di superfici di risposta, la miglior legge costitutiva degli assorbitori di energia, posti in corrispondenza della parte mobile del sedile e nei punti di intersezione delle travi del sottopavimento in termini di contenimento del carico lombare e di sfruttamento della corsa utile.

6.1 Pendenza del campo plastico degli assorbitori sedile

Il primo campo di indagine, studiato tramite le superfici di risposta, riguarda l'andamento del campo plastico dell'assorbitore del sedile.

Il modello utilizzato in questo studio è caratterizzato da assorbitori elastici perfettamente plastici per il sottopavimento e da assorbitori elasto-plastici per il sedile.

Le forme delle leggi costitutive di questi assorbitori sono ottenute attraverso l'introduzione nel modello di tre parametri:

- F_{seat} : forza media del campo plastico degli assorbitori del sedile
- K : parametro moltiplicativo per la caratterizzazione del campo plastico degli assorbitori sedile
- F_{sub} : forza media del campo plastico degli assorbitori del sottopavimento

Questi ultimi sono compiutamente definiti dal parametro F_{sub} , mentre il campo plastico del sedile è definito da due forze, $F1$ ed $F2$, originate dalla combinazione di K ed F_{seat} secondo le seguenti formule:

$$F1 = F_{seat} - K * \frac{F_{seat}}{2}$$

$$F2 = F_{seat} + K * \frac{F_{seat}}{2}$$

In Tabella 2 sono riportati i campi di variazione dei parametri controllati:

Capitolo 6

Tabella 2 – Intervalli di variazione dei parametri del modello

Parametro	Valore minimo	Valore massimo
Fseat	5000 [N]	15000 [N]
K	-1	1
Fsub	2000 [N]	12000 [N]

Tali intervalli sono dettati dai valori tipici adottati per questo tipo di elementi e da considerazioni fisiche.

Si intuisce come il parametro K definisca il campo plastico dell'assorbitore del sedile, il quale può assumere una pendenza positiva, negativa o nulla (in questo ultimo modo si ottiene il caso di un assorbitore elastico perfettamente plastico).

Per chiarire quanto appena illustrato, si riportano in Figura 36 e 37 gli andamenti qualitativi delle curve caratteristiche degli assorbitori:

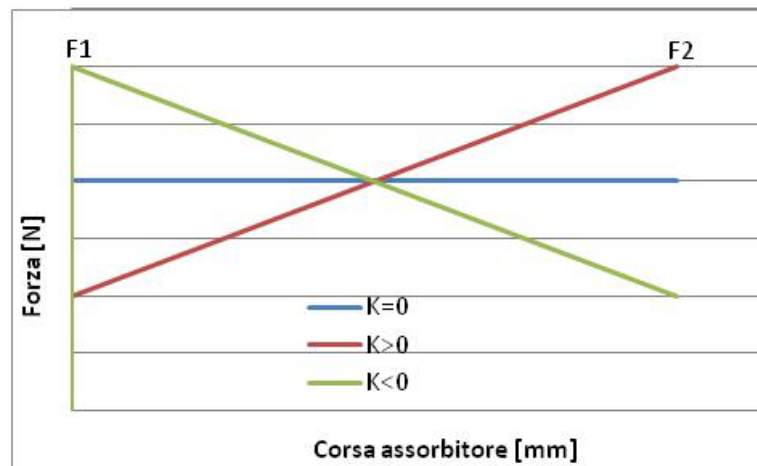


Figura 36 - Andamenti qualitativi delle curve Corsa-Forza degli assorbitori del sedile

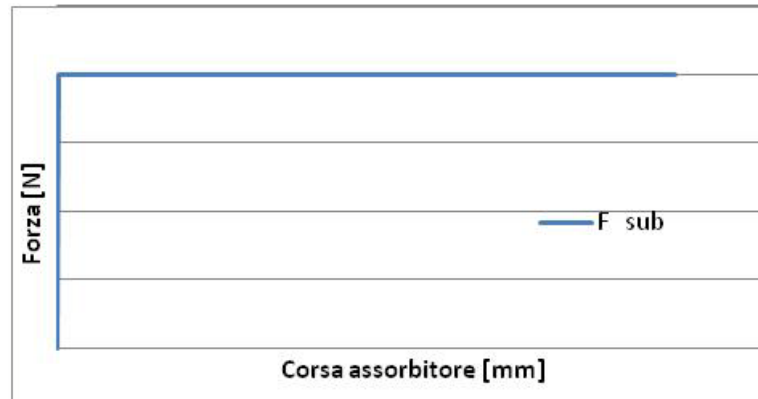


Figura 37 - Andamento qualitativo della curva Corsa-Forza per l'assorbitore del sottopavimento

La corsa di tutti gli assorbitori è pari a 200mm; a 195mm, tuttavia, interviene una molla non lineare che simula il fenomeno di 'bottoming out', ovvero di fine corsa, la cui modellazione non è correlata a prove sperimentali.

6.2 Creazione superfici

Grazie ad [®]iChrome/Nexus è possibile generare un numero predeterminato di analisi (200 in questo caso), con parametri che variano negli intervalli definiti in Tabella 2, con variazione minima di 100N per le forze e di 0,1 per il K.

L'allocazione dei valori dei parametri viene effettuata automaticamente secondo uno schema Latin HyperCubes [15].

Sempre automaticamente, vengono lanciate ed elaborate, attraverso una Macro Python [15], le analisi per ottenere le informazioni di interesse.

Per la costruzione delle superfici di risposta, oggetto delle successive valutazioni, si registrano tutti i carichi lombari massimi ed i valori di corsa massima in modulo di sedile e sottopavimento.

La corsa del sottopavimento si ottiene come media della corsa dei quattro assorbitori che giacciono sugli spigoli della baia in cui è alloggiato il sedile.



Figura 38- Assorbitori coinvolti nel calcolo della corsa del sottopavimento

Avendo considerato tre parametri, i grafici risultano delle ipersuperfici a quattro dimensioni ottenute secondo uno schema Kriging [15], consultabili significativamente per un valore fisso di uno dei detti parametri.

6.3 Condizioni di impatto

La condizione di prova è una caduta puramente verticale con velocità di impatto di 10m/s, ottenuta assegnando tale velocità a tutti i nodi di manichino, sedile e sottopavimento.

La superficie inferiore del sottopavimento è posta in prossimità del piano di impatto, rappresentativo del suolo.

6.4 Risultati

Per l'analisi delle superfici di risposta è necessario fissare un parametro che riporti lo spazio quadridimensionale a tre dimensioni.

Sono stati considerati tre casi, in grado di mostrare la funzionalità di assorbitori con legge costitutiva elastica perfettamente plastica, piuttosto che con legge elasto plastica a pendenza positiva e negativa.

6.4.1 Assorbitore Elastico Perfettamente Plastico

Nel primo caso è stato fissato il valore di K pari a 0, considerando così una combinazione di assorbitori elastici perfettamente plastici.

In questo modo è stato possibile condurre una serie di analisi, con la finalità di rendere visibile la zona di impatto potenzialmente sopravvivibile: viene monitorato il carico lombare in funzione delle forze medie del campo plastico degli assorbitori del sedile e del sottopavimento, qui note come F_{seat} ed F_{sub} (Figura 39).

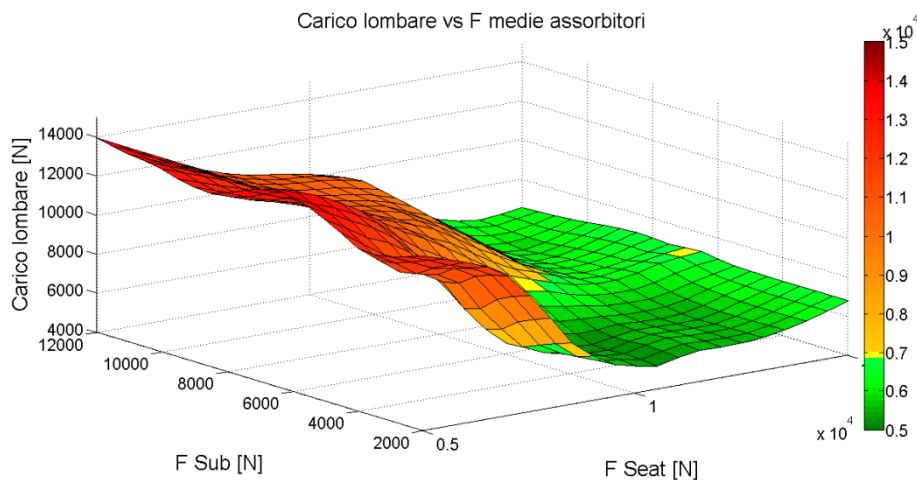


Figura 39 – Superfici di risposta: carichi lombari massimi per $K=0$

Una migliore lettura di questa superficie è offerta da una visione dall'alto della stessa con l'ausilio della scala graduata riportata a lato.

Capitolo 6

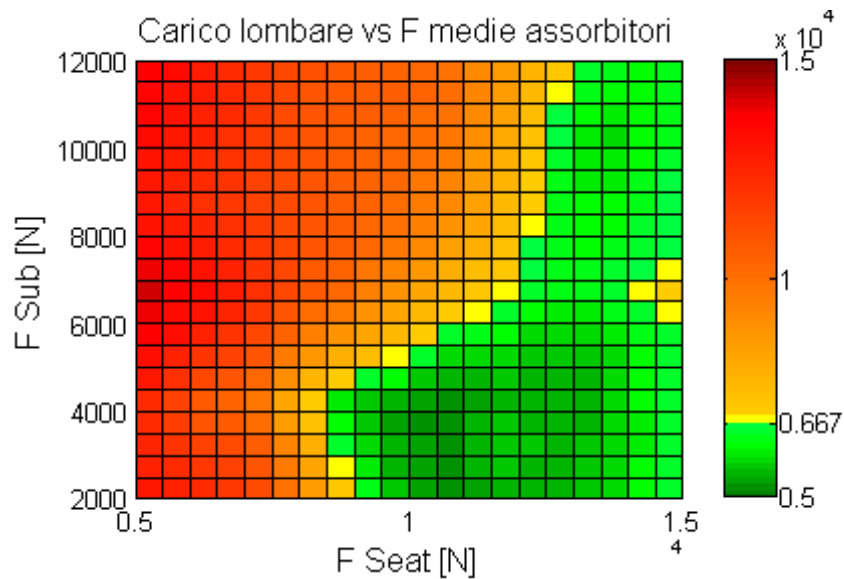


Figura 40 - Superficie di risposta: carichi lombari massimi per K=0 - Visualizzazione 2D

In Figura 40 la zona di colore verde rappresenta la combinazione di F_{seat} ed F_{sub} che, per le condizioni di impatto considerate, assicura un contenimento del carico lombare entro la soglia di 6670N.

Tramite un artificio numerico, è possibile rendere riconoscibile, sulla stessa superficie, il raggiungimento del fine corsa dell'assorbitore del sedile. La nuova visualizzazione permette di individuare le zone da escludere per esaurimento della corsa disponibile e di palesare l'area che, pur contenendo valori di carico inferiori alla soglia di sopravvivenza, si trova al limite del fine corsa.

È importante distinguere questa zona poiché piccole variazioni delle condizioni al contorno potrebbero provocare un repentino incremento del carico lombare, tale da oltrepassare la soglia stabilita secondo normativa.

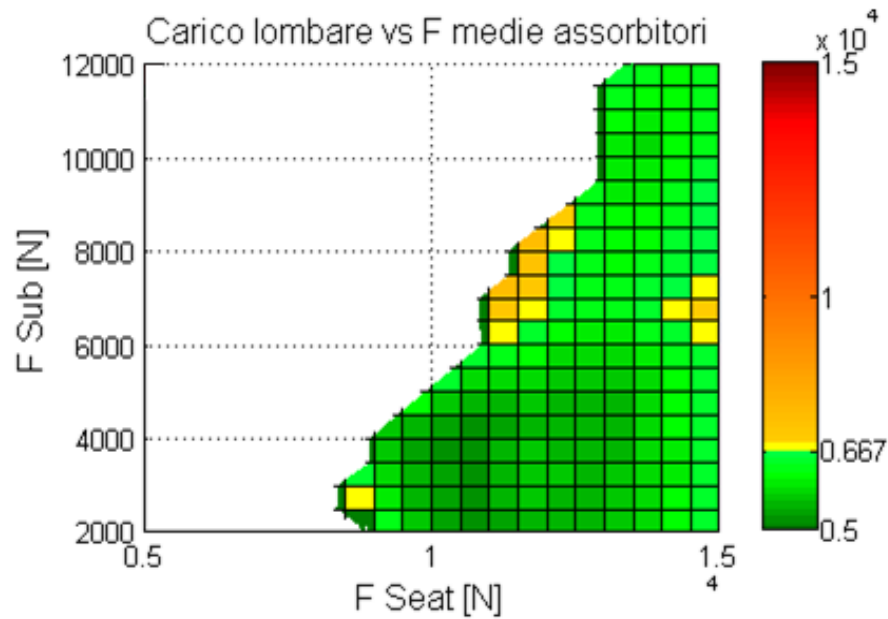


Figura 41 - Superficie di risposta: carichi lombari massimi per K=0 con finecorsa - Visualizzazione 2D

L'area non più visibile in Figura 41 rappresenta il raggiungimento del finecorsa. La visualizzazione della superficie, così come proposta in questa immagine, rende evidente la zona di potenziale salvaguardia dell'occupante.

È interessante notare come l'area in cui il carico lombare eccede il limite di carico lombare definito da normativa è circoscritta all'area di raggiungimento del fine corsa.

Per completezza si riportano le immagini in Figura 42 e 43 delle superfici relative alle corse degli assorbitori di sedile e sottopavimento:

Capitolo 6

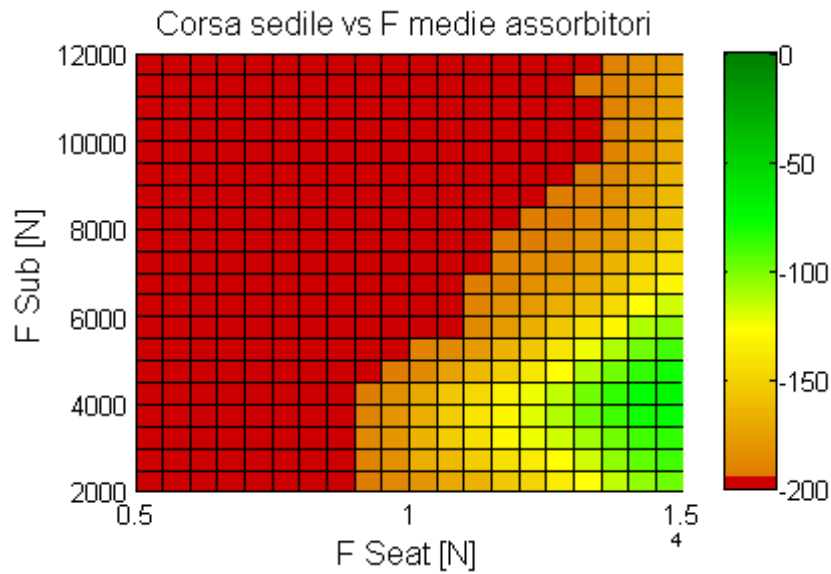


Figura 42 – Superficie di risposta: corse massime assorbitori sedile per K=0

Questa immagine rispecchia quanto visto in precedenza: l'area di colore rosso scuro identifica il finecorsa e la sua forma corrisponde proprio all'area eliminata sulla superficie dei carichi lombari.

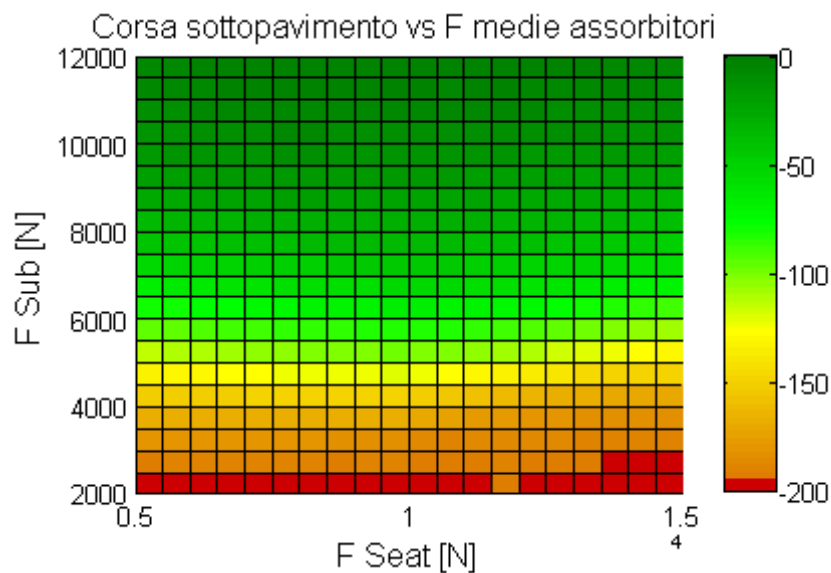


Figura 43 - Superficie di risposta: corse massime assorbitori sottopavimento per K=0

Superfici di risposta

In Figura 43 si nota una sostanziale indipendenza della corsa del sottopavimento dai valori di forza media dell'assorbitore del sedile F_{seat} .

