

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Aeronautica



## Ottimizzazione dei sistemi ad assorbimento di energia di impatto negli elicotteri

Relatore: Prof. Paolo ASTORI

Tesi di laurea di:  
Francesco IMPARI Matr. 755643

Anno Accademico 2010 - 2011



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione al problema dell'impatto di elicotteri</b>	<b>11</b>
1.1	Premessa storica . . . . .	13
1.2	Il quadro normativo . . . . .	14
1.2.1	EASA 27 ed EASA 29 . . . . .	15
1.2.2	Le prove di impatto . . . . .	15
1.3	Tecniche di modellazione : il multicorpo . . . . .	17
1.4	Il programma di ottimizzazione : Nexus . . . . .	18
1.5	Organizzazione del lavoro . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Tecniche di modellazione</b>	<b>20</b>
2.1	Modello del sedile deformabile . . . . .	20
2.1.1	La legge di carico dell'assorbitore di energia del sedile . . . . .	21
2.2	Modello delle cinture di sicurezza del sedile . . . . .	24
2.3	Il sotto pavimento . . . . .	25
2.3.1	Le intersezioni del sotto pavimento . . . . .	26
2.4	Il modello di manichino antropomorfo . . . . .	28
2.4.1	Le connessioni tra i differenti segmenti dell'ATD . . . . .	29
2.4.2	Le interazioni tra le diverse parti dell'ATD . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Validazione del modello</b>	<b>31</b>
3.1	I casi di riferimento . . . . .	31
3.2	Il primo caso di validazione . . . . .	31
3.2.1	Modellazione degli assorbitori del sedile e del sottopavimento . . . . .	32
3.2.2	I risultati . . . . .	34
3.3	Il secondo caso di validazione . . . . .	37
3.4	Il terzo caso di validazione . . . . .	40
3.5	Conclusioni riguardo ai casi di validazione . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Studio di sensibilità e ottimizzazione</b>	<b>44</b>
4.1	Il modello . . . . .	44
4.2	Analisi di sensitività : le forze di attivazione degli assorbitori di energia . . . . .	45
4.2.1	I risultati . . . . .	45
4.3	Analisi di sensitività : la pendenza del tratto plastico . . . . .	48
4.3.1	La pendenza del tratto plastico del dispositivo del sedile . . . . .	49
4.3.2	La pendenza del tratto plastico del dispositivo del sotto pavimento . . . . .	53
4.3.3	La combinazione degli effetti dei due dispositivi . . . . .	56
4.4	Ricerca dei valori di ottimo . . . . .	58
4.5	La prova certificativa per il sedile ottimizzato . . . . .	60
4.6	Differenti condizioni di velocità di impatto . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Ottimizzazione degli stadi di assorbimento di un modello completo di elicottero</b>	<b>64</b>
5.1	Il modello numerico . . . . .	64
5.1.1	Il sotto pavimento . . . . .	65
5.1.2	Il carrello di atterraggio crashworthy . . . . .	66
5.1.3	Il sedile Martin Baker . . . . .	71

5.2	Confronto tra assorbitori ottimizzati e assorbitori classici . . . . .	71
5.3	Analisi di sensitività : le forze di attivazione degli assorbitori . . . . .	75
5.3.1	I risultati . . . . .	76
5.4	Analisi di sensitività: le forze di attivazione degli assorbitori perimetrali del sotto pavimento . . . . .	81
5.4.1	Forza di attivazione degli incroci perimetrali del sotto pavimento pari a 25 kN	82
5.4.2	Forza di attivazione degli incroci perimetrali del sotto pavimento pari a 100 kN	83
5.5	Analisi di sensitività: La forza limite del carrello crashworthy . . . . .	85
5.5.1	Forza limite del carrello pari a 30 kN . . . . .	86
5.5.2	Forza limite del carrello pari a 50 kN . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>92</b>

## Elenco delle figure

1	Incidenti mortali nel trasporto aereo commerciale con elicotteri con Maximum Take-Off Mass superiore ai 2250 kg (EASA Annual Safety Review 2009)	11
2	Prova su scala reale dell'aereo da trasporto B720	13
3	CH-47 crash test	14
4	Esempio di impulso di decelerazione triangolare	16
5	Modello di sedile Martin Baker	20
6	Esempio di curva di carico di un assorbitore di energia	21
7	Curva di carico caratteristica dell'assorbitore tipo A	22
8	Assorbitore di energia per sedile tipo B	22
9	Prova sperimentale per la caratterizzazione dell'assorbitore	23
10	Particolare del modello di sedile Martin Baker	24
11	Elementi costitutivi di un sotto pavimento elicotteristico	25
12	Sotto pavimento prima e dopo l'impatto	25
13	Modello numerico di sotto pavimento	26
14	Assorbitore del sotto pavimento prima e dopo la prova	27
15	Modello numerico di ATD ed ATD reale	28
16	Sequenza di impatto	30
17	Primo caso di validazione	32
19	Legge di carico dell'assorbitore del pavimento con diverse approssimazioni	33
18	Curva di carico dell'assorbitore del sedile	33
20	Schiacciamento dell'assorbitore del sotto- pavimento (fwd)	34
21	Schiacciamento dell'assorbitore del sotto- pavimento (aft)	34
22	Carico lombare nel manichino ATD	35
23	Dinamica dell'impatto	36
24	Posizionamento del manichino antropomorfo	37
25	Setup della prova	38
26	Accelerazione della slitta	38
27	Carico lombare	39
28	Dinamica dell'impatto	39
29	Accelerazione della slitta	40
30	Schiacciamento dell'assorbitore del sedile	41
31	Carico lomabare	41
32	Dinamica dell'impatto	42
33	Modello numerico usato per le analisi di sensitività	44
34	Analisi di sensitività	46