Questa considerazione non vale nel caso della corsa dell'assorbitore del sedile come dimostrato in Figura 44.

Per capire come i due parametri si influenzano vicendevolmente, vengono riportati quattro casi, valutati in prossimità dei confini dei rispettivi domini di variazione:

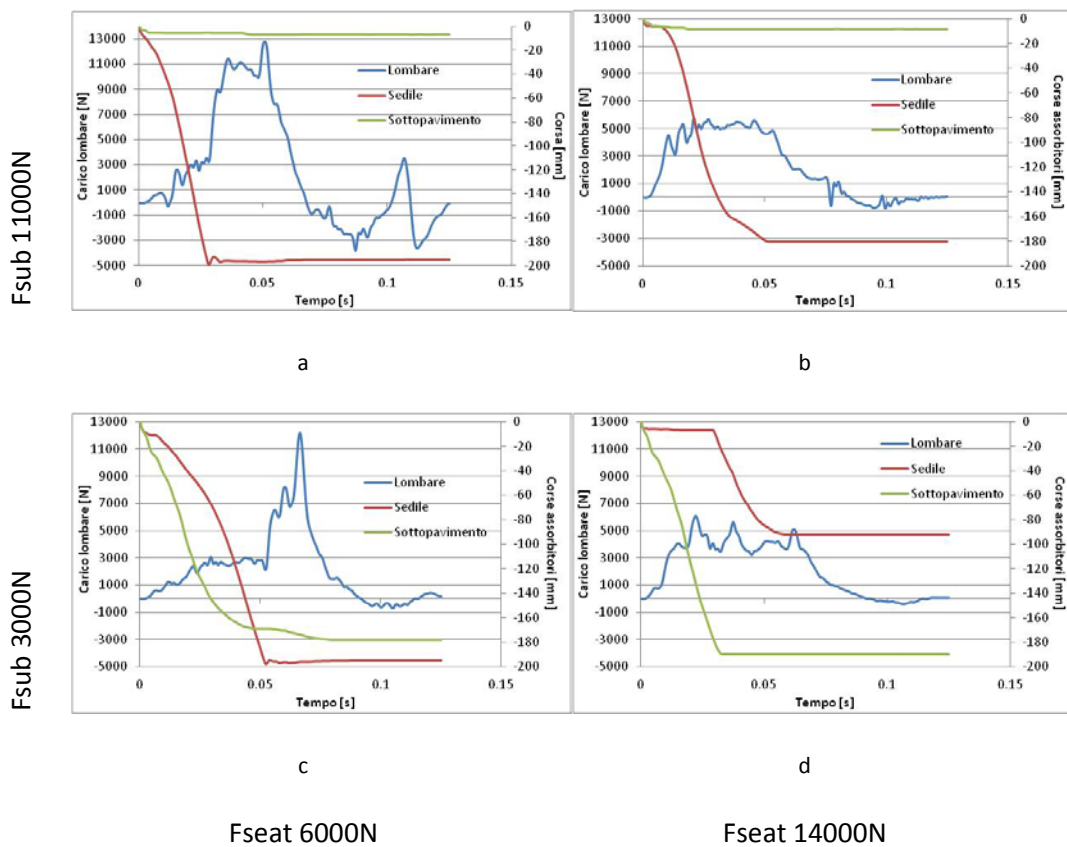


Figura 44 – Confronto casi estremi del domino per $K=0$; a) $F_{seat}=6000N$ $F_{sub}=11000N$; b) $F_{seat}=14000N$ $F_{sub}=11000N$; c) $F_{seat}=6000N$ $F_{sub}=3000N$ d) $F_{seat}=14000N$ $F_{sub}=3000N$

I casi riportati in Figura 44 confermano le indicazioni ricavabili dalle superfici di risposta delle Figure 40 e 41.

I grafici a e c mostrano l'importanza di avere l'assorbitore del sedile che opponga sufficiente resistenza alla deformazione; il raggiungimento del

Capitolo 6

finecorsa del sedile è infatti una condizione di pericolo rispetto al contenimento del carico lombare.

Nei due casi analizzati inoltre si verifica un fenomeno di finecorsa particolarmente brusco.

Il sottopavimento, in queste condizioni, non è in grado di costituire una valida alternativa all'assorbimento di energia da parte del sedile.

I risultati sono caratterizzati dall'intervento della molla non lineare che simula il finecorsa. Questo evento è classificato come un segnale di pericolo, a causa dell'incremento di carico lombare che si verifica nel momento in cui la corsa utile si esaurisce.

Le immagini b e d riportano casi in cui l'occupante ha maggiori probabilità di sopravvivenza grazie ad un sedile che funziona in modo efficace.

È singolare notare che, a parità di F_{seat} , ad una corsa maggiore del sottopavimento corrisponda un valore maggiore di picco sul carico lombare.

La spiegazione è da ricercare non tanto nel valore di corsa massima raggiunto, quanto nel fatto che, per $F_{sub}=3000N$, il sottopavimento si deforma per primo, fino ad un valore di corsa di regime che determina l'entità del picco più elevato di carico lombare (6045N). Solo una volta esaurita la corsa disponibile del sottopavimento anche l'assorbitore del sedile viene attivato.

Per F_{sub} pari a 11000N, la corsa del sottopavimento non viene praticamente sfruttata.

Il contenimento del picco di carico lombare, al valore più basso registrato tra i casi considerati (5769N), è dovuto al lavoro del sedile fin dai primi istanti dell'impatto.

Si riportano, infine, gli andamenti del caso relativo ad una zona di minimo sulla superficie di risposta delle Figure 40 e 41 per una combinazione $F_{seat}=11000N$ $F_{sub}=3500N$.

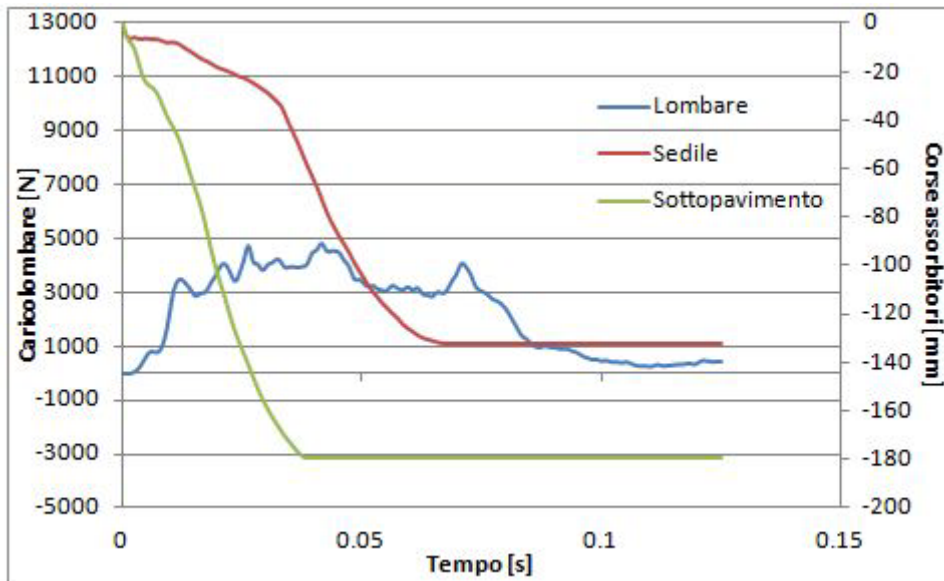


Figura 45 – Andamenti di carico lombare e corse assorbitori per $F_{seat}=11000N$, $F_{sub}=3500N$, $K=0$

La Figura 45 denota una sfruttamento dei dispositivi di assorbimento di energia che avviene contemporaneamente. Durante la fase di maggior schiacciamento del sottopavimento, corrispondente ai primi istanti dell’impatto, il sedile ha già cominciato a deformarsi in modo non trascurabile; al raggiungimento di un valore di regime della corsa del sottopavimento, la curva corrispondente a quella dell’assorbitore del sedile mostra un evidente cambio di pendenza al quale corrisponde anche il picco massimo nella curva di carico lombare.

Questa particolare combinazione di valori di forza media del campo plastico degli assorbitori, porta ad un contenimento del carico lombare entro la soglia di 5000N conservando una corsa utile di 80mm.

6.4.2 Dipendenza da K

Il successivo caso considerato riguarda le eventuali migliorie sul contenimento del carico lombare a seguito dell'introduzione di una pendenza del campo plastico dell'assorbitore.

In questo caso il parametro fissato è F_{seat} : è stato scelto pari a 14000N poiché dalla Figura 41 emerge, per tale valore, una fascia continua in cui appaiono maggiori possibilità di sopravvivenza, lontana dal raggiungimento del finecorsa del sedile.

Di seguito, in Figura 46 viene riportata la superficie relativa al carico lombare in funzione del parametro K e di F_{sub} .

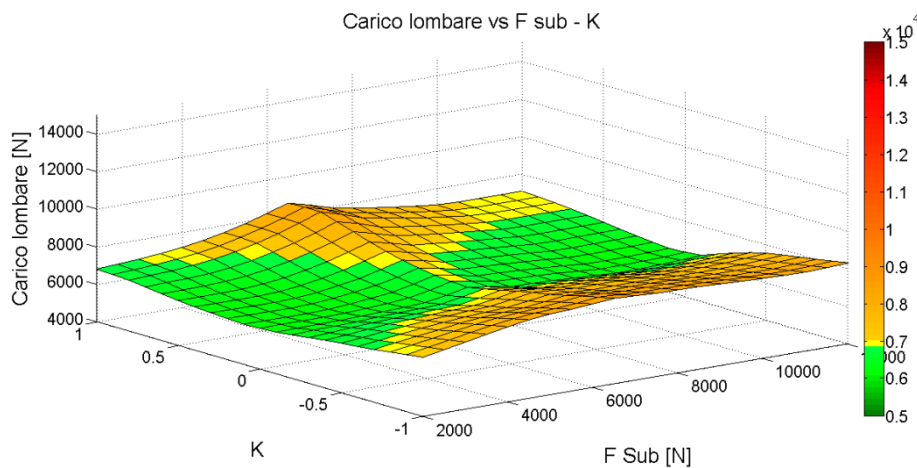


Figura 46 - Superficie di risposta: carichi lombari massimi $F_{seat}=14000N$

L'area verde definisce la zona di probabile sopravvivenza. L'immagine mostra un sostanziale peggioramento della situazione, conseguente ad un aumento del carico lombare in funzione di K. La circostanza si verifica sia procedendo in direzione dei K positivi che di quelli negativi.

Una particolarità di questa superficie, ottenuta per F_{seat} fissato a 14000N, è una "cresta" in corrispondenza della fascia $6500N < F_{sub} < 7000N$.

Il carico lombare cresce fino al raggiungimento del suddetto limite per poi calare con l'aumento di F_{sub} .

Segue una analisi del fenomeno riscontrato attraverso il confronto tra le superfici di risposta ottenute per diversi valori di F_{seat} .

Superfici di risposta

I valori vengono scelti comunque all'interno del dominio $11000N < F_{seat} < 14000N$ che, nel caso elastico perfettamente plastico, identifica una ampia zona di probabile sopravvivenza (vedi Figura 40).

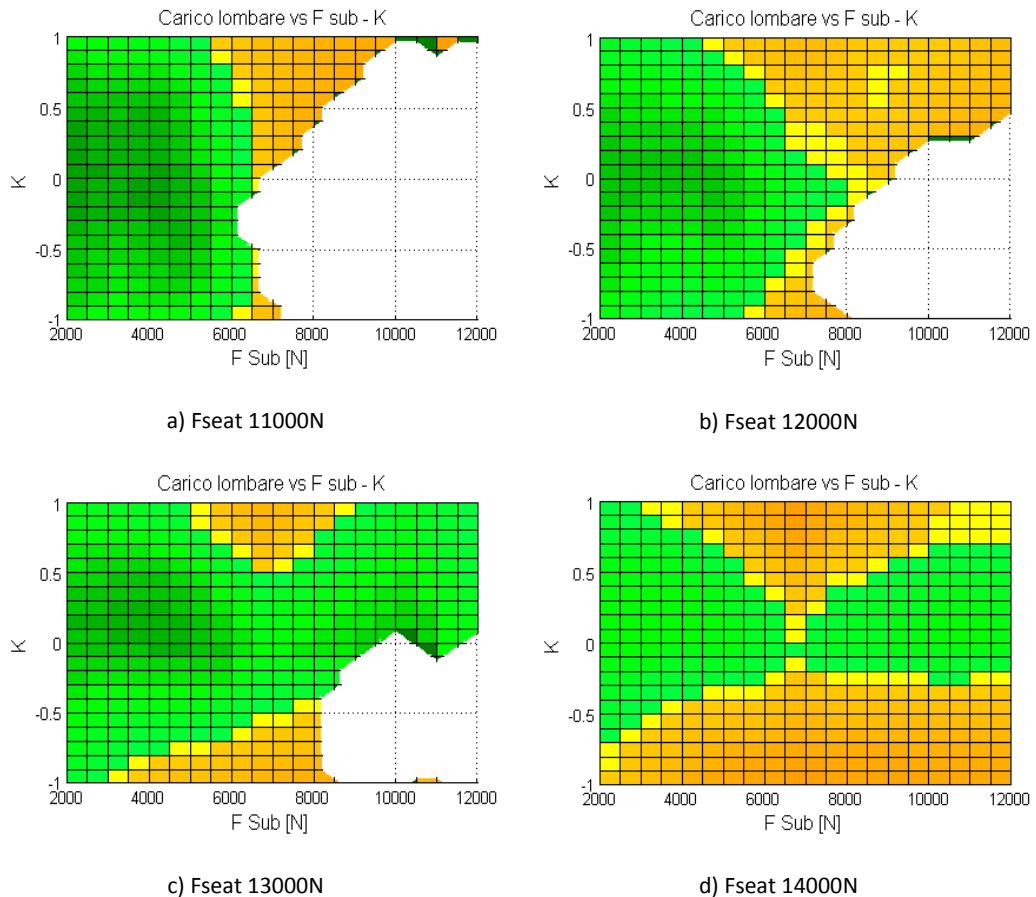


Figura 47 – Confronto superfici di risposta per Fseat crescenti

Passando dalla Figura 47a alla 47b, procedendo dunque in direzione di F_{seat} crescente, diminuisce l'area che corrisponde al raggiungimento del fine corsa sedile ed aumenta la superficie in cui il carico lombare è contenuto entro la soglia limite imposta da normativa.

Un ulteriore aumento di Fseat a 13000N (Figura 47c) genera un incremento evidente dell'area che identifica la probabile sopravvivenza e una ulteriore diminuzione dell'area che identifica il finecorsa del sedile.

Capitolo 6

In questo caso comincia a manifestarsi la cresta che unisce i carichi lombari massimi lungo le isolinee a K costante.

A 14000N invece (Figura 47d) comincia l'inversione di tendenza: sparisce completamente l'area relativa al finecorsa ma si riduce anche quella di probabile sopravvivenza dell'occupante. La "cresta" dei carichi lombari massimi diventa marcata, come visibile in Figura 46.

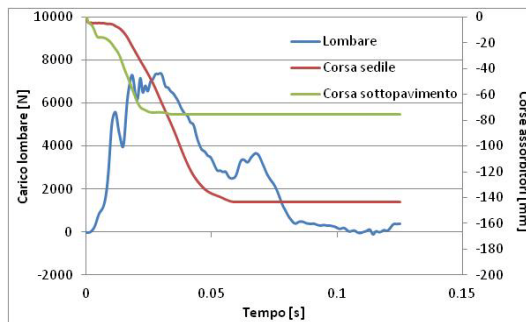
6.5 Analisi dei picchi per $6500N < F_{sub} < 7000N$

Si analizza la “cresta” nel suo intorno per indagare le ragioni che la generano.