35	Analisi di sensitività senza le soluzioni che causano il fine corsa dell'assorbitore del sedile . . . . .	47
36	Superficie di risposta del carico lombare . . . . .	47
37	Diagramma 3D del carico lombare . . . . .	48
38	Esempio di legge di carico modellata . . . . .	48
39	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{seat} = -25000\text{N/m}$ . . . . .	49
40	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{seat} = -10000\text{N/m}$ . . . . .	50
41	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{seat} = 0\text{N/m}$ . . . . .	50
42	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{seat} = 10000\text{N/m}$ . . . . .	51
43	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{seat} = 25000\text{N/m}$ . . . . .	51
44	Sequenza di grafici del carico lombare al variare della $K_{pl}^{seat}$ . . . . .	52
45	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{subf} = -10000\text{N/m}$ . . . . .	53
46	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{subf} = 4000\text{N/m}$ . . . . .	54
47	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{subf} = 17000\text{N/m}$ . . . . .	54
48	Analisi di sensitività con $K_{pl}^{subf} = 30000\text{N/m}$ . . . . .	55
49	Sequenza di grafici del carico lombare al variare della $K_{pl}^{subf}$ . . . . .	55
50	Superficie di risposta al variare delle pendenze del tratto plastico per gli assorbitori del sedile e del sotto pavimento . . . . .	57
51	Diagramma 3D della variazione del carico lombare . . . . .	57
52	Legge di carico del dispositivo del sedile ottimizzato . . . . .	59
53	Legge di carico del dispositivo del sotto pavimento ottimizzato . . . . .	59
54	Accelerazione imposta alla slitta . . . . .	60
55	Carico lombare trasmesso all'ATD durante la prova certificativa . . . . .	61
56	Sequenza di frame della prova certificativa . . . . .	61
57	Distribuzione delle velocità d'impatto di elicotteri civili e militari . . . . .	62
58	Carico lombare a differenti velocità d'impatto . . . . .	63
59	Modello di elicottero completo . . . . .	64
60	Modello di elicottero completo (particolare) . . . . .	65
61	Layout del sotto pavimento . . . . .	66
62	Particolare degli incroci del sotto pavimento . . . . .	66
63	Schema di funzionamento della valvola per la riduzione della reazione viscosa . . . . .	67
64	Deformazione di un carrello crashworthy . . . . .	68
65	Esempio di Legge di carico di un carrello crashworthy . . . . .	68
66	Esempio di reazione elastica di un carrello crashworthy . . . . .	69
67	Esempio di reazione viscosa di un carrello crashworthy . . . . .	69
68	Reazione elastica e viscosa del carrello principale . . . . .	70
69	Reazione totale carrello . . . . .	70

70	Configurazione dell'elicottero dopo l'atterraggio . . . . .	70
71	Layout della disposizione di sedili e manichino ATD . . . . .	71
72	Legge di carico ottimizzata dell'assorbitore del sedile . . . . .	72
73	Legge di carico ottimizzata dell'assorbitore del sotto pavimento . . . . .	72
74	Legge di carico non ottimizzata dell'assorbitore del sedile . . . . .	73
75	Legge di carico non ottimizzata dell'assorbitore del sotto pavimento . . . . .	73
76	Confronto del carico lombare . . . . .	74
77	Confronto della corsa dell'assorbitore del sedile . . . . .	74
78	Confronto della corsa dell'assorbitore del sotto pavimento . . . . .	75
79	Analisi di sensitività sul modello di elicottero completo . . . . .	76
80	Superficie di risposta del carico lombare . . . . .	77
81	Diagramma 3D del carico lombare . . . . .	77
82	Analisi di sensitività sul modello di elicottero completo, senza i valori che causano il fine corsa . . . . .	78
83	Carico lombare dell'ATD per la soluzione di progetto . . . . .	79
84	Contributo elastico e viscoso del carrello . . . . .	79
85	Reazione completa del carrello . . . . .	80
86	Corsa dell'ammrtizzatore . . . . .	80
87	Deformata finale elicottero nel caso ottimizzato . . . . .	81
88	Particolare della deformata finale elicottero nel caso ottimizzato . . . . .	81
89	Risultati dell'analisi di sensitività ottenuta per valori della forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 25 kN . . . . .	82
90	Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 25 kN . . . . .	83
91	Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 50 kN . . . . .	83
92	Risultati dell'analisi di sensitività ottenuta per valori della forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 100 kN . . . . .	84
93	Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 100 kN . . . . .	85
94	Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 50 kN . . . . .	85
95	Reazione elastica del carrello avente forza limite pari a 30 kN . . . . .	86
96	Reazione viscosa del carrello avente forza limite pari a 30 kN . . . . .	87
97	Analisi di sensitività ottenuta per valori del carico limite del carrello principale pari a 30 kN . . . . .	87
98	Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 30 kN . . . . .	88

99	Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 40 kN . . . . .	88
100	Reazione elastica del carrello avente forza limite pari a 50 kN . . . . .	89
101	Reazione viscosa del carrello avente forza limite pari a 50 kN . . . . .	89
102	Analisi di sensitività ottenuta per valori del carico limite del carrello principale pari a 50 kN . . . . .	90
103	Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 50 kN . . . . .	90
104	Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 40 kN . . . . .	91



## Elenco delle tabelle

1	Incidenti di elicotteri EASA MS con Maximum Take-Off Mass superiore ai 2250 kg (EASA Annual Safety Review 2009) . . . . .	11
2	Incidenti di elicotteri leggeri EASA MS con Maximum Take-Off Mass inferiore ai 2250 kg (EASA Annual Safety Review 2009) . . . . .	12
3	Dati sperimentali . . . . .	35
4	Valori numerici delle variabili selezionati dall'ottimizzazione . . . . .	58

## Sommario

Nel presente lavoro di tesi viene esposta una tecnica di modellazione multi corpo per lo studio della sicurezza passiva di una struttura elicotteristica nella condizione di impatto verticale. Per lo sviluppo dei modelli numerici e le relative simulazioni si è fatto uso del codice MUSIAC (Multi Scale Impact and Crash): un software ideato per la risoluzione di problemi dinamici e di crash con modelli multibody. L'adozione di questa tecnica ha permesso di conseguire diversi vantaggi tra cui la semplificazione del problema attraverso la diminuzione dei gradi di libertà e la riduzione consistente dei tempi calcolo richiesti per studiare la dinamica tipica dei fenomeni di impatto. Tale modello è stato infine utilizzato per la realizzazione di analisi di sensitività e per l'ottimizzazione del progetto strutturale, attraverso un secondo codice dedicato denominato NEXUS.

La novità di questo lavoro risiede nell'ottimizzazione simultanea di tutti i dispositivi addetti all'assorbimento di energia normalmente presenti negli elicotteri, col fine di minimizzare le forze trasmesse agli occupanti a seguito di crash.

**Parole chiave:** sicurezza passiva, elicottero, modello multicorpo, sottopavimento, sedile, MUSIAC, ottimizzazione, studio di sensitività, NEXUS.

## Abstract

This thesis exposes a multibody modeling technique for the study of the passive safety of helicopter structure in the condition of vertical impact. The development of numerical models and related simulations has been done with the code MUSIAC (Multi Scale Impact and Crash): software designed to solve dynamic problems and crashes with multibody models. The adoption of this technique has allowed to achieve several advantages including simplification of the problem by reducing the degrees of freedom and the substantial reduction of the calculation time required for studying the dynamics of the typical phenomena of impact. This model was then used for the realization of sensitivity analysis and for the optimization of the structural design, through a second dedicated code called NEXUS.

The novelty of this work lies in optimizing simultaneously all the energy absorbers commonly found in helicopters, with the aim of minimizing the forces transmitted to occupants as a result of a crash.

**Keywords:** passive safety, helicopter, multibody model, sub-floor, seat, MUSIAC, optimization, sensitivity study, NEXUS.