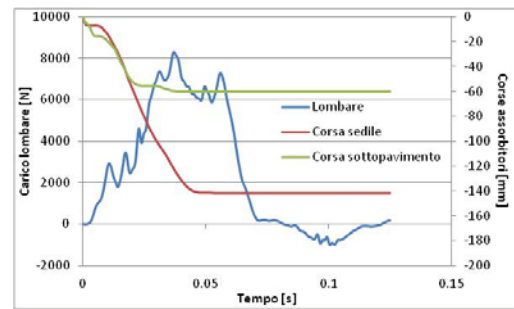
6.5.1 Effetto K

Il primo campo di analisi è l’effetto del K in corrispondenza dei valori critici $F_{seat}=14000N$ ed $F_{sub}=6500N$.

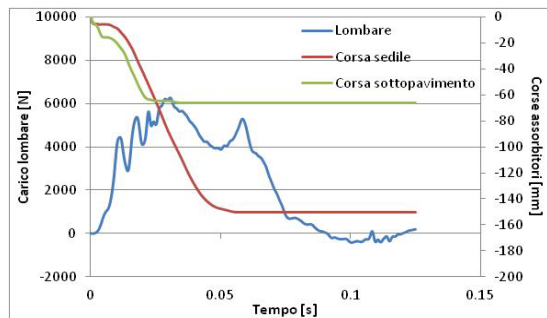
$F_{seat} = 14000N - F_{sub} = 6500N$



a) $K < 0$

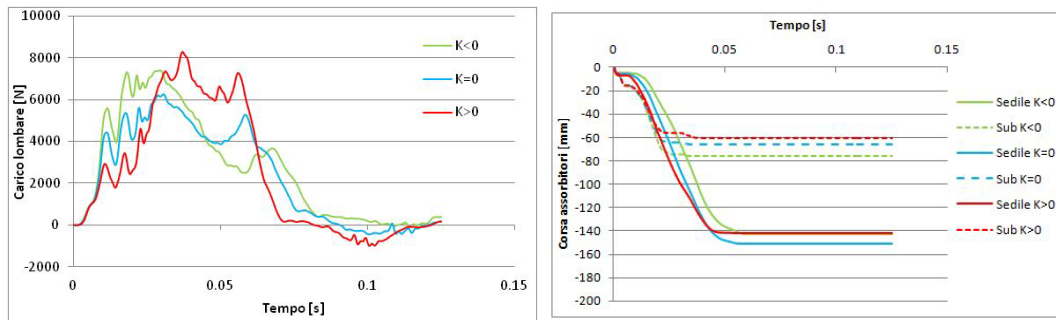


b) $K > 0$



c) $K = 0$

Capitolo 6



d) confronto carichi lombari

e) confronto corse

Figura 48 – Effetto variazione K per $F_{seat}=14000N$ ed $F_{sub}=6500N$

Tabella 3 – Risultati per $F_{seat}=14000N$ $F_{sub}=6500N$ e K variabile

	Lombare max [N]	Corsa sedile max [mm]	Corsa sub max [mm]	Corsa tot [mm]
K<0	7387	143	76	219
K=0	6249	150	66	217
K>0	8292	142	60	202

Le immagini in Figura 48 e i dati riportati in Tabella 3 evidenziano le differenze che nascono al variare della pendenza del campo plastico del sedile e a parità di area sottesa (vedi Figura 36) dalla curva Forza-Spostamento.

Le Figure 48d e 48e riportano gli andamenti del carico lombare e delle corse di sedile e sottopavimento nei tre casi:

- Pendenza negativa

La pendenza negativa, riportata in dettaglio in Figura 48a, comporta un carico di attivazione del sedile maggiore rispetto agli altri due casi. Si riscontra questa caratteristica in una prima parte della curva di carico lombare, che sottende un'area maggiore, ed in uno sfasamento delle corse di sedile e sottopavimento; infatti, in questo caso, il sottopavimento inizia per primo la deformazione. Il sedile comincia a deformarsi solo dopo un primo tratto in cui l'assorbimento di energia è demandato esclusivamente al sottopavimento.

- Pendenza nulla

L'assorbitore elastico perfettamente plastico contiene il carico lombare massimo entro il limite di 6670N imposto da normativa. Il comportamento delle curve di corsa degli assorbitori è analogo al caso precedente ma con uno sfasamento temporale ridotto.

- Pendenza positiva

La pendenza positiva comporta un'attivazione anticipata dell'assorbitore del sedile rispetto agli altri due casi, dovuta ad un carico di snervamento inferiore. La forza dell'assorbitore, crescente con la corsa, non permette di contenere il carico lombare entro il limite di sopravvivenza; la corsa totale, in questa condizione, si riduce e lo sfasamento tra i due elementi si annulla.

Nelle tre condizioni descritte, il tratto iniziale della curva di carico lombare è uguale e determinato dallo schiacciamento del sottopavimento. Il primo cambio di segno della pendenza, da positivo a negativo, della curva di carico lombare indica l'intervento dell'assorbitore del sedile.

Il valore di carico lombare corrispondente al cambio di segno della pendenza citato dipende dunque dal carico di attivazione del sedile.

Le corse totali dei casi a pendenza nulla e negativa sono pressoché identiche ma, nonostante ciò, la differenza sul carico lombare è di oltre 1000N. Ciò comporta, nel caso a pendenza negativa, il superamento della soglia di 6670N.

Per la pendenza positiva invece, la corsa si riduce sensibilmente ed il carico lombare aumenta di oltre 2000N rispetto al caso elastico perfettamente plastico.

In conclusione, la pendenza negativa, a parità di area sottesa, implica un carico di attivazione elevato.

La pendenza positiva invece, vede crescere il valore di forza mentre l'assorbitore utilizza la corsa disponibile. Il valore di forza che aumenta con la corsa riduce, di fatto, la deformabilità e limita la corsa totale utile a parità di area sottesa dalle leggi costitutive assegnate all'assorbitore del sedile.

Capitolo 6

Tali considerazioni indicano nella pendenza nulla il miglior compromesso tra utilizzo della corsa disponibile e contenimento del carico lombare.

6.5.2 Effetto F_{sub}

Sempre in relazione alla “cresta” che si forma sulla superficie di risposta, riportata in Figura 45, si eseguono ora due analisi al variare di F_{sub} per F_{seat} e K fissati.

Nel primo dei casi considerati poniamo $F_{seat}=14000N$ e $K=0$. F_{sub} è scelto in un dominio [4500N ; 8500N] che comprende il valore critico di 6500N attorno al quale si vuole indagare.

Le successive immagini, in Figura 49 e 50, mostrano i grafici che riportano il confronto tra carichi lombari, corse del sedile e corse del sottopavimento nei vari casi considerati.

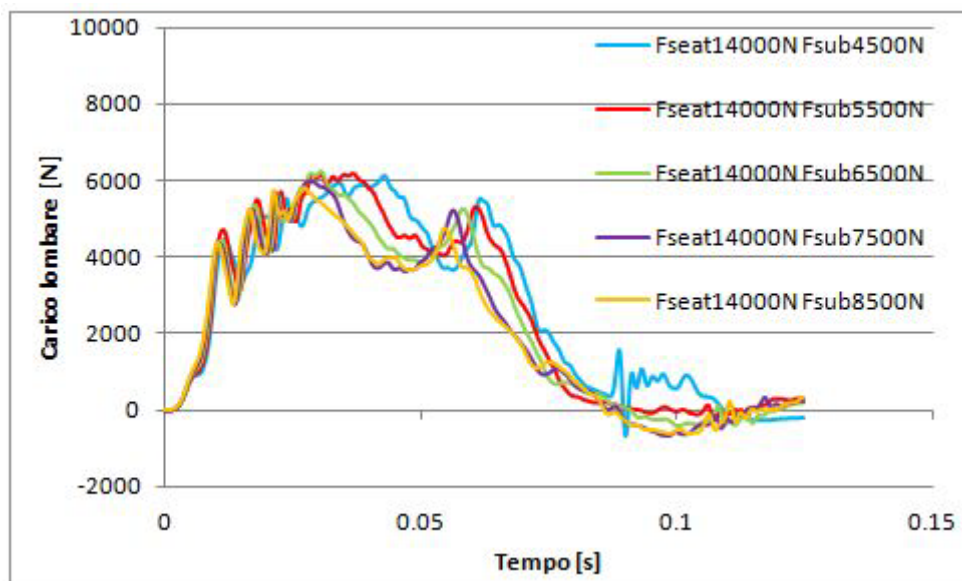


Figura 49 – Carichi lombari – $F_{seat}=14000N$; $F_{sub}=[4500;8500]$; $K=0$

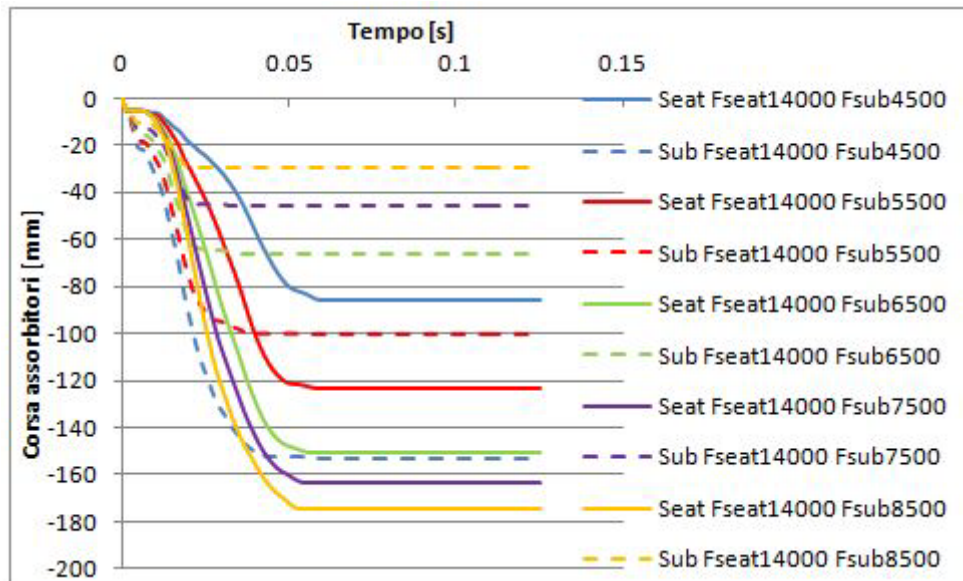


Figura 50 – Corse sedile e sottopavimento – Fseat=14000N; Fsub=[4500;8500]; K=0

La Tabella 4 riporta i valori salienti ottenuti per ciascuna analisi e permette di formulare alcune considerazioni:

Tabella 4 – Risultati ottenuti per Fseat14000N Fsub[4500 8500] e K=0

Fseat [N]	Fsub [N]	Lombare max [N]	Corsa sedile max [mm]	Corsa sub max [mm]	Corsa tot [mm]
14000	4500	6119	86	153	239
	5500	6177	123	101	224
	6500	6249	150	66	216
	7500	5969	163	46	209
	8500	5836	175	30	205

All'aumentare di Fsub diminuisce la corsa del sottopavimento, in valore assoluto, ed aumenta quella del sedile.

È interessante notare come il carico lombare massimo si ottenga per Fsub=6500N sebbene non si notino particolari diminuzioni di corsa.

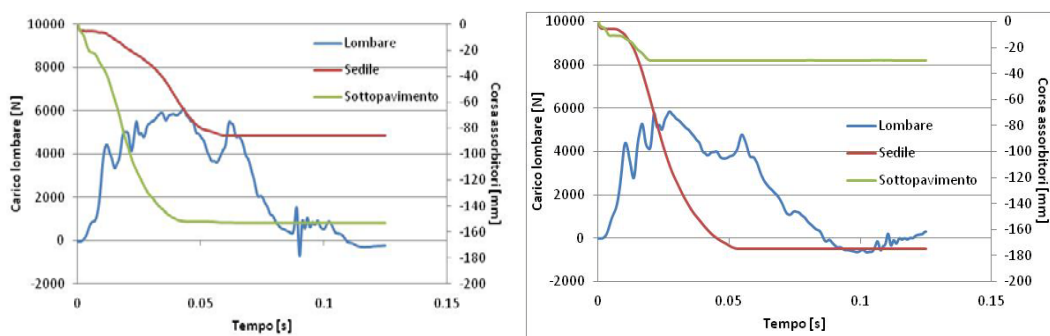
Capitolo 6

Si può anzi osservare come i valori minori di carico lombare si ottengano sfruttando maggiormente la corsa del sedile e utilizzando in minor misura quella del sottopavimento.

Questo permette inoltre di ottenere i migliori risultati con uno sfruttamento minore della corsa totale.

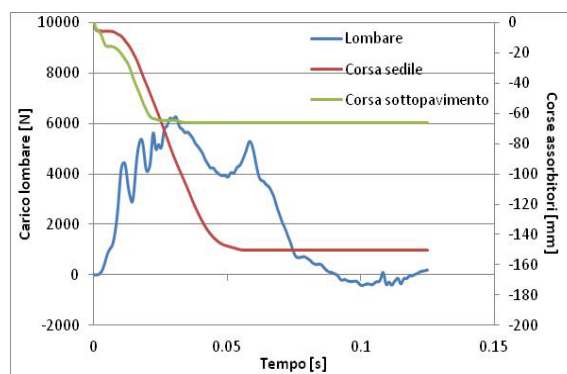
Per capire cosa accade, si riportano i grafici relativi ai casi estremi considerati:

F_{seat}=14000N - K=0



a) F_{sub}=4500N

b) F_{sub}=8500N



c) F_{sub}=6500N

Figura 51 - Confronto andamenti curve per F_{seat}=14000N e K=0

Come già specificato, tutti i casi rientrano nella zona di probabile sopravvivenza dell'occupante ma con delle differenze: il caso con F_{sub}=6500N risulta il

peggiore sebbene non appaiano particolari difformità nell'andamento delle curve.

La differenza più marcata tra i tre casi è il modo in cui la corsa totale viene sfruttata: nel caso riportato in Figura 51 ($F_{\text{seat}}=14000\text{N}$, $K=0$, $F_{\text{sub}}=4500\text{N}$) è utilizzata maggiormente la corsa del sottopavimento mentre negli altri due casi è maggiormente sfruttata la corsa del sedile.

Non traspare in modo evidente il motivo per cui per $F_{\text{sub}}=6500\text{N}$ si verifichi il carico lombare massimo sulla linea di $K=0$ sebbene il picco maggiore scaturisca sempre in corrispondenza del raggiungimento di un valore di regime nella corsa di uno dei due elementi atti all'assorbimento di energia qui considerati.

Per approfondire ulteriormente questo aspetto vengono effettuate le medesime considerazioni sulla linea di $K=0,6$.

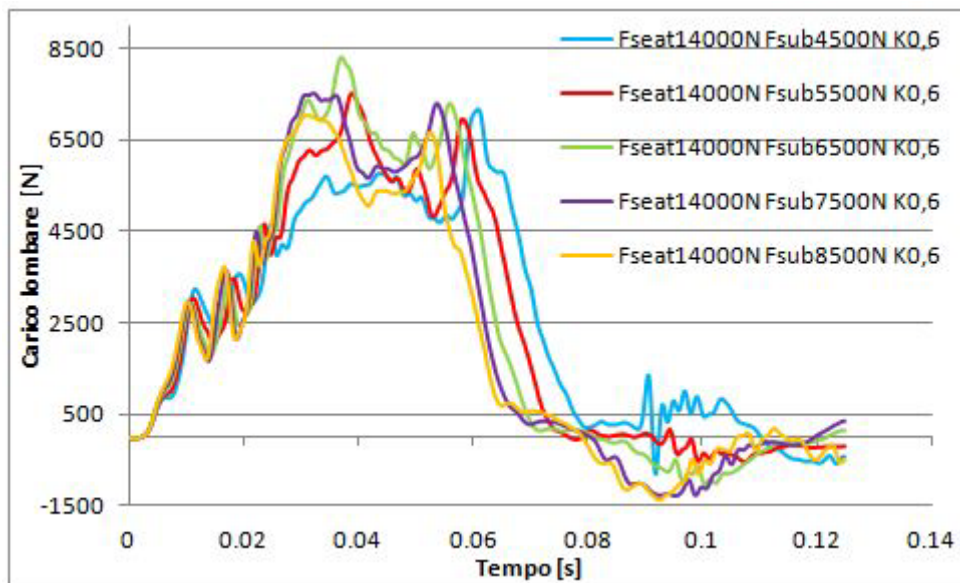


Figura 52 – Carichi lombari – $F_{\text{seat}}=14000\text{N}$; $F_{\text{sub}}=[4500;8500]$; $K=0,6$

Capitolo 6

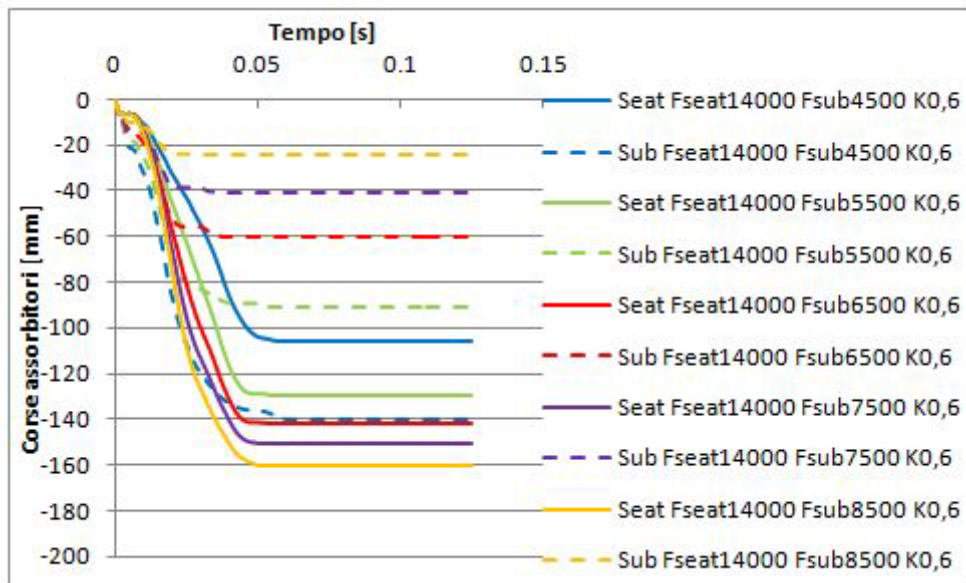


Figura 53 – Corse assorbitori – Fseat=14000N; Fsub=[4500;8500]; K=0,6

Come in precedenza, si riportano in Tabella 5 tutti i risultati di interesse per il fenomeno:

Tabella 5 – Risultati per Fseat14000N Fsub[4500 8500]

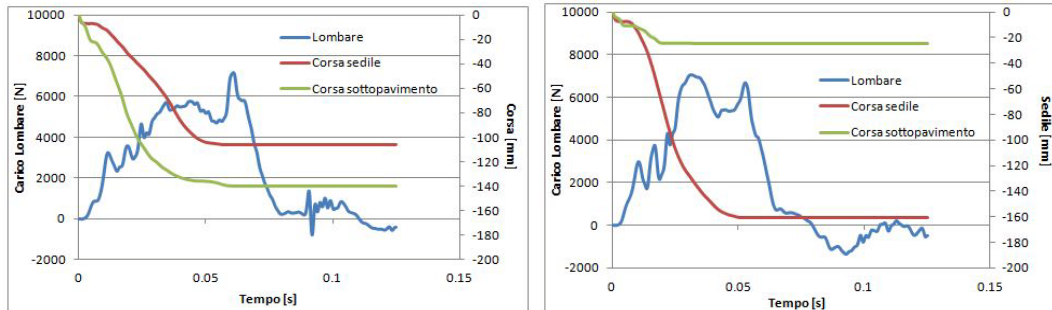
Fseat [N]	K	Fsub [N]	Lombare max [N]	Corsa sedile max [mm]	Corsa sub max [mm]	Corsa tot [mm]
14000	0,6	4500	7182	106	140	246
		5500	7499	129	91	220
		6500	8292	142	60	202
		7500	7515	151	41	192
		8500	7046	160	25	185

L'analisi dei risultati è analoga al caso di K=0 ovvero, per Fsub crescenti, si verifica un aumento della corsa del sedile, una diminuzione della corsa del sottopavimento ed in generale una diminuzione della corsa totale.

In questo specifico caso i carichi lombari sono sempre oltre la soglia di 6670N, imposta dalla normativa.

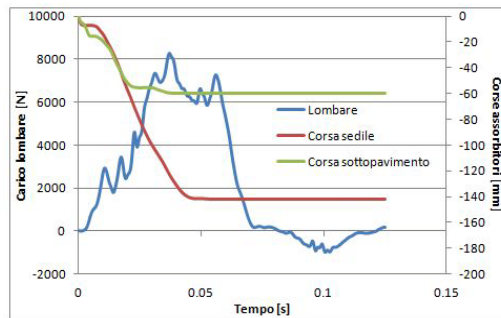
Ancora una volta il carico lombare aumenta all'aumentare di Fsub fino al limite critico di 6500N oltre il quale torna a diminuire.

$F_{\text{seat}}=14000\text{N} - K=0,6$



a) $F_{\text{sub}}=4500\text{N}$

b) $F_{\text{sub}}=8500\text{N}$



c) $F_{\text{sub}}=6500\text{N}$

Figura 54 - Confronto andamenti curve per $F_{\text{seat}}=14000\text{N}$ e $K=0,6$

In queste condizioni appaiono più marcate le differenze di forma tra le curve del carico lombare ma non appare evidente la causa che fa coincidere il carico massimo con $F_{\text{sub}}=6500\text{N}$.

Per $F_{\text{sub}} < 6500\text{N}$ la corsa del sottopavimento contribuisce maggiormente al contenimento del carico lombare dell'occupante mentre per $F_{\text{sub}} > 6500\text{N}$ è il sedile a farsi carico di una quota maggiore di assorbimento dell'energia.

In particolare, in Figura 54b, si nota come l'assorbimento di energia sia affidato quasi totalmente al sedile che tuttavia non riesce a contenere il carico lombare del passeggero entro la soglia prescritta dalla normativa, fermando per di più la sua corsa molto presto rispetto ai 195mm disponibili.

6.6 Conclusioni

Non è del tutto definibile la causa che genera la cresta sulla superficie di risposta relativa a $F_{seat}=14000N$ in corrispondenza del valore di F_{sub} pari a $6500N$ visibile in Figura 46.

Si può in ogni caso concludere che, come intuibile in Figura 47, l'area di possibile sopravvivenza più estesa sia quella relativa a $F_{seat}=13000N$.

I casi con F_{seat} minori producono carichi lombari più bassi, ma limitano l'area in cui è più probabile la salvaguardia dell'occupante al limite di $F_{sub}<6500N$. Procedendo oltre questa soglia, la combinazione tra un sedile molto rigido ed un sottopavimento poco rigido produce il fenomeno di finecorsa del sedile che, come già ricordato, è sempre una condizione di potenziale pericolo.

Si può imputare dunque la presenza della cresta ad una combinazione particolarmente sfavorevole di valori F_{seat} ed F_{sub} che, nel caso in cui il carico lombare rimanga contenuto entro la soglia di $6670N$, produce una variazione sullo stesso di circa il 7% rispetto al miglior caso considerato.

Tale considerazione è confermata anche dal caso di $K=0,6$, per il quale il carico lombare supera sempre la soglia ammissibile, ma risulta utile perché mostra l'“effetto cresta” amplificato.

L'ipotesi che è possibile avanzare riguarda, come già evidenziato, il raggiungimento di un valore di regime nella corsa di uno degli elementi atti all'assorbimento di energia. All'istante a cui avviene questo fenomeno, corrisponde sempre la partenza del picco maggiore nella curva del carico lombare. Questo fenomeno si manifesta più marcatamente con la combinazione di valori di forza media delle leggi costitutive degli assorbitori che generano la “cresta” qui analizzata.

7 Comparazione tra metodi di allocazione

In questo capitolo verrà eseguita una analisi comparativa tra due metodi di allocazione di punti, nel dominio dei parametri variabili, oggetto delle indagini trattate nel capitolo 6.

La comparazione avverrà per mezzo delle superfici di risposta ottenute con il metodo di allocazione Latin HyperCube e quelle ottenute per mezzo di una allocazione Full Factorial definite in [15].

L'esigenza di eseguire questo confronto è nata dall'osservazione di una discrepanza tra una superficie di risposta ottenuta per mezzo dell'allocazione Latin Hypercube ed i risultati delle singole analisi:

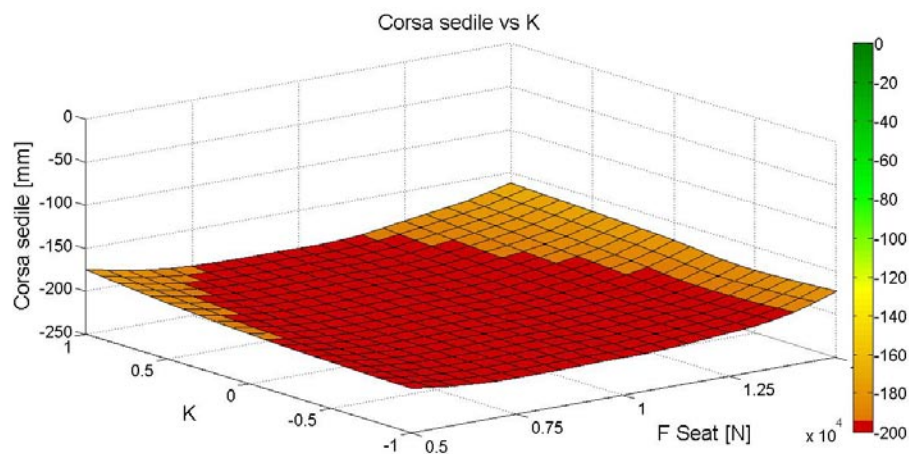


Figura 55 – Superficie di risposta per la corsa massima in modulo del sedile ottenuta con una allocazione Latin HyperCubes eseguita su 200 possibili combinazioni di valori dei tre parametri variabili e ricostruita per $F_{sub}=12000N$

La zona corrispondente ad $F_{seat}=5000N$ e a $K=1$ indica che il sedile non ha raggiunto il valore di finecorsa. Questo risultato è poco realistico, anche alla luce dell'andamento della superficie nelle zone limitrofe.

Andando ad eseguire una analisi in questa zona, combinando quindi i valori $F_{seat}=5000N$, $F_{sub}=12000N$ e $K=1$, otteniamo infatti i seguenti risultati che confermano ciò che è appena stato osservato:

Capitolo 7

Tabella 6 – Risultati per $F_{seat}=5000N$, $F_{sub}=12000N$, $K=0$

	Carico Lombare [N]	Corsa Sedile [mm]	Corsa Sottopavimento [mm]
F_{seat}=5000N			
F_{sub}=12000N	12720	199	5
K=1			

Nonostante la superficie indichi una corsa totale del sedile inferiore a 195mm, che corrisponde al finecorsa del sedile, il risultato dell'analisi svolta nel punto considerato indica una corsa totale di 199mm.

L'ipotesi avanzata è quella di un errore di interpolazione dovuto all'assenza di un numero sufficiente di punti nella zona in cui è riscontrabile la discrepanza e dall'impossibilità di interpolare il risultato considerando il gradiente in tutte le zone.

7.1 Allocazione FullFactorial

Per indagare il problema riscontrato è stato fatto ricorso ad una allocazione FullFactorial [15] con la seguente divisione dei domini delle variabili:

Tabella 7 – Intervalli e tolleranze per l'allocazione di punti FullFactorial

Parametro	MIN	Δ	MAX	N° pti
F_{seat}	5000N	1000N	15000N	11
F_{sub}	2000N	2000N	12000N	6
K	-1	0.2	1	11

Non si tratta di una vera e propria comparazione tra due metodi differenti poiché il numero di punti di valutazione, in questo caso, è molto maggiore e pari a 726, contro i 200 del caso precedente.

Comparazione tra metodi di allocazione

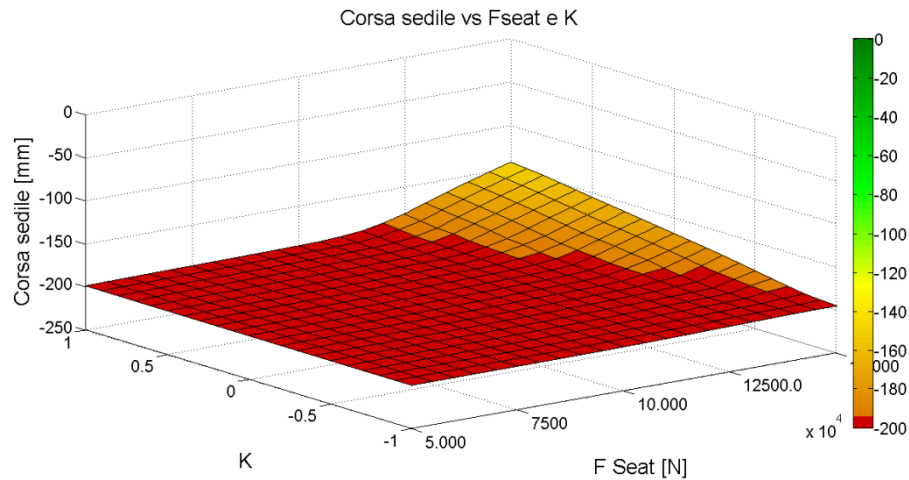


Figura 56 – Superficie di risposta per la corsa massima del sedile ottenuta con una allocazione FullFactorial eseguita su 726 combinazioni di valori dei tre parametri variabili e ricostruita per $F_{sub}=12000N$

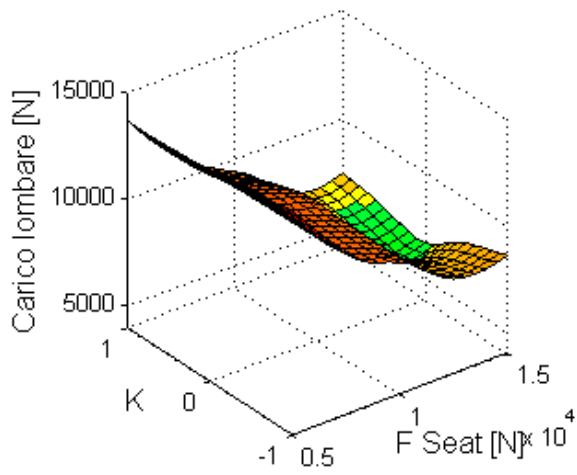
Il confronto tra le superfici è piuttosto confortante poiché l'andamento generale è simile. Il comportamento al bordo è differente, in particolare nella zona individuata in precedenza ma tale differenza è imputabile alla risoluzione con cui la superficie è stata costruita che consente un'interpolazione migliore dei risultati disponibili.

È riscontrabile anche una pendenza differente ai bordi delle superfici: quella ottenuta con l'allocazione FullFactorial appare molto più piatta e con un gradiente maggiore nella zona in cui la corsa comincia a diminuire in valore assoluto ($F_{seat}=15000N$). Si tratta comunque di differenze minime in termini di corsa. Tutta la zona rossa visibile nelle Figure 55 e 56 è caratterizzata da uno scostamento massimo di 5mm.