# 1 Introduzione al problema dell'impatto di elicotteri

Gli elicotteri sono velivoli polivalenti e per questo vengono utilizzati in un'ampia varietà di operazioni e regioni: dal Mare del Nord per le piattaforme off shore al volo in montagna, dai servizi medici di emergenza alle operazioni antincendio, dalla formazione ai voli da diporto. Nel 2008 sono stati registrati in Europa circa 6800 elicotteri per uso civile. Per ora non sono disponibili dati di volo affidabili riguardanti tutte le categorie di elicotteri registrati. Tuttavia, per l'anno 2008 è stato stimato un totale di 1,7 milioni di ore di volo e 4,7 milioni di atterraggi per gli elicotteri coinvolti nell'uso civile registrati in Europa.

I dati raccolti per l'annuale rapporto sulla sicurezza EASA [19] forniscono un'indicazione riguardo il numero di incidenti elicotteristici in Europa.

La figura 1 mostra il numero di elicotteri pesanti coinvolti in incidenti mortali a livello mondiale nel settore del trasporto aereo commerciale per velivoli gestiti dagli operatori degli Stati membri dell'EASA e da operatori dei paesi terzi. I dati relativi agli incidenti riguardanti gli elicotteri leggeri sono presentati nelle tabelle 1 e 2.

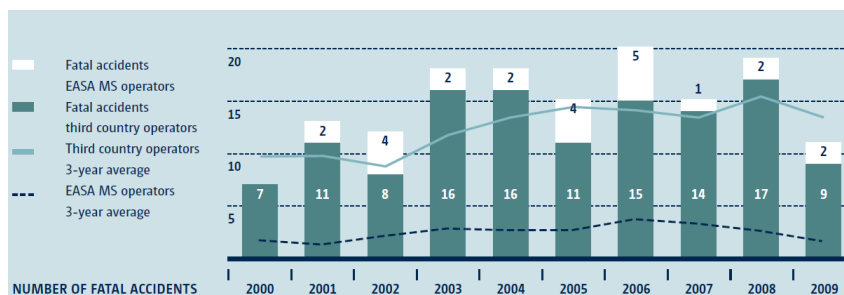


Figura 1: Incidenti mortali nel trasporto aereo commerciale con elicotteri con Maximum Take-Off Mass superiore ai 2250 kg (EASA Annual Safety Review 2009)

Operation type	Period	Number of accidents	Fatal accidents	Fatalities on board
Commercial Air Transport	1998–2007 (average)	8	3	11
	2008 (total)	10	2	4
	2009 (total)	5	2	18
General Aviation	1998–2007 (average)	5	2	3
	2008 (total)	1	0	0
	2009 (total)	2	2	3
Aerial Work	1998–2007 (average)	6	2	3
	2008 (total)	5	1	2
	2009 (total)	1	1	4

Tabella 1: Incidenti di elicotteri EASA MS con Maximum Take-Off Mass superiore ai 2250 kg (EASA Annual Safety Review 2009)

Operation type	Period	Number of accidents	Fatal accidents	Fatalities on board
All	2006–2008 (average)	79	8	18
	2009 (total)	95	15	28

Tabella 2: Incidenti di elicotteri leggeri EASA MS con Maximum Take-Off Mass inferiore ai 2250 kg (EASA Annual Safety Review 2009)

Come si può notare da questi report gli incidenti che coinvolgono gli elicotteri sono tuttora numerosi ed in particolare nel campo degli elicotteri leggeri. Sebbene la percentuale di incidenti mortali sia bassa risulta necessario tenere in considerazione che le conseguenze dell’impatto al suolo di un elicottero in atterraggio di emergenza possono essere sempre potenzialmente tragiche.

Per questo motivo è necessario diffondere un interesse sempre maggiore nei confronti della capacità degli elicotteri di garantire la maggior sicurezza possibile nell’eventualità che un incidente possa verificarsi.

Attualmente la progettazione di un elicottero è fortemente influenzata da esigenze legate al crashworthiness. Lo studio di questa materia mira ad aumentare la sopravvivenza degli occupanti in caso di incidente. Di fatto nella situazione di impatto la struttura dell’elicottero deve preservare uno spazio minimo e limitare le forze e le accelerazioni trasmesse agli occupanti entro livelli tollerabili.

A tal proposito la struttura deve essere progettata in modo da poter assorbire l’energia cinetica in diversi scenari possibili. Inoltre la velocità di impatto dell’occupante contro l’ambiente circostante la cabina deve essere limitata per prevenire gli infortuni più gravi.

Nel corso di un atterraggio di fortuna in elicottero, i rischi principali per gli occupanti, dopo le lesioni termiche, sono le lesioni meccaniche derivanti da carichi verticali trasmessi al corpo e le forze di contatto causate dall’interazione con le parti interne della cabina di guida. È possibile ottenere una significativa riduzione del livello di lesione attraverso l’utilizzo di cinture a più punti di attacco, sedili ad assorbimento di energia, sotto-pavimento crashworthy e carrello di atterraggio efficiente. La corretta messa a punto degli assorbitori di energia può richiedere un notevole sforzo, il loro scopo è quello di mantenere il carico della colonna lombare dell’occupante sotto un limite tollerabile con la corsa più bassa possibile durante un atterraggio grave con alta velocità verticale.

L’efficacia di un sistema viene valutata misurando il carico della colonna lombare durante i test dinamici sul sedile con manichino antropomorfo. Questa procedura può anche essere utilizzata per sviluppare il design di assorbitori di energia e per regolarli ma è chiaramente costosa sia per le attrezzature sperimentali sia perché il sedile, come altri assorbitori, è spesso deformato dai carichi di prova e quindi deve essere sostituito dopo ogni test.

Un’analisi semplificata del problema può portare a risultati qualitativamente corretti anche se non molto precisi, soprattutto perché l’accoppiamento dinamico tra il manichino antropomorfo e le parti molli del sedile è altamente non lineare. Per queste ragioni l’analisi numerica del problema è un supporto più adatto per la progettazione del sedile e la regolazione dei vari sistemi crashworthy presenti a bordo. In particolare, la tecnica multibody offre, in questo caso, i dettagli necessari nei risultati e un tempo molto basso richiesto dai calcoli.

## 1.1 Premessa storica

È possibile far risalire i primi studi sulla sicurezza passiva al 1917 [20], a seguito di un evento fortuito accaduto al pilota ed ingegnere americano Hug DeHaven.

Egli infatti fu l'unico di quattro passeggeri a sopravvivere in un incidente aereo, durante il quale si trovava in una porzione dell'aereo che casualmente subì deformazioni moderate e non fu sbalzato fuori dal velivolo perché legato al sedile. Questo avvenimento portò DeHaven ad indagare le dinamiche degli incidenti aerei e stradali e capì che in alcuni di questi si poteva ottenere un aumento delle possibilità di sopravvivenza a patto di soddisfare alcune condizioni.

Tuttavia i primi veri passi nell'ambito della sicurezza passiva sono stati mossi a partire dal 1964 quando la FAA (Federal Aviation Administration) condusse le prime prove su velivoli da trasporto in scala reale al fine di raccogliere dati sul comportamento a crash degli aeromobili.