7.2 Comparazione tra le superfici ottenute con i due metodi

Latin HyperCube

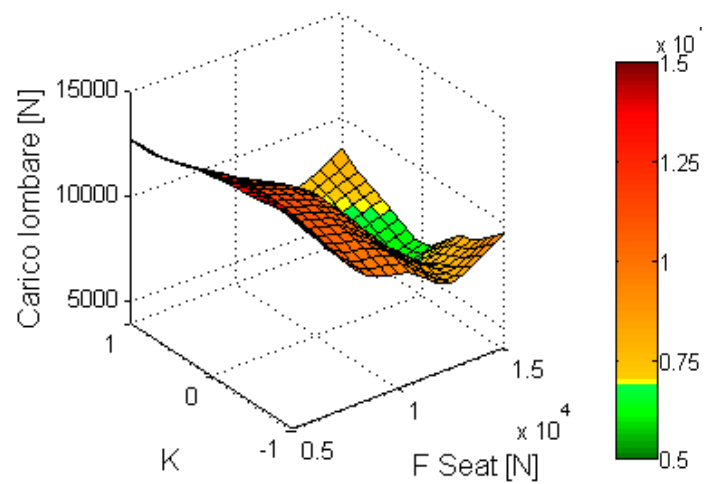
Carico lombare vs Fseat e K



a) Carico lombare LH

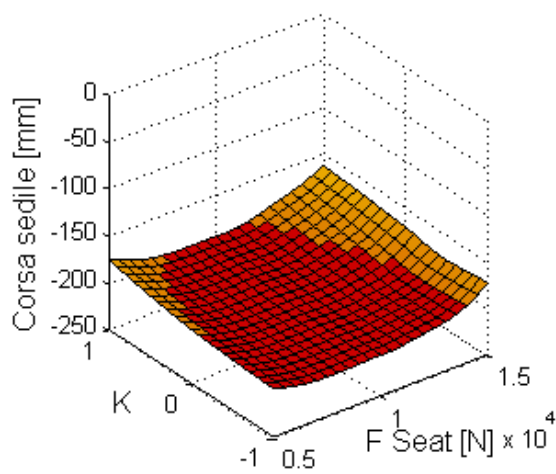
FullFactorial

Carico lombare vs Fseat e K



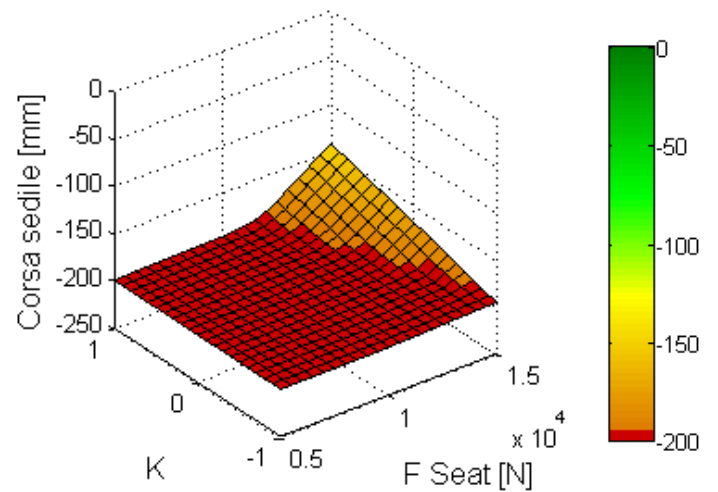
b) Carico Lombare FF

Corsa sedile vs Fseat e K



c) Corsa sedile LH

Corsa sedile vs Fseat e K



d) Corsa sedile FF

Comparazione tra metodi di allocazione

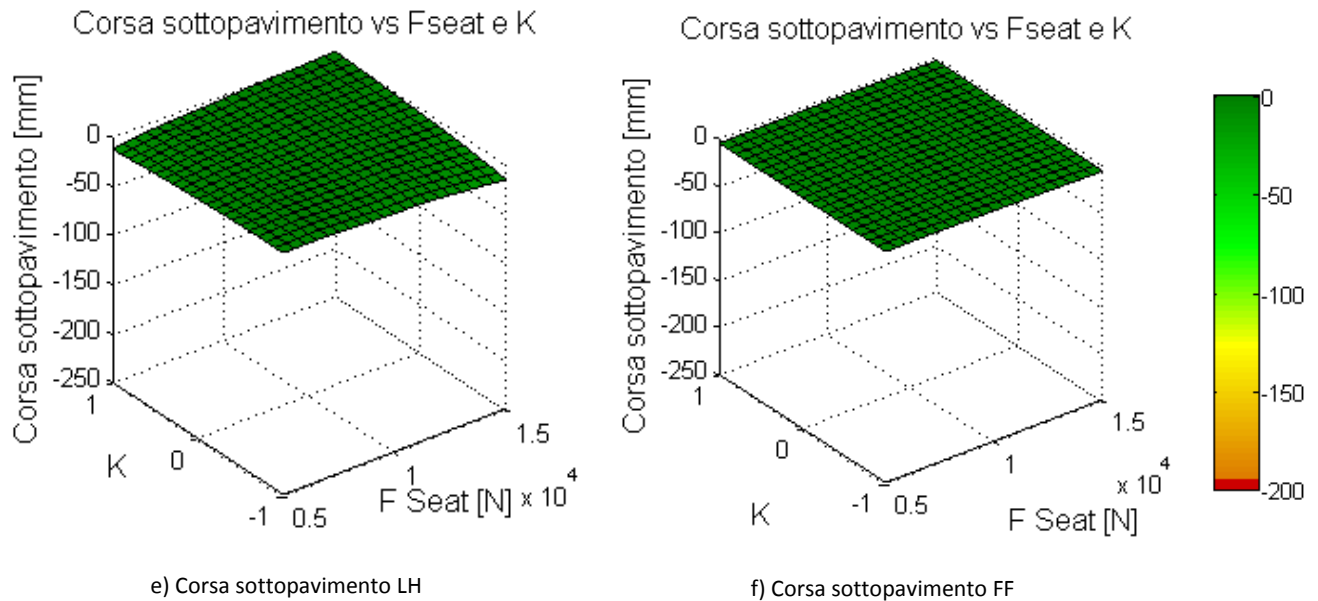


Figura 57 – Comparazione tra le superfici di risposta ottenute con i metodi di allocazione Latin HyperCube per mezzo di 200 punti di valutazione e FullFactorial con 726 punti di valutazione

Il costo computazionale delle superfici ottenute con i due metodi è molto diverso, ma ciò è totalmente legato al fatto che il numero di analisi eseguite è circa quattro volte superiore nel caso dell'allocazione FullFactorial.

Il risultato dell'allocazione Latin HyperCube, ottenuto in circa 20h di analisi, compiute con 6 processori in parallelo per il tempo di 30min/analisi circa è comunque molto fedele a quello ottenuto in circa 80h in cui sono state effettuate le 726 analisi dell'allocazione FullFactorial.

Gli errori maggiori nel caso delle 200 analisi dell'allocazione Latin HyperCybe sono visibili sui bordi delle superfici, che rappresentano i limiti dei domini di variazione dei parametri. L'andamento generale delle superfici è comunque fedele a quello ottenuto con una diversa e molto fitta allocazione di punti.

L'errore riscontrato è dunque, presumibilmente, da attribuire all'interpolazione dei risultati disponibili e migliorabile attraverso un infittimento della griglia di punti, anche per questo metodo.

L'andamento globale delle superfici consente inoltre di individuare, attraverso il senso fisico delle variabili, eventuali errori dovuti all'interpolazione dei risultati.

8 Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

Come si è evinto dallo studio svolto nel capitolo precedente, il miglior compromesso nell'assorbimento di energia, per il contenimento del carico lombare entro la soglia di 6670N, si ottiene tramite una curva Forza/Spostamento con pendenza nulla del campo plastico.

L'attenzione si sposta ora sulla forma del campo plastico degli assorbitori del sottopavimento.

L'idea consiste nell'assegnare una forza media, come nei casi precedenti, e di definire l'oscillazione attraverso parametri variabili.

Si ottengono curve simili a quella di riportata nella seguente Figura 58:

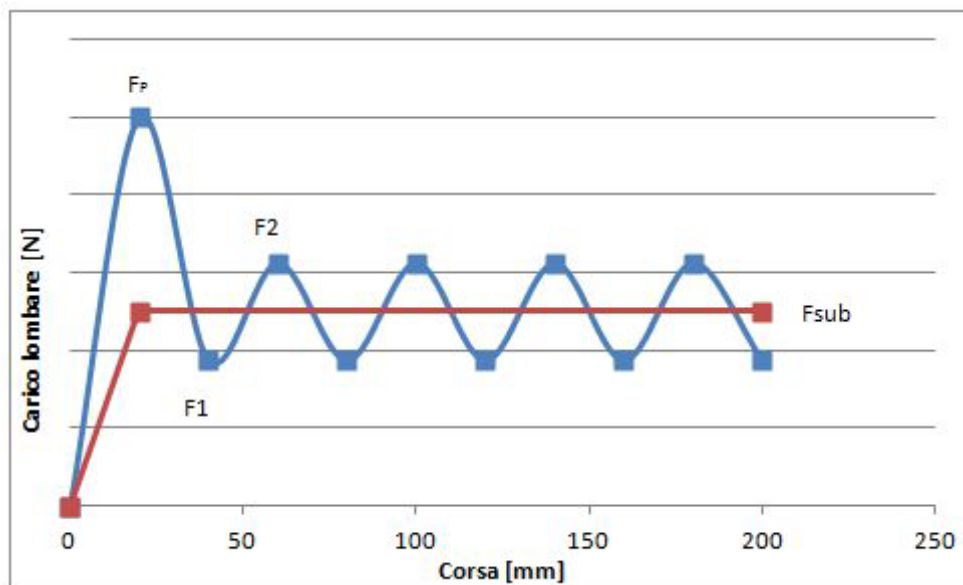


Figura 58 – Curva qualitativa Forza-Spostamento assorbitori sottopavimento

L'oscillazione ha una frequenza costante, ottenuta assegnando i valori di picchi e valli in 11 punti equispaziati lungo la corsa dell'assorbitore.

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

Il primo picco F_p si ottiene moltiplicando il valore di forza media per il parametro K_1 ; i successivi picchi e valli si ottengono per mezzo di un parametro K_2 con il quale si definiscono le seguenti forze F_1 ed F_2 :

$$F_p = F_{sub} * K_1$$

$$F_1 = F_{sub} - F_{sub} * \frac{K_2}{2}$$

$$F_2 = F_{sub} + F_{sub} * \frac{K_2}{2}$$

La seguente Tabella 8 riporta gli intervalli di variazione dei 4 parametri del modello:

Tabella 8 - Intervalli di variazione dei parametri del modello

Parametro	Valore minimo	Valore massimo
Fseat	5000 [N]	15000 [N]
Fsub	2000 [N]	12000 [N]
K1	1,5	2
K2	0,1	1

Il parametro K_1 è definito in modo tale che F_p sia sicuramente superiore al valor medio F_{sub} .

K_2 è concepito per modulare l'ampiezza delle oscillazioni attorno al valor medio, evitando che i picchi superino il valore del primo e che le valli assumano valore negativo.

L'assorbitore del sedile è invece completamente definito dal valore di forza media F_{seat} secondo la curva Forza-Spostamento, che definisce una legge costitutiva elastica perfettamente plastica, riportata qui di seguito in Figura 59:

Capitolo 8

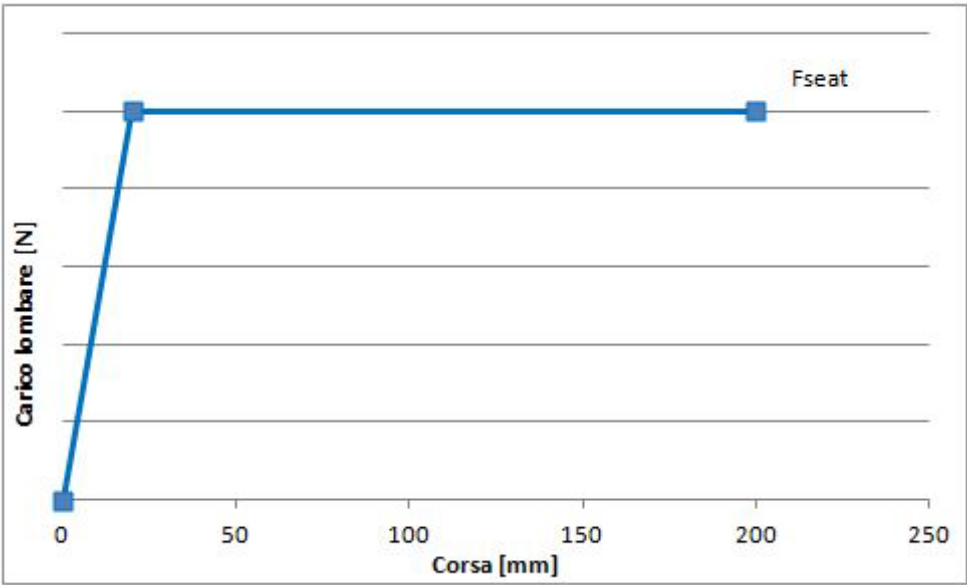


Figura 59 - Curva qualitativa Forza-Spostamento assorbitori sedile

8.1 Risultati

Sono stati fissati i valori medi di F_{seat} ed F_{sub} rispettivamente a 13000N e 4000N. Tali valori, considerando il caso elastico perfettamente plastico, appartengono ad un intervallo in cui il carico lombare è inferiore alla soglia di 6670N e non tutta la corsa utile degli assorbitori viene sfruttata.

Si giunge a questa scelta tramite le valutazioni svolte sul caso precedente analizzato.

Attraverso superfici di risposta, si propone un'analisi dell'effetto dei parametri moltiplicativi, K_1 e K_2 , che modulano l'ampiezza delle oscillazioni attorno al valor medio del campo plastico degli assorbitori installati nel sottopavimento.

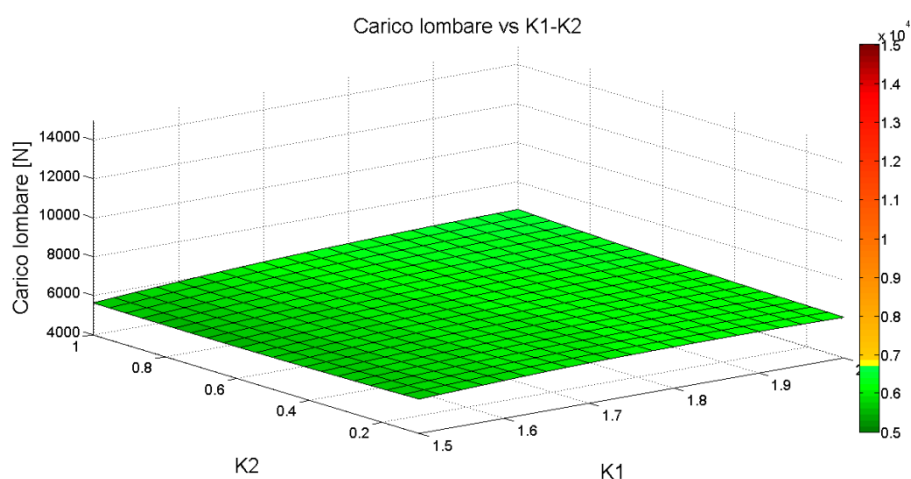


Figura 60 – Superficie di risposta – Carichi lombari massimi in funzione dei parametri K_1 e K_2

La superficie in Figura 60 assume una forma pressoché piatta in cui appare lievemente sconveniente la crescita del valore K_1 .

Il suddetto parametro, come precedentemente descritto, agisce sull'ampiezza del primo picco divenendo, a tutti gli effetti e attraverso il calcolo di F_p , il valore di attivazione degli assorbitori del sottopavimento.

F_p influisce sull'area sottesa dalla curva forza-spostamento degli assorbitori del sottopavimento producendo una variazione massima di circa il 6,36% tra i casi estremi considerati.

Capitolo 8

Inoltre determina la pendenza del primo tratto della curva forza spostamento con variazioni massime nell'ordine del 33%

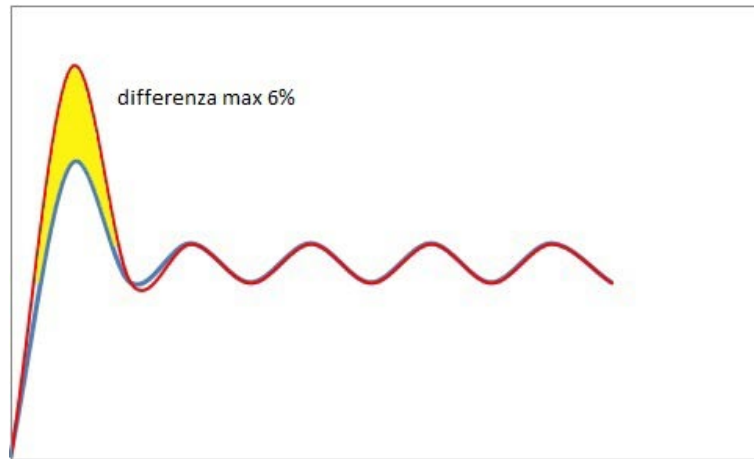


Figura 61 – Differenza massima tra le aree sottese dalle curve Forza-Spostamento per effetto del primo picco.

Partendo da una condizione di assorbitori elastici perfettamente plastici in grado di estendere l'area in cui il carico lombare si mantiene al di sotto del limite imposto dalla normativa, l'introduzione di un picco di attivazione nella curva dell'assorbitore appare, in prima istanza, peggiorativa nonostante introduca un aumento dell'area sottesa.