Figura 2: Prova su scala reale dell'aereo da trasporto B720

Sulla base degli studi e delle prove sperimentali, negli anni successivi è stato possibile redigere documenti in cui venivano stilati i requisiti che le strutture aeronautiche devono rispettare per essere considerate sicure. Nel 1967 la U.S.Army pubblicò la "Aircraft Crash Survival Design Guide" in cui venivano presentati dei criteri di "progettazione sicura". Questa guida ha poi subito negli anni successivi una serie di modifiche che hanno portato, nel 1971, alla stesura delle MIL-STD-1290, una raccolta di normative sulla sicurezza passiva di velivoli leggeri militari ad ala fissa e di elicotteri militari.

Altri passi in questo senso vennero fatti nel 1972 a seguito di una cooperazione tra la NASA, la FAA e le industrie del settore aerospaziale, per migliorare la sicurezza passiva in campo aeronautico. La ricerca consisteva nel progetto e nello sviluppo di nuovi concetti strutturali per mezzo di prove sperimentali coadiuvate dalle prime analisi numeriche in questo campo. In quel periodo vennero effettuate anche delle prove d'impatto su piccoli aerei civili che fornirono una grande mole di informazioni sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo sul comportamento del velivolo e su quello che accadeva agli occupanti in caso d'incidente.

Successivamente il GASP (General Aviation Safety Panel) elaborò tali dati esaminando le caratteristiche principali degli incidenti come la durata e l'andamento delle accelerazioni in alcuni punti dell'aereo.

Numerose prove in scala reale vennero eseguite anche sugli elicotteri a partire dalla metà degli anni '70. Nel 1975-76, ad esempio, la U.S Army Aviation eseguì delle prove d'impatto in scala reale sull'elicottero da trasporto CH-47 per studiare la deformazione della struttura, i carichi limite tollerabili dai sedili e l'integrità del sistema di ritenuta delle merci.

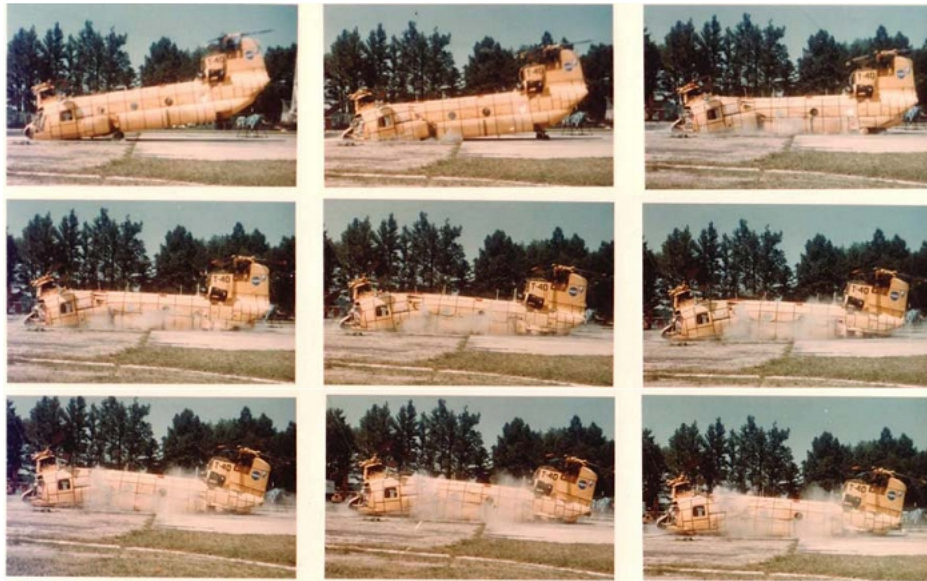


Figure 3: CH-47 crash test

A partire dalle norme MIL e dai numerosi studi condotti sono state redatte agli inizi del 2002 delle normative che tutt'oggi si occupano della sicurezza passiva degli elicotteri civili: le EASA 27 ed EASA 29.

## 1.2 Il quadro normativo

Come già accennato in precedenza, lo sviluppo dei requisiti che un elicottero deve possedere per essere considerato resistente all'impatto è stato raggiunto a partire dagli anni '60 da parte della U.S. Army attraverso numerose ricerche e prove sperimentali.

I risultati di tali studi sono stati pubblicati prima nella "Crash survival Design Guide" e successivamente, agli inizi degli anni 70, si è giunti alla redazione delle normative per elicotteri militari quali le MIL-STD-1290 [9] e la MIL-DTL-2742C entrata in vigore in sostituzione della vecchia MIL-T-27422B.

Nella metà degli anni '80 l'Aerospace Industries Association of America (AIA), il Rotorcraft Airworthiness Requirements Committee, l'Helicopter Crashworthiness Project Group elaborarono alcuni dei requisiti che un impianto combustibile per elicotteri civili deve soddisfare per essere resistente all'impatto [11, 12].

E' da questi studi e da osservazioni successive che sono state infine redatte le normative relative agli elicotteri civili EASA27 e EASA29 che costituiscono tutt'oggi il principale riferimento delle case costruttrici di elicotteri.

### **1.2.1 EASA 27 ed EASA 29**

Tra le normative relative a velivoli civili si trovano le EASA 27 e le EASA 29. Le EASA 27 sono applicate a "piccoli" (come sono definiti dalla normativa) elicotteri con peso inferiore a 3175 Kg o con meno di 9 passeggeri. Le EASA 29 sono applicate a "grandi" elicotteri suddivisi in due categorie:

Categoria A:

elicotteri con un peso superiore ai 9072 Kg e con 10 o più passeggeri;

Categoria B:

elicotteri con un peso superiore di 9072 kg e con 9 o meno passeggeri;

elicotteri con un peso uguale o minore di 9072 kg e con 10 o più passeggeri;

elicotteri con un peso uguale o minore di 9072 kg e con 9 o meno passeggeri;

In particolare, in riferimento alla certificazione per sedili elicotteristici, la normativa CS 27.561 prevede che in caso di impatto al suolo, i seggiolini aeronautici contribuiscano a dissipare l'energia d'impatto e quindi abbiano un ruolo nel garantire la sopravvivenza degli occupanti. Per quantificare quanta energia debbano dissipare i vari dispositivi presenti a bordo viene posto un limite al carico di compressione misurato tra il bacino e la zona lombare dell'ATD (Anthropomorphic Test Device), il quale non deve superare 6674 N (1500 libbre).

### **1.2.2 Le prove di impatto**

Nell'ambito del presente lavoro di tesi, per lo sviluppo del modello numerico al fine dell'ottimizzazione degli stadi di assorbimento è stato considerato lo scenario tipico delle prove per la certificazione dei seggiolini degli elicotteri e quindi nel seguito verranno presentate le caratteristiche generali di queste prove.

Le prove di impatto per la certificazione dei seggiolini degli elicotteri sono essenzialmente di due diversi tipi: prove verticali e prove orizzontali.

Per entrambi i tipi di prove viene usata una slitta orizzontale. Usando questo tipo di attrezzatura viene a mancare il contributo dell'accelerazione di gravità che risulta, tuttavia, trascurabile rispetto ai valori tipici dell'accelerazione in questo tipo di prove (ordine dei 30 g). Sulla slitta scorre un carrello sul quale viene montata una struttura di prova poco deformabile (che idealmente riproduce la struttura dell'abitacolo) che sorregge il seggiolino.



La struttura di prova può essere ruotata ottenendo in questo modo le componenti di accelerazione nelle direzioni desiderate. Prima della prova, l'ATD viene posto sul seggiolino e fissato mediante cinture di sicurezza. In particolare, il manichino viene imbracato con apposite cinture di sicurezza al seggiolino e posizionato in modo che vengano rispettate alcune condizioni specificatamente prescritte dalle normative: la schiena deve essere ben appoggiata allo schienale, le mani devono essere appoggiate sulle cosce appena dietro il ginocchio, la distanza fra le ginocchia deve essere 25 cm e i piedi devono essere ben appoggiati alla pavimentazione oppure sui pedali.

### Prove di impatto verticale

Una prova verticale (down test) riproduce una condizione di atterraggio di emergenza con componenti di accelerazione e velocità prevalentemente verticali che vanno a sollecitare la zona lombare con conseguente rischio di danni permanenti o morte dell'occupante.

Facendo riferimento a studi condotti dalla US Army [10], è stato dedotto che statisticamente durante un incidente di questo tipo e per diverse categorie di velivoli, l'occupante è sottoposto ad una forma triangolare dell'impulso di decelerazione (Figura 4). Per questa ragione è previsto dalle norme che nelle prove le slitte che alloggiavano il simulacro, in cui viene posizionato l'ATD, abbiano un profilo di decelerazione triangolare. Come già affermato, in una prova verticale l'asse longitudinale del sedile deve formare con l'orizzontale (o meglio con la direzione di impatto) un angolo attorno a  $60^\circ$ . Il picco massimo di decelerazione deve raggiungere un minimo di 30 g in un intervallo di tempo non inferiore a 0,031 s dopo l'impatto.

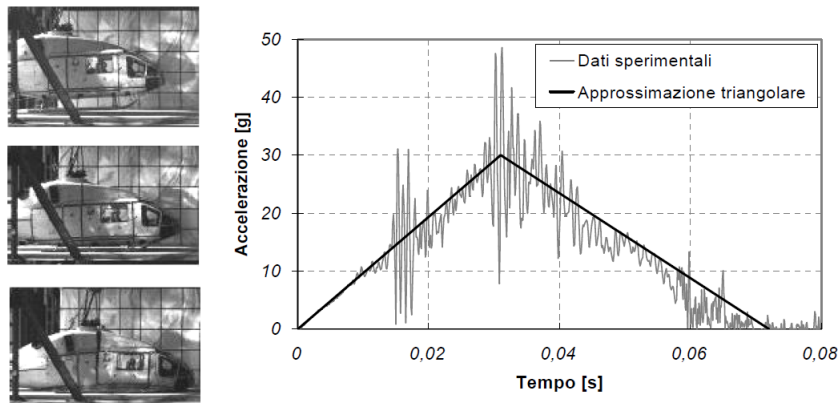


Figure 4: Esempio di impulso di decelerazione triangolare

### Prova di impatto orizzontale

Una prova orizzontale (forward test) riproduce una tipica situazione di incidente automobilistico (tamponamento) in cui la velocità di impatto ha componente predominante in direzione normale alla colonna vertebrale dell'occupante. In questo tipo di prove hanno importanza rilevante i sistemi

di ritenuta e le accelerazioni della testa e del torace del manichino. In una prova orizzontale il picco massimo di decelerazione deve raggiungere, dopo l'impatto, un minimo di 18.4 g in un intervallo di tempo non inferiore a 0,071 s.

### **Prove ad Accelerazione/Decelerazione Imposta**

Nelle prove ad accelerazione imposta la slitta giace su due guide orizzontali. Un sistema idraulico ad alta pressione collegato ad un serbatoio d'aria in pressione imprime al carrello un'accelerazione con profilo temporale voluto.

Diversamente nelle prove a decelerazione imposta la slitta viene messa in movimento lungo due guide orizzontali da un sistema puramente pneumatico che consiste in un serbatoio d'aria in pressione che comunica con un cilindro all'interno del quale scorre un pistone il cui stelo traina, attraverso un sistema di funi e carrucole, il carrello su cui è installata la slitta. Altri sistemi prevedono l'utilizzo di una batteria di tondini metallici che per deformazione plastica sono in grado di garantire il livello di decelerazione desiderata.

Una volta che la slitta viene lanciata esegue una corsa di circa 20 metri prima di raggiungere la velocità richiesta per la specifica prova (pari a 9,1 m/s per una prova di tipo verticale). Alla fine della corsa, la slitta viene arrestata bruscamente da un sistema oleopneumatico (del tutto analogo ad un classico ammortizzatore oleopneumatico) avente una strozzatura regolabile nel condotto idraulico in modo da ottenere il profilo di decelerazione voluto (con questo tipo di sistemi si ottengono generalmente dei profili di decelerazione con andamento triangolare nel tempo). Questo sistema è più economico del precedente, ma il controllo del profilo di accelerazione risulta più complesso.

## **1.3 Tecniche di modellazione : il multicorpo**

Come già accennato, all'interno di questo lavoro la tecnica di modellazione scelta per rappresentare la dinamica del fenomeno dell'impatto di un elicottero è la tecnica multibody. Di seguito verrà data una breve introduzione esplicativa di questa particolare tecnica al fine di rendere più chiare le scelte di modellazione intraprese nel seguito dei capitoli successivi.

Un modello multi corpo costituisce una rappresentazione semplificata di un meccanismo in cui le deformazioni sono principalmente legate al movimento relativo tra parti, così come consentito dai vincoli. Il problema viene quindi descritto mediante punti o corpi rigidi che interagiscono mediante vincoli cinematici, ovvero collegamenti che impediscono alcuni movimenti relativi, a seguito dei quali, i punti o i corpi coinvolti si scambiano forze interne, ovvero reazioni vincolari.

In questo modo si assume implicitamente che la deformabilità dei corpi coinvolti sia trascurabile oppure sia rappresentabile in modo discreto mediante molle concentrate che collegano fra loro i punti e i corpi rigidi.

L'affermazione di questi formalismi è sostanzialmente legata alla loro capacità di descrivere con notevole accuratezza e spesso con altrettanta notevole efficienza la cinematica di corpi rigidi, con

la sua complessità senza eguali in tante altre discipline.

Dunque da questo punto di vista, il multicorpo rappresenta sicuramente l'ambiente ideale di sintesi e di analisi multidisciplinari.