Le considerazioni appena effettuate trovano riscontro nella seguente immagine, ortogonale all'asse K1:

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

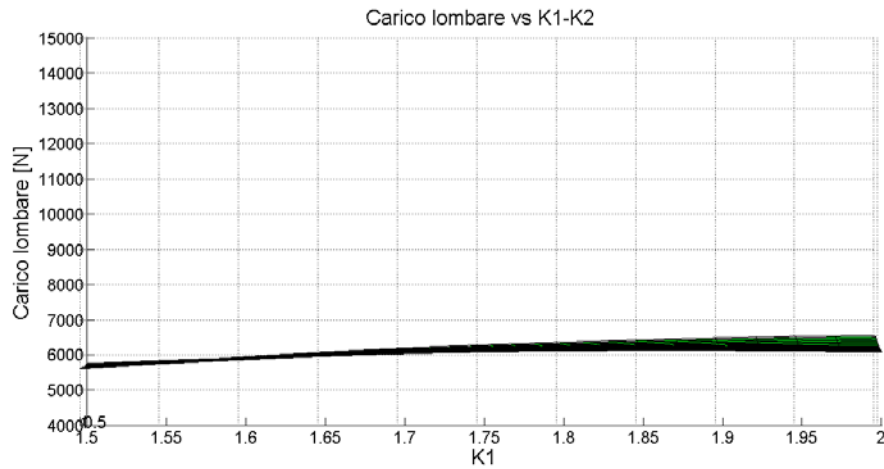


Figura 62 - Superficie di risposta – Carichi lombari massimi in funzione di K1

Seguendo le linee per K2 costanti si nota come il carico lombare tenda a crescere seppur tendendo ad un asintoto.

Attraverso la Figura 63 valutiamo ora l'effetto del parametro K2, che modula l'ampiezza delle oscillazioni, successive al primo picco, attorno al valor medio del campo plastico degli assorbitori.

Seguendo l'isolinea per $K1=1,5$ si verifica un punto di minimo per $0,7 < K2 < 0,8$.

È possibile osservare più in dettaglio questo fenomeno, seppur poco evidente, considerando l'immagine ortogonale all'asse K2:

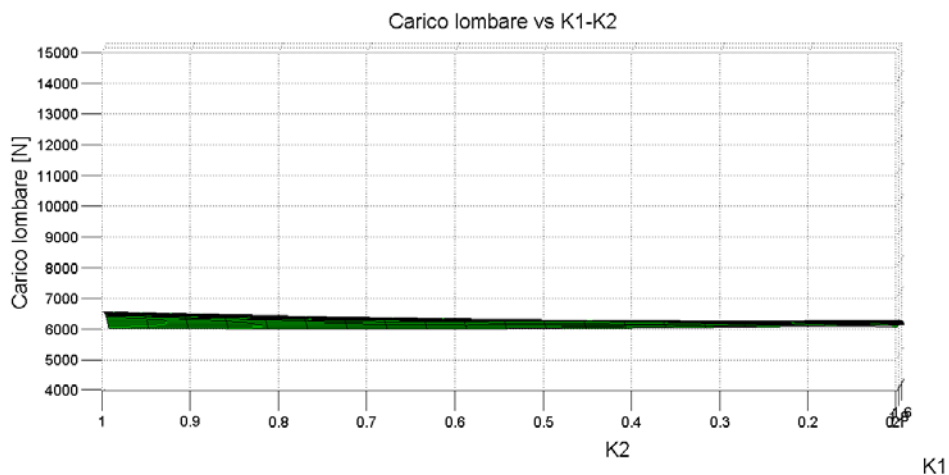


Figura 63 - Superficie di risposta – Carichi lombari massimi in funzione di K2

Capitolo 8

Anche questo aspetto verrà indagato analizzando come variano, in dettaglio, l'andamento delle curve di carico lombare e corse assorbitori al variare dell'ampiezza delle oscillazioni e con tutte le altre variabile fissate.

Si ottiene un carico lombare minimo per $K1=1,5$ e $0,7 < K2 < 0,8$ al quale segue un peggioramento lungo ogni direzione (Figura 63).

Si valuta, infine, l'effetto di $K1$ e $K2$ sulle corse degli assorbitori:

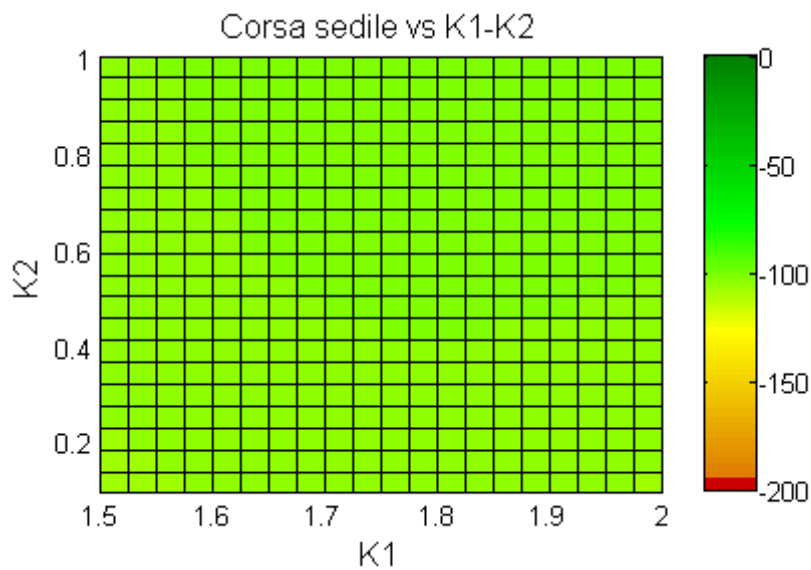


Figura 64 – Superficie di risposta – Corsa sedile in funzione di $K1$ e $K2$

In Figura 64 si evince una sostanziale indipendenza della corsa del sedile, con l'attuale combinazione di F_{seat} ed F_{sub} , dalla variazione dei parametri degli assorbitori del sottopavimento a meno di variazioni minime.

È più interessante, invece, osservare anche come i due parametri in esame agiscano sulla corsa degli assorbitori del sottopavimento.

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

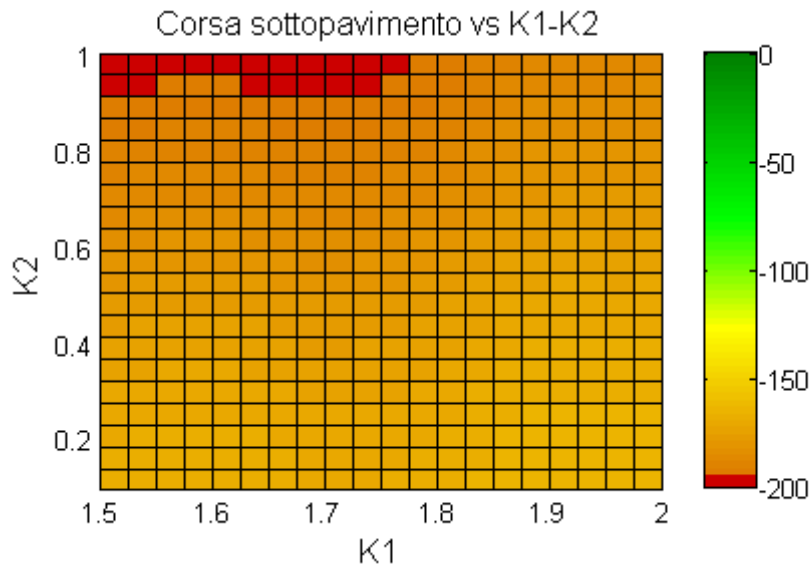


Figura 65– Superficie di risposta – Corsa sottopavimento in funzione di K1 e K2

L'effetto di K1 crescente per K2 costante provoca una diminuzione della corsa del sottopavimento fino a $K1=1,6$, un aumento per $1,6 < K1 < 1,7$ e quindi una diminuzione fino a $K1=2$

Questo andamento risulta più evidente se osservato sulla superficie tridimensionale riportata in Figura 65:

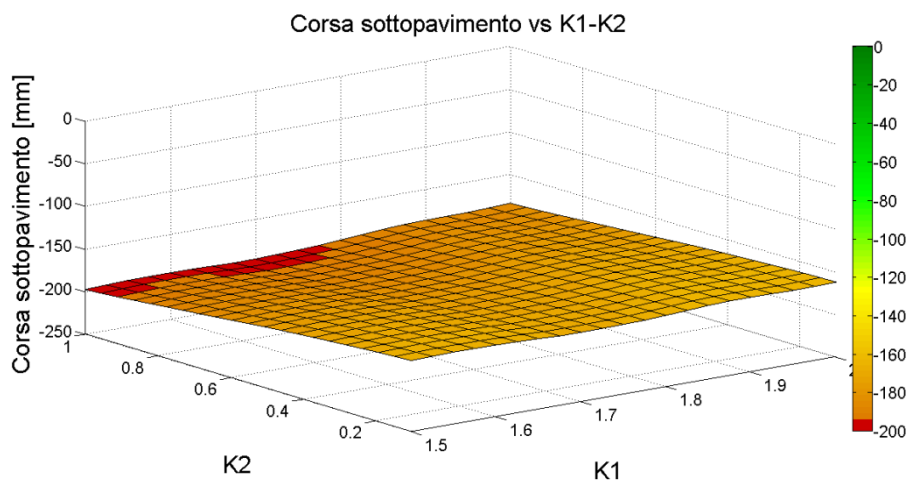


Figura 66 - Superficie di risposta – Corsa sottopavimento in funzione di K1 e K2

Capitolo 8

K_2 crescente, per K_1 costante, tende a causare un aumento della corsa, che, in alcuni casi, può arrivare al raggiungimento del finecorsa.

Si vuole verificare come l'effetto di variazione dei due parametri cambia all'interno del dominio di F_{seat} ed F_{sub} .

Con questo scopo si confrontano le superfici di risposta ottenute nei casi riportati in Tabella 9.

Tabella 9 – Casi considerati per comprendere l'influenza di K_1 e K_2 per diverse combinazioni di forze medie

Caso	$F_{seat}[N]$	$F_{sub}[N]$
a	7000	10000
b	13000	10000
c	7000	4000
d	13000	4000

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

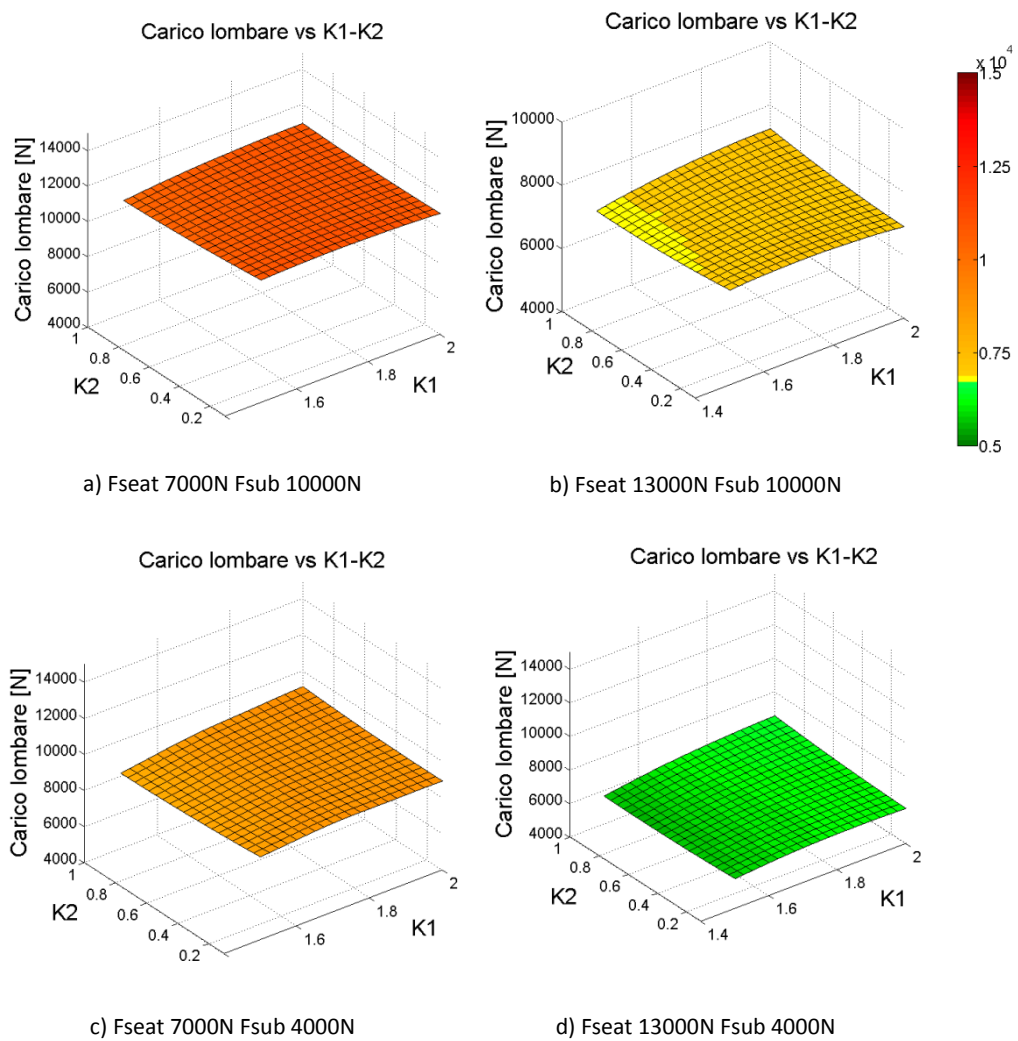


Figura 67 – Confronto carichi lombari massimi in funzione di k1 e k2 valutati nei 4 casi riportati in tabella7. Le superfici a e c risultano in condizione di finecorsa del sedile per ogni combinazione K1-K2.

Capitolo 8

In Figura 66 si può notare una sostanziale indipendenza degli andamenti delle superfici di risposta dal livello delle forze medie che definiscono le caratteristiche degli assorbitori.

E' possibile concludere che K1 e K2 sortiscano lo stesso effetto per ogni valore di Fseat ed Fsub.

Per una maggiore chiarezza, si riportano le immagini bidimensionali delle precedenti superfici che evidenziano il raggiungimento del fincorsa del sedile:

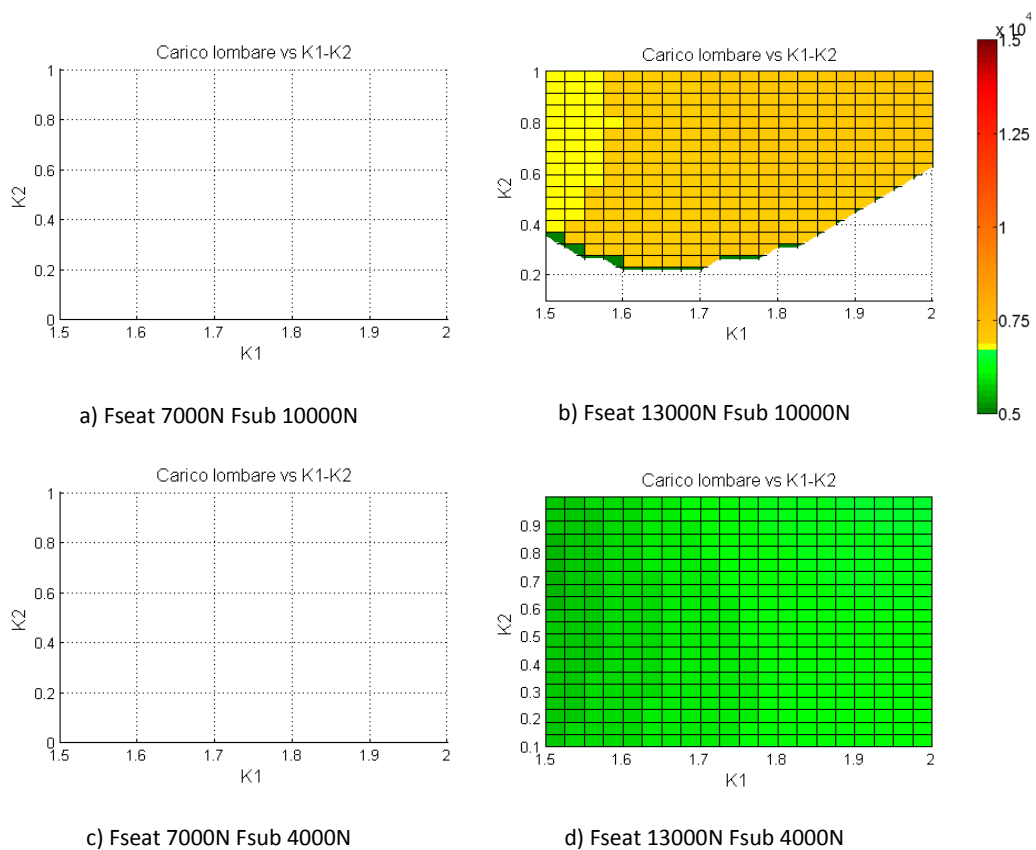


Figura 68 - Confronto carichi lombari massimi in funzione di k1 e k2 valutati nei 4 casi riportati in tabella7. Le superfici a e c sono caratterizzate dal raggiungimento del fincorsa del sedile per ogni combinazione K1-K2. La superficie b invece mostra un fincorsa parziale evidenziato dal taglio di un'area della superficie di risposta.