#### **1.4 Il programma di ottimizzazione : Nexus**

Come dichiarato all'interno del sommario, il presente lavoro di tesi non si limita a ricreare un modello numerico fedele alla realtà fisica, ma vuole sfruttare la possibilità di realizzare analisi di sensitività al fine dell'ottimizzazione del progetto strutturale attraverso un secondo codice dedicato denominato NEXUS.

Nexus è una suite di ottimizzazione progettata per integrare differenti strumenti di ingegneria in grado di fornire una piattaforma flessibile e affidabile per risolvere problemi di ottimizzazione. L'idea di base di Nexus è quella di definire un insieme di oggetti di base (agenti) che lavorano assieme per risolvere un problema generale di ottimizzazione. Gli agenti sono concetti astratti, comuni nei processi di ottimizzazione, che hanno differenti implementazioni concrete a seconda delle specifiche applicazioni nella quale vengono utilizzati. Ad esempio, Nexus definisce il concetto di design variable e quindi rende concreta quest'idea, definendo specifici tipi di variabili (continue, discrete, ..).

Un ulteriore punto di forza di questo programma è costituito dalla grande disponibilità di metodi di ottimizzazione e di generazione delle superfici di risposta. Nell'ambiente Nexus, infatti, è possibile definire una procedura di ottimizzazione attraverso un algoritmo genetico ad obiettivo singolo o multiplo, oppure attraverso metodi basati sui minimi quadrati oppure ancora con algoritmi simplex basati sulla procedura Nelder-Mead.

Alla luce di quanto detto è possibile affermare che Nexus rappresenta di sicuro lo strumento ideale per raggiungere gli obiettivi prefissati in questo lavoro di tesi.

## 1.5 Organizzazione del lavoro

Il presente lavoro è così organizzato:

- Il capitolo 2 presenta le scelte di modellazione riguardanti il sedile comprensivo delle cinture di sicurezza, la struttura della cabina (con particolare attenzione al sotto pavimento) e il manichino antropomorfo;
- Il capitolo 3 discute la validazione del modello fisico ricreato. A tale scopo vengono confrontati i risultati numerici con i dati sperimentali ottenuti da tre diverse prove di crash;
- Il capitolo 4 espone una prima applicazione del modello numerico, affrontando il tema dell'ottimizzazione dei sistemi di assorbimento dell'energia di crash, con l'obiettivo di minimizzare i valori di forza trasmessi alla spina dorsale del manichino.
- Il capitolo 5 sfrutta le metodologie prima ricavate applicandole al modello numerico completo di un elicottero AW109 dotato di sottopavimento e sedile crashworthy. L'obiettivo rimane quello di minimizzare la forza trasmessa alla spina dorsale dell'ATD.
- Le considerazioni finali e le conclusioni sono riportate nel capitolo 6

## 2 Tecniche di modellazione

Questo capitolo presenta le tecniche adottate per modellare un sedile crashworthy e un manichino rappresentativo del dispositivo HYBRID II utilizzato nelle prove sperimentali.

### 2.1 Modello del sedile deformabile

Il sedile aeronautico utilizzato nelle prove di crash è un Martin Baker provvisto di assorbitori di energia. Il modello numerico semplificato di questo elemento è composto da due strutture principali: la parte più bassa è fissata al pavimento della cabina mentre la parte superiore, consistente nello schienale di appoggio e nella seduta, è fatta da leghe leggere di alluminio coperte da una schiuma che funge da cuscino.

Alla parte superiore è consentito il movimento relativo rispetto alla parte fissa lungo una guida data dai binari del sedile.

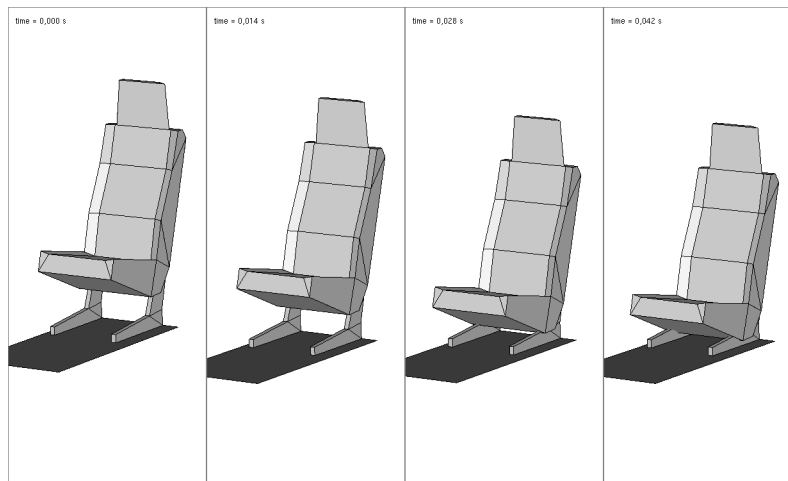


Figure 5: Modello di sedile Martin Baker

Il modello del sedile è costituito da due corpi rigidi: la parte fissa è collegata al pavimento per mezzo di quattro giunti mentre la parte mobile, che rappresenta la seduta del sedile e il fissaggio delle cinture di sicurezza, è collegata ai montanti per mezzo di tre giunti traslazionali. Così facendo il movimento relativo tra le parti è consentito e le caratteristiche dell'assorbitore di energia sono concentrate nel modello considerando una trave con una legge costitutiva adeguata. Questa trave fittizia deve infatti riprodurre la risposta strutturale del congegno di assorbimento di energia del sedile e l'effetto non lineare del fine corsa. Nel modellare la legge costitutiva di tale elemento è stata considerata anche la dipendenza dalla velocità di deformazione.

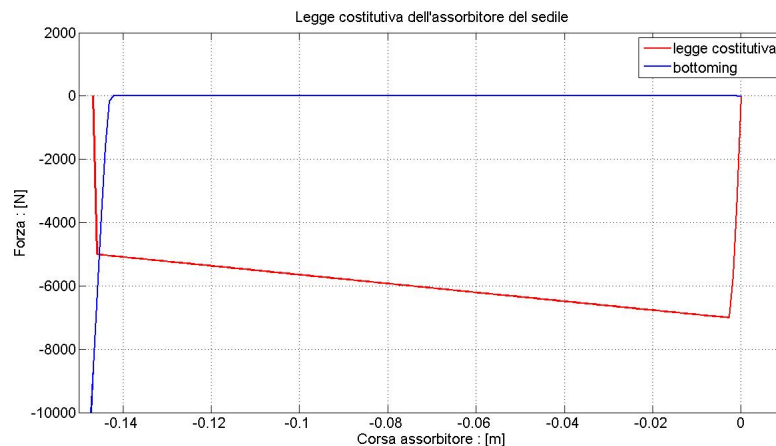


Figure 6: Esempio di curva di carico di un assorbitore di energia

Il cuscino del sedile non è stato introdotto nel modello numerico. Il suo effetto è stato tuttavia recuperato lavorando con gli algoritmi di contatto tra l'ATD e il sedile.

### 2.1.1 La legge di carico dell'assorbitore di energia del sedile

Il sistema di attenuazione dell'energia del sedile è uno dei sistemi più efficaci per fornire protezione agli occupanti, in quanto le prestazioni di tale dispositivo risultano meno influenzate dalle condizioni e dalla superficie di impatto se confrontati col carrello di atterraggio e col sotto- pavimento.

Il dispositivo di assorbitore Golan installato nel modello considerato di sedile aeronautico Martin Baker utilizza la forza necessaria per ridurre il diametro di un tubo. L'energia è dunque assorbita costringendo il tubo a diminuire il proprio diametro forzando il passaggio dello stesso attraverso una trafilata metallica. Anche la forza necessaria per vincere l'attrito contribuisce al processo di assorbimento di energia.

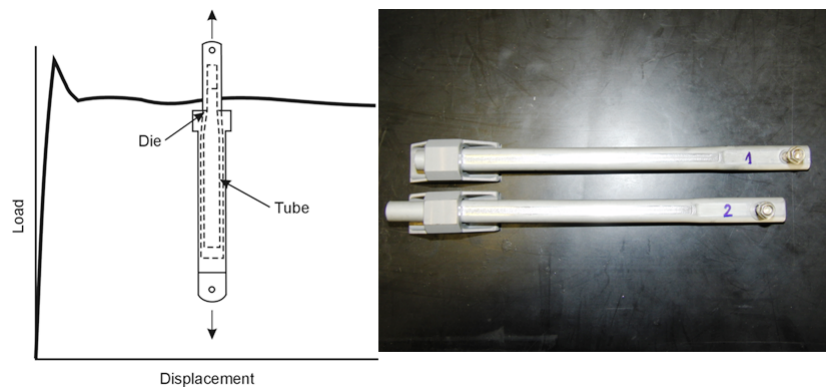


Figure 7: Curva di carico caratteristica dell'assorbitore tipo A

La figura mostra un disegno concettuale dell'assorbitore che riduce il diametro del tubo attraverso il suo passaggio nella trafilatura. È il tipo di assorbitore di energia utilizzata per i sedili equipaggio Martin Baker per l'elicottero Agusta A129.

Un secondo tipo di assorbitore di energia sfrutta il passaggio di un tubo attraverso una serie di rulli.

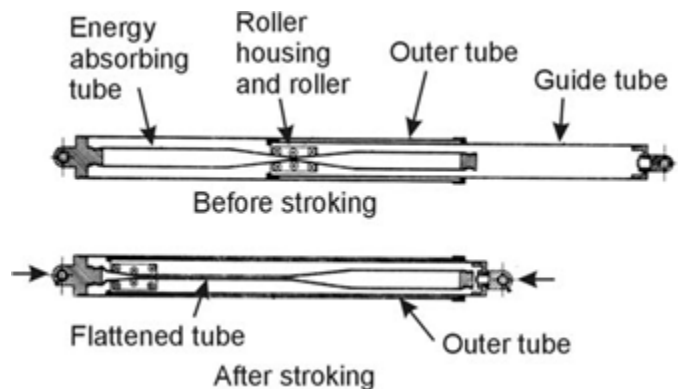


Figure 8: Assorbitore di energia per sedile tipo B

Questa tipologia di dispositivi è stata utilizzata dalla IAI (IAI Golan Industries, Israel Aircraft Industries Ltd., Israele). Sia con il rullo sia con la trafilatura, l'energia è assorbita dalla flessione plastica delle pareti del tubo in direzione radiale tale da appiattire la canna. I dispositivi che utilizzano una trafilatura godono di una percentuale maggiore di energia assorbita attraverso attriti e per questi motivi sono stati preferiti all'altra tipologia.

Per la validazione degli assorbitori di energia installati sul sedile considerato, si è provveduto ad ottenere la curva caratteristica forza vs spostamento per via sperimentale. Questa è stata poi



Figure 9: Prova sperimentale per la caratterizzazione dell'assorbitore

approssimata con un comportamento elasto-plastico fino al raggiungimento della corsa massima (pari a 145 mm).

Per modellare il fine corsa si è introdotto un tratto fittizio nella legge costitutiva del dispositivo tale da riprodurre un ripido incremento della forza (con un picco a 100000 N), al fine di riprodurre un contatto caratterizzato da una rigidità molto elevata.

Il sedile aeronautico studiato è dotato di due assorbitori di energia posizionati in parallelo, in modo da sommare i contributi dei singoli dispositivi.



## 2.2 Modello delle cinture di sicurezza del sedile

Le cinture di sicurezza sono un elemento importante nella sicurezza degli aeromobili in condizioni di impatto con significative accelerazioni longitudinali. Tuttavia, se non adeguatamente progettate, possono aggiungere il rischio di gravi carichi di compressione sul petto, accelerazioni degli organi interni e deformazioni della colonna vertebrale. Ad oggi l'efficacia di un sistema di ritenuta di un aereo è valutata con prove sperimentali dinamiche sul sedile e sul sistema di ritenuta con manichino antropomorfo, secondo le norme specifiche che dipendono dalla categoria di aeromobile. Alcuni di questi principi richiedono che la misura dei carichi introdotti dalla cintura di sicurezza sia inferiore ad un certo limite, considerato pregiudizievole. Questo è il caso dei sistemi di ritenuta generalmente usati in aviazione.

Nel modello numerico realizzato sono state introdotte cinture di sicurezza a quattro giunti usando elementi monodimensionali fissi su ATD e cabina. La posizione degli attacchi è stata scelta per non interferire con gli spostamenti verticali e laterali del manichino antropomorfo.

La legge costitutiva associata a questi elementi è stata modellata attraverso l'utilizzo di una TFUN dotata di un pre-carico in grado di generare la tensione del dispositivo di ritenuta.

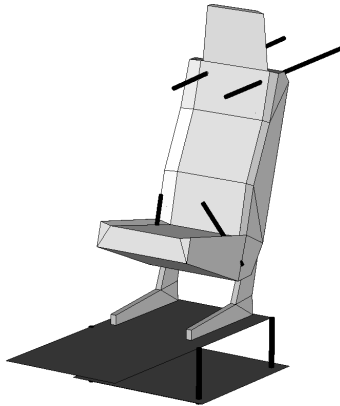


Figure 10: Particolare del modello di sedile Martin Baker

Le caratteristiche del materiale sono state determinate a partire dai risultati ottenuti da una campagna sperimentale condotta dalla Delft University of Technology nel 2002, per la caratterizzazione delle cinture di sicurezza per sedili aeronautici [14].

## 2.3 Il sotto pavimento

Il sotto pavimento di un elicottero è generalmente disegnato sulla base delle normali richieste operative che il mezzo incontra nella sua prevista vita operativa. La struttura consiste in travi longitudinali e trasversali in grado di sostenere i carichi esercitati sul pavimento della cabina. La struttura di travi è anche usata come supporto per la pelle della fusoliera dell'elicottero.