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

Anche l'analisi delle corse di sedile e sottopavimento conferma le indicazioni ricavate dalle superfici relative ai carichi lombari massimi.

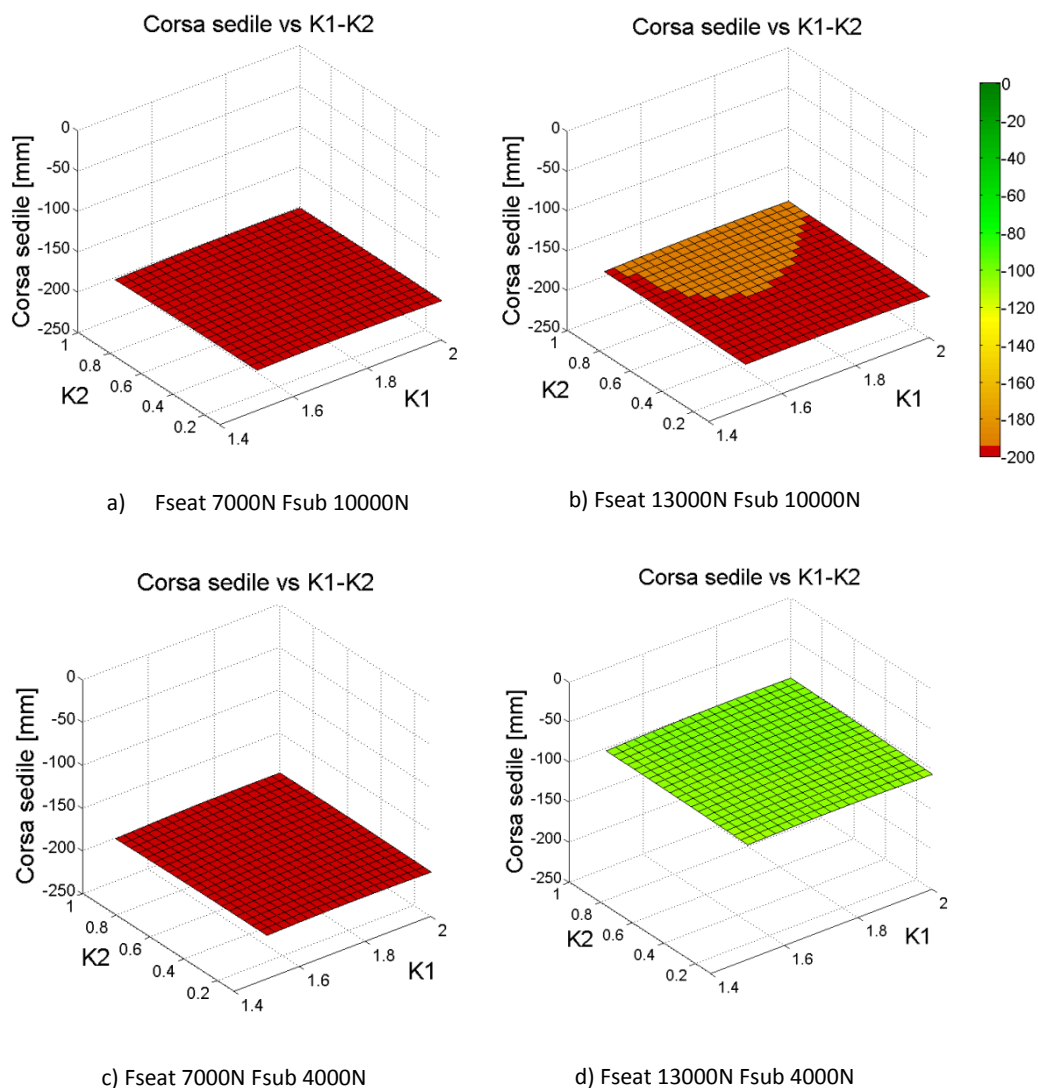


Figura 69 – Confronto corse massime degli assorbitori del sedile in funzione di K1 e K2 nei 4 casi riportati in Tabella7. Le superfici a e c raggiungono il finecorsa del sedile per ogni combinazione di K1-K2

Capitolo 8

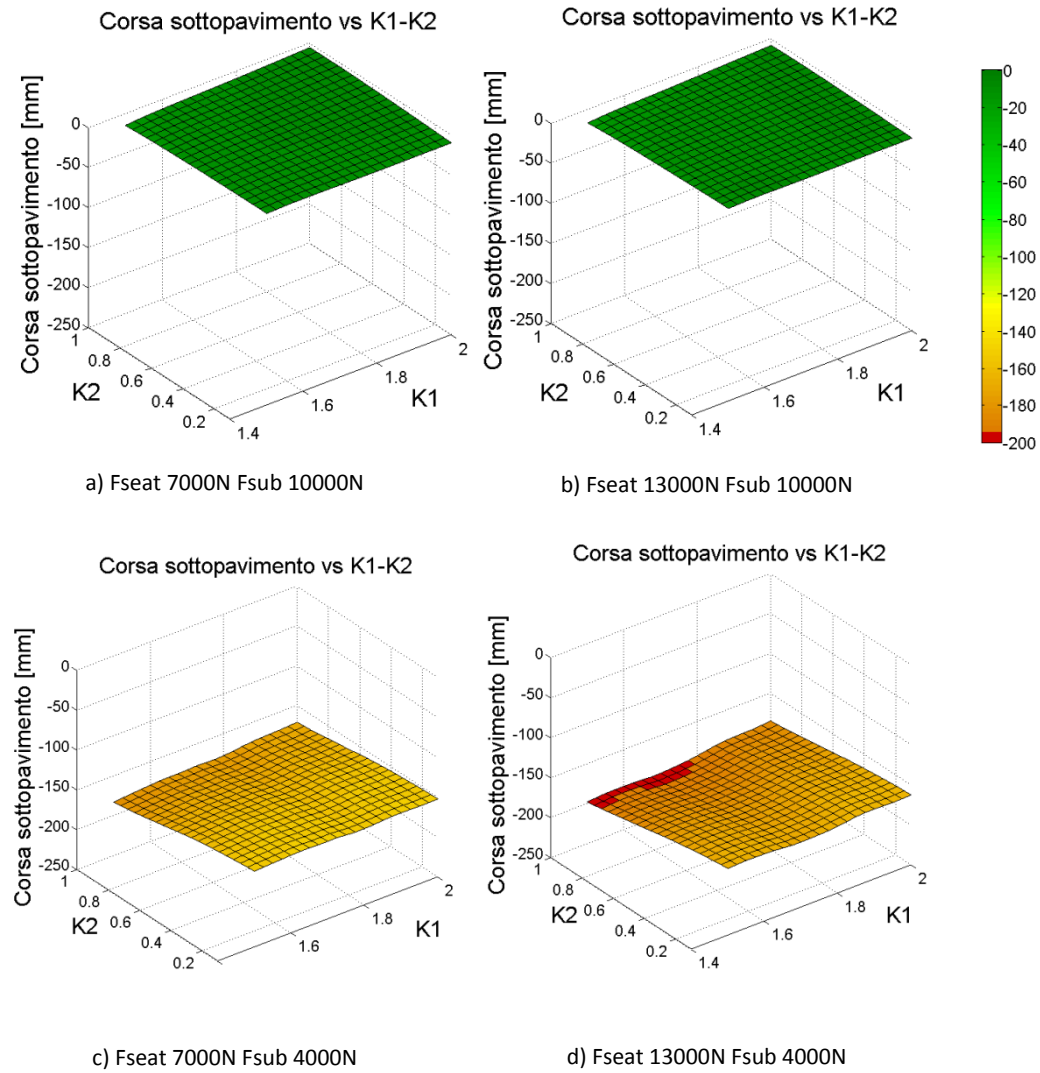


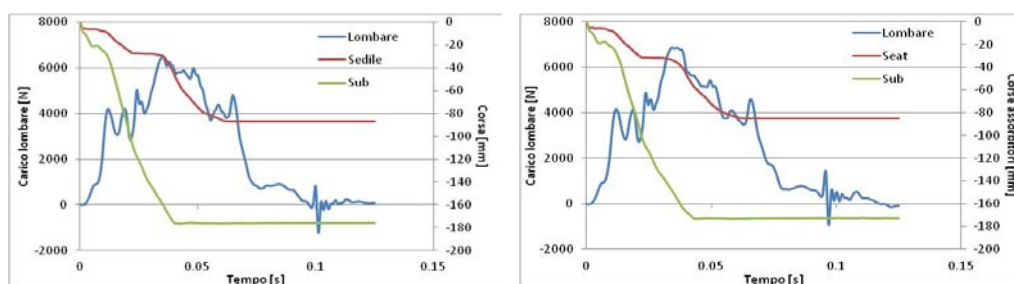
Figura 70 - Confronto corse massime degli assorbitori del sottopavimento in funzione di K1 e K2 nei 4 casi riportati in Tabella7.

8.2 Effetto della variazione del picco di attivazione

Si valuta l'effetto di K1, fissando tutti gli altri parametri, al fine di confermare i risultati ricavati dell'analisi della superficie di risposta dei carichi lombari massimi ed, in particolare, dall'andamento mostrato in Figura 65.

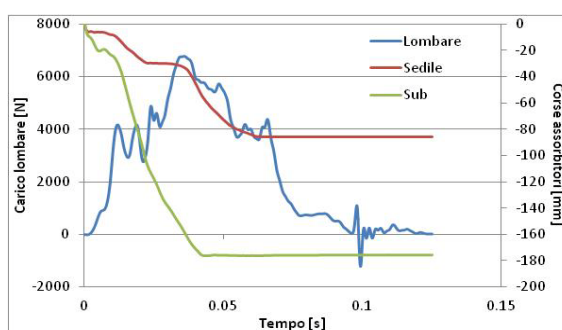
Tabella 10 – Valori dei parametri per l'analisi sulla variazione di K1

Parametri	Valori
Fseat	13000N
Fsub	4000N
K1	a)1,75 b)1,85 c)1,95
K2	0,1



a) K1 1,75

b) K1 1,85



c) K1 1,95

Figura 71 - Confronto curve di carico lombare e corse di sedile e sottopavimento per K1 variabile

Capitolo 8

Tabella 11 – Risultati del confronto tra i casi a k1 variabile

Fseat [N]	Fsub [N]	K1	K2	Lombare max [N]	Corsa sedile [mm]	Corsa sub [mm]	Corsa tot [mm]
13000	4000	1,75	0,1	6463	87	176	263
		1,85		6764	86	176	262
		1,95		6872	85	173	258

I risultati ricavati dal confronto tra i tre casi qui esposti confermano le indicazioni fornite dalla superficie di risposta cioè una crescita del carico lombare (nell'ordine dei 400N dal caso migliore a quello peggiore) al crescere di K1 e a parità di tutti gli altri parametri a fronte di una diminuzione, seppur esigua, della corsa totale sfruttata

8.3 Effetto della variazione dell'ampiezza delle oscillazione

L'analisi prosegue con la valutazione delle variazioni di K2 a parità di tutti gli altri parametri secondo i valori riportati nella seguente tabella:

Tabella 12 - Valori dei parametri per l'analisi sulla variazione di K2

Parametri	Valori
Fseat	13000N
Fsub	4000N
K1	1,5
K2	a)0,6 b)0,75 c)0,9

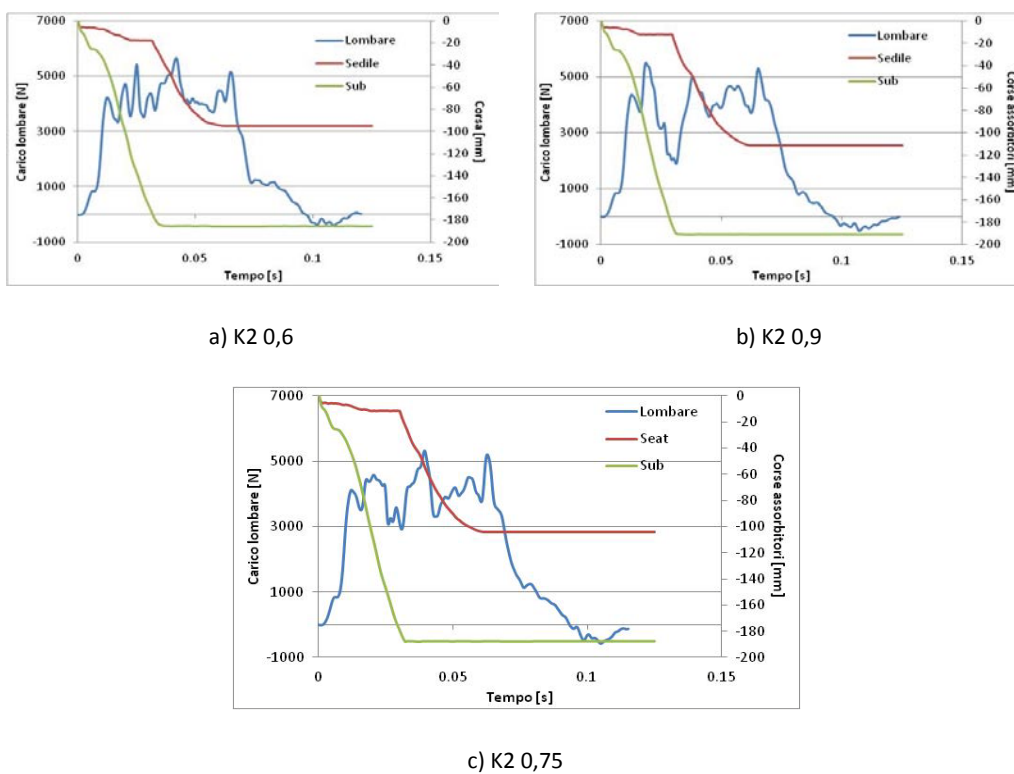


Figura 71 - Confronto curve di carico lombare e corse di sedile e sottopavimento per K2 variabile

Capitolo 8

Tabella 13 – Risultati del confronto tra i casi a K2 variabile

Fseat [N]	Fsub [N]	K1	K2	Lombare max [N]	Corsa sedile [mm]	Corsa sub [mm]	Corsa tot [mm]
13000	4000	1,5	0,6	5655	95	186	281
			0,75	5320	104	188	292
			0,9	5512	112	191	303

Anche in questo caso vengono confermate le impressioni ricavate dalla superficie di risposta. Si ottiene infatti un minimo di carico lombare per $K2=0,75$ e a parità di tutti gli altri parametri, proprio al centro dell'intervallo definito in seguito all'osservazione della superficie di risposta. È interessante notare che tale circostanza si verifica nonostante il caso con $K2=0,9$ sfrutti maggiormente la corsa totale disponibile sia tramite l'apporto dell'assorbitore del sedile che di quello dell'assorbitore del sottopavimento.

8.4 Considerazioni sui casi analizzati

I casi finora analizzati mostrano un'importante fenomeno che emerge osservando gli andamenti delle corse degli assorbitori; sono stati utilizzati i seguenti valori:

$F_{seat} = 13000N$

$F_{sub} = 4000N$

$K1 = 1,75; 1,85; 1,95$

$K2 = 0,6; 0,75; 0,9$

In tutte le combinazioni di valori considerate viene sfruttata maggiormente la corsa dell'assorbitore del sottopavimento ma l'aspetto di maggior interesse riguarda il fatto che si esaurisce l'intervento del sottopavimento prima che intervenga l'assorbitore del sedile. Tale circostanza si evince in ogni grafico delle Figure 70 e 71 con un evidente cambio di pendenza nelle curve relative alla corsa del sedile in corrispondenza del raggiungimento di un valore asintotico da parte della corsa media degli assorbitori del sottopavimento.

8.5 Valutazione dell'effetto dei parametri introdotti

Dopo aver valutato come la variazione dei parametri, introdotti in questo capitolo, influisca sui carichi lombari massimi e sulle corse degli assorbitori, si indaga l'effetto che ogni parametro introduce rispetto al caso elastico perfettamente plastico.

Si stabiliscono quattro casi:

- Caso1 Elastico perfettamente plastico

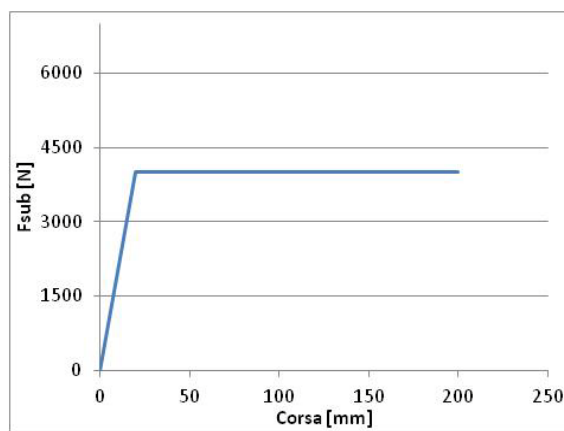


Figura 72 – Caso1: Elastico perfettamente plastico

- Caso2 Solo picco di attivazione

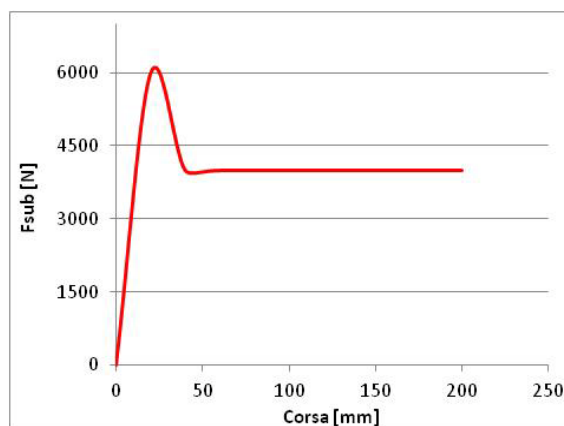


Figura 73– Caso2: Picco di attivazione

Capitolo 8

- Caso3 Solo oscillazione a frequenza ed ampiezza costanti

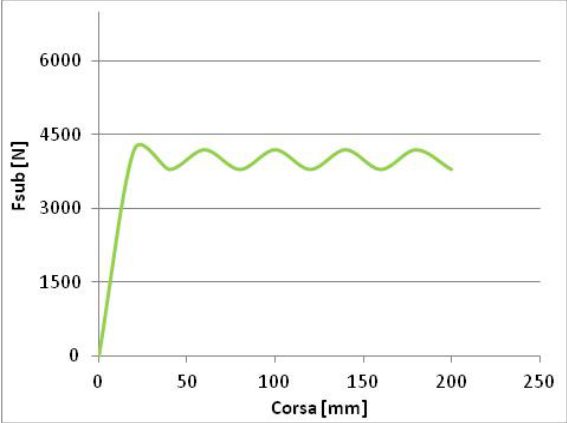


Figura 74 – Caso3: Oscillazione a frequenza ed ampiezza costante

- Caso4 Picco di attivazione + oscillazione a frequenza ed ampiezza costanti

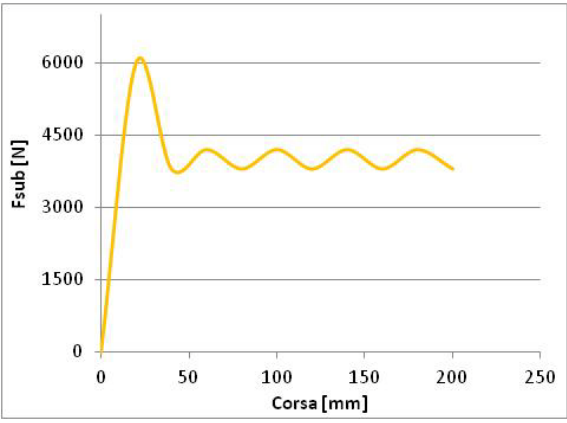


Figura 75 – Caso4: Picco di attivazione + oscillazione a frequenza ed ampiezza costanti

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

La seguente tabella riporta i valori dei parametri scelti per eseguire il confronto:

Tabella 14 – Valore parametri per confronto casi

Parametro	Valore
Fseat	13000N
Fsub	4000N
K1	1,5
K2	0,1

La scelta dei valori in Tabella 14 è determinata dall'analisi delle superfici di risposta riportate nelle Figure 67 68 e 69 e assicurano il contenimento del carico lombare massimo entro il limite di 6670N nonché valori di corsa lontani dal finecorsa sia per il sedile che per il sottopavimento.

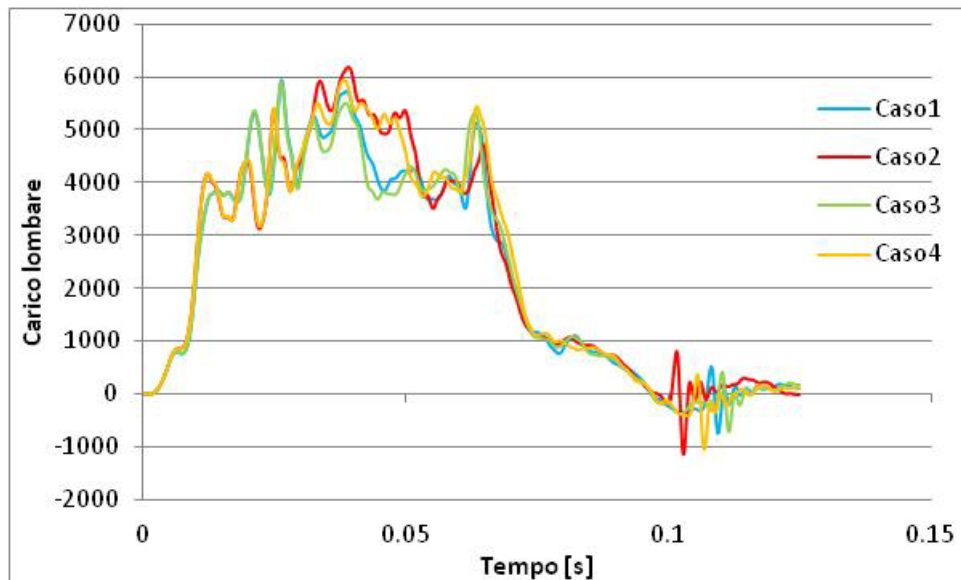


Figura 76 – Confronto carichi lombari massimi nei quattro casi considerati

Capitolo 8

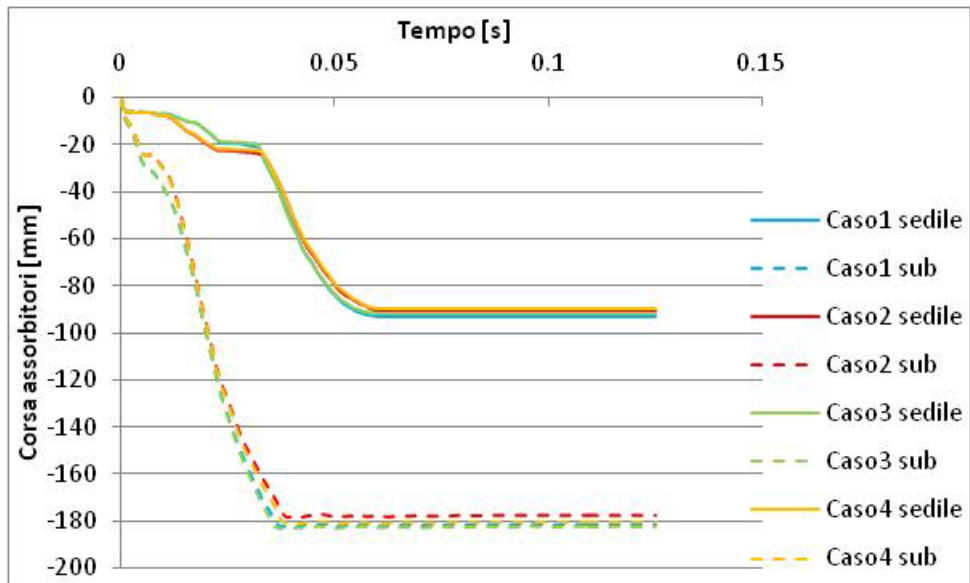


Figura 77– Confronto corse massime assorbitori nei 4 casi considerati

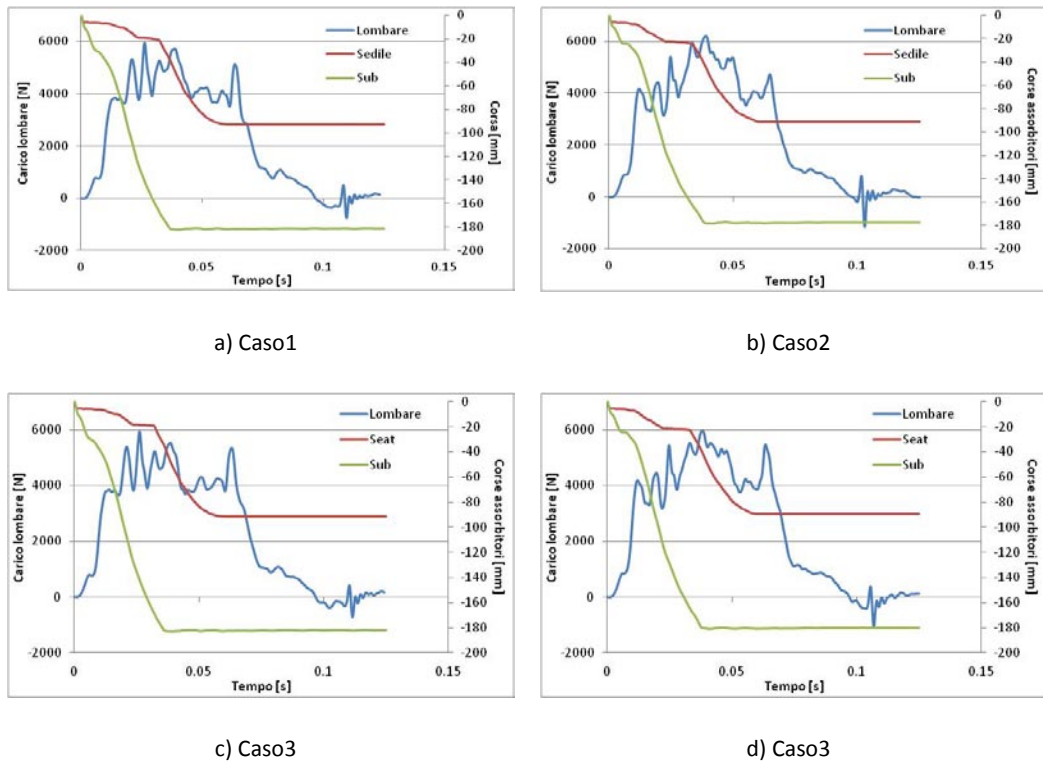


Figura 78 – Carico lombare, corse del sedile e del sottopavimento in funzione della corsa per i quattro casi in analisi

Assorbitore del sottopavimento con oscillazioni

Tabella 15 – Risultati dei quattro casi considerati

	Carico lombare [N]	Corsa sedile [mm]	Corsa sub [mm]	Corsa totale [mm]
Caso1	5937	93	182	275
Caso2	6198	91	178	269
Caso3	5925	92	183	275
Caso4	5953	89	181	270

Il confronto tra i quattro casi analizzati porta a concludere che l'introduzione di picco di attivazione e di oscillazioni a frequenza ed ampiezza costante comportano variazioni minime rispetto al caso elastico perfettamente plastico.

Partendo da una combinazione di assorbitori elastici perfettamente plastici che assicurano un ottimo comportamento in fase di impatto, sia in termini di carico lombare che di sfruttamento della corsa, i parametri fondamentali sono proprio le forze medie F_{seat} ed F_{sub} .

9 Conclusioni e spunti per sviluppi futuri

Al termine delle analisi di sensitività, svolte nell'ambito di questa tesi, al fine di individuare la miglior legge costitutiva da attribuire agli assorbitori di energia, sono emersi una serie di risultati di interesse.

La configurazione provata è costituita da un manichino, rappresentativo di un occupante cinquantesimo percentile, seduto su di un sedile munito di un dispositivo di assorbimento di energia, a sua volta vincolato ad un sottopavimento realizzato per ridurre carichi ed accelerazioni trasferiti agli occupanti in caso di impatto dell'elicottero con il suolo, alla velocità di 10m/s in direzione puramente verticale.

Per quanto concerne l'assorbitore del sedile, sono state condotte analisi sulla pendenza da assegnare alla legge costitutiva in campo plastico che hanno individuato nella legge elastica perfettamente plastica il miglior compromesso tra contenimento del carico lombare e sfruttamento della corsa utile disponibile. Queste analisi sono state condotte in combinazione con una legge costitutiva elastica perfettamente plastica, assegnata agli assorbitori del sottopavimento.

L'analisi successiva, eseguita sulle caratteristiche degli assorbitori del sottopavimento, ha indagato eventuali miglioramenti introdotti da un andamento oscillatorio a frequenza ed ampiezza costanti attorno ad un valor medio del campo plastico della legge costitutiva assegnata. È stato inoltre introdotto un picco di attivazione della deformazione dell'assorbitore la cui entità è stata anch'essa oggetto di studio.

Questa analisi ha confermato che l'andamento della legge costitutiva elastica perfettamente plastica risulta un ottimo compromesso tra sfruttamento della corsa dell'assorbitore e contenimento del carico lombare trasferito all'occupante. Tuttavia un piccolo miglioramento è stato riscontrato sul carico lombare rilevato, con una oscillazione a frequenza ed ampiezza costanti senza picco di attivazione e dunque a parità di area sottesa dalla curva forza-spostamento. Questo a parità anche di corsa totale (sedile più sottopavimento).

Nel corso di queste valutazioni, all'assorbitore del sedile è stata assegnata una legge elastica perfettamente plastica.

Conclusioni e spunti per sviluppi futuri

Gli studi di sensitività sono stati condotti prevalentemente attraverso l'utilizzo di superfici di risposta. L'impiego di diversi metodi di allocazione di punti all'interno dei domini di variazione dei parametri, piuttosto che i metodi di interpolazione dei risultati per la costruzione delle superfici stesse, costituiscono un territorio di indagine per rendere più efficiente e sicuro questo strumento di progetto.

Bibliografia

1. **Kindervater C.M., Kholgrüber D., Johnson A.** Composite vehicle structural crashworthiness – A status of design methodology and numerical simulation techniques. *International Journal of Crashworthiness*, 1999, vol.4: 2213-230
2. **Airoldi A.** Proprietà significative delle leghe leggere di alluminio nella progettazione ad assorbimento di energia delle strutture aeronautiche *La metallurgia italiana*, 2005, pp.5-14
3. **Coltman J.W., Van Ingen C., Johnson N. B., Zimmermann R. E.** *Aircraft crash survival design guide, volume II, Aircraft design crash impact conditions and human tolerance*. Fort Eustis, VA (USA): Aviation Applied Technology Directorate, U.S. Army AVSCOM, 1989. USAAVSCOM TR 89-D-22-B
4. *Light fixed and rotary-wing aircraft crashworthiness* Washington, DC (USA): Military Standards, 1974, MIL-STD-1920
5. Part 27 – Airworthiness standard: normal category rotorcraft. JAR
6. Part 29 – Airworthiness standard: transport category rotorcraft. JAR
7. EASA CS 27 – Certification specification for small rotorcraft. 2008
8. EASA CS 29 – Certification specification for large rotorcraft. 2008
9. **Cacchione B.** *A hybrid modelling technique for energy absorption capabilities of a crashworthy helicopter structure* Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale Politecnico di Milano, XXII ciclo, PhD Thesis
10. **Coltman J.V., Balukbasi A.O., Laananen D.H.** Analysis of rotorcraft crash dynamics for development of improved crashworthiness design criteria – Final report FAA Technical center, 1985, DOT/FAA/CT-85/11
11. **Kohrs B., Hajek F.** *HeliSafe Helicopter Occupant Safety - Crash scenario* Autoflug GmbH & Co., June 25, 2000. Deliverable D12-6.
12. **Astori P.** *Full-scale helicopter crash landing test and multi-body analysis* International Crashworthiness Conference IJCRASH '98, Dearbron (MI, USA), September 9-11, 1998

13. **Bisagni C.** *Crashworthiness of helicopter subfloor structures* International Journal of Impact Engineering 27 (2002) 1067-1082
14. **Lanzi L., Airoidi A., E.C. Chirwa** *Numeical techniques for design of crashworthy subfloors*, I Crash 2004. San Francisco, July 14-16, 2004, p.1-12
15. *Nexus Keywords Manual(v.1.1.06)* ®iChrome LTD – 2011
16. **D.F.Shanahan** *Basic principles of helicopter Crashworthiness* United States Army Aeromedical Research Laboratory Report, pp. 1-28, 1993.