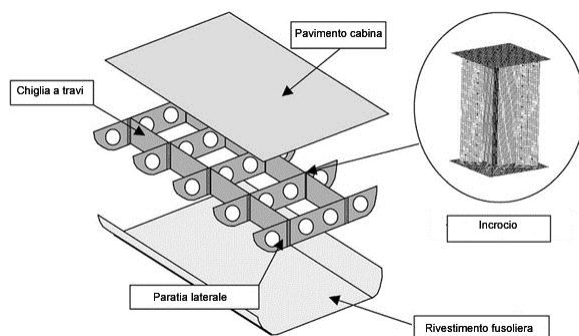


Figure 11: Elementi costitutivi di un sotto pavimento elicotteristico

Gli elementi di intersezione tra le travi longitudinali e trasversali, interposti tra la pelle esterna ed il pavimento della cabina, possono essere sfruttati come elementi assorbitori nel caso di impatti con un'elevata componente di velocità verticale. Questi elementi devono essere progettati in maniera oculata perché possono rappresentare punti ad alta robustezza; questa evenienza potrebbe causare la trasmissione di alti carichi e prevenire il collasso delle rimanenti parti della struttura durante il processo di assorbimento dell'energia dell'impatto.

Al fine di assorbire energia, il sotto pavimento è disegnato in modo tale da subire un collasso controllato quando soggetto a carichi assiali. Così facendo è possibile ottenere un sistema in grado di dissipare l'energia dell'impatto verticale ad un livello controllato di forza.



Figure 12: Sotto pavimento prima e dopo l'impatto

Gli elementi di intersezione possono essere in carbonio ed in metallo e possono essere confrontati a partire dalla curva caratteristica forza vs spostamento. In particolare si nota che a parità di rigidità assiale, entrambi gli assorbitori presentano un picco iniziale nella forza seguita da una rapida decrescita del carico. Il meccanismo di collasso delle due soluzioni tecnologiche è differente:

nel caso metallico si ha infatti la formazione di cerniere plastiche mentre per il composito si ha una rottura fragile del materiale. Nonostante ciò il risultato finale è comparabile. La possibilità di esplorare queste differenze ha condotto ad uno studio massiccio delle possibili geometrie di questi sistemi, il che ha reso possibile un'ottimizzazione di questi elementi strutturali.

### 2.3.1 Le intersezioni del sotto pavimento

Nella struttura tipica di un elicottero gli elementi di intersezione, connettendo le travi longitudinali e trasversali possono essere visti come assorbitori concentrati. Queste tipologie di elementi sono progettati per garantire una modalità di collasso stabile ed un alto rapporto tra i valori di forza media e forza massima.

Una caratteristica intersezione è costituita da quattro elementi ad angolo che creano una sezione quadrata chiusa. Il collasso di un tipico elemento di intersezione metallico presenta una curva forza-spostamento con un picco iniziale seguito da oscillazioni minori della forza attorno ad un valore costante.

Nei tipici sotto pavimenti in lega leggera di alluminio, le reti di assorbitori sono spesso realizzate creando piccole scatole chiuse posizionate in punti strategici lungo le travi longitudinali. Questo design garantisce stabilità ed alta efficienza nelle modalità di crash.

Il modello numerico del sotto pavimento è stato realizzato considerando due elementi di contatto piani costituenti il pavimento della cabina e la pelle esterna dell'elicottero. In corrispondenza degli incroci sono state introdotte delle travi con leggi costitutive adeguate a rappresentare efficacemente il comportamento delle intersezioni reali, in maniera del tutto simile a quanto fatto per il dispositivo di assorbimento posto nel sedile.

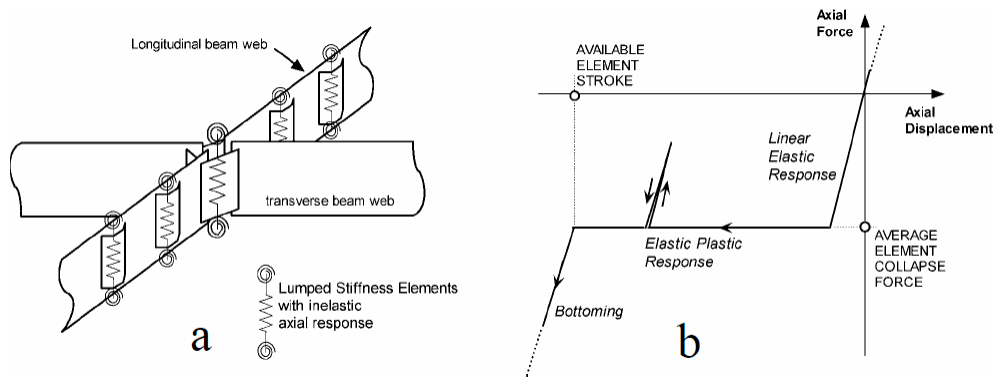


Figure 13: Modello numerico di sotto pavimento

La curva reale forza- spostamento degli elementi di intersezione è stata ottenuta da prove sperimentali condotte nei laboratori dipartimentali LAST. Di seguito si riportano alcune immagini riguardanti tali test [21;22].

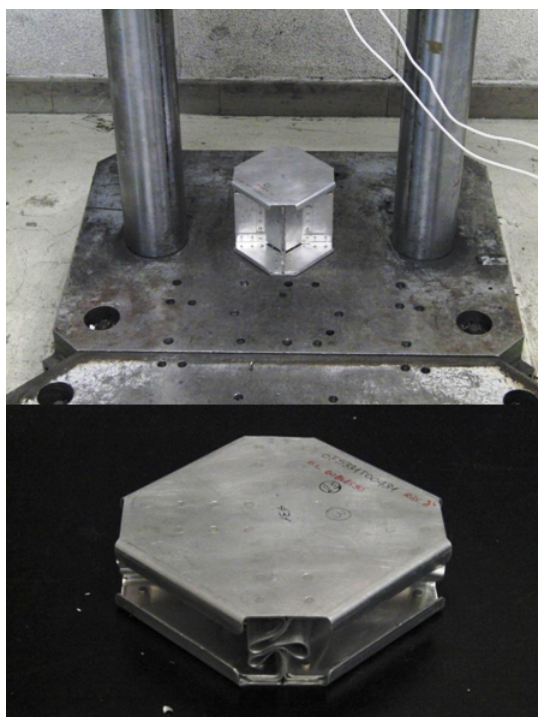


Figure 14: Assorbitore del sotto pavimento prima e dopo la prova

## 2.4 Il modello di manichino antropomorfo

I manichini antropomorfi (o ATD) sono surrogati meccanici di un corpo umano usati nelle campagne di test sperimentali per valutare la protezione degli occupanti, testando diversi sistemi di sicurezza passiva e garantendo al contempo i requisiti di ripetibilità.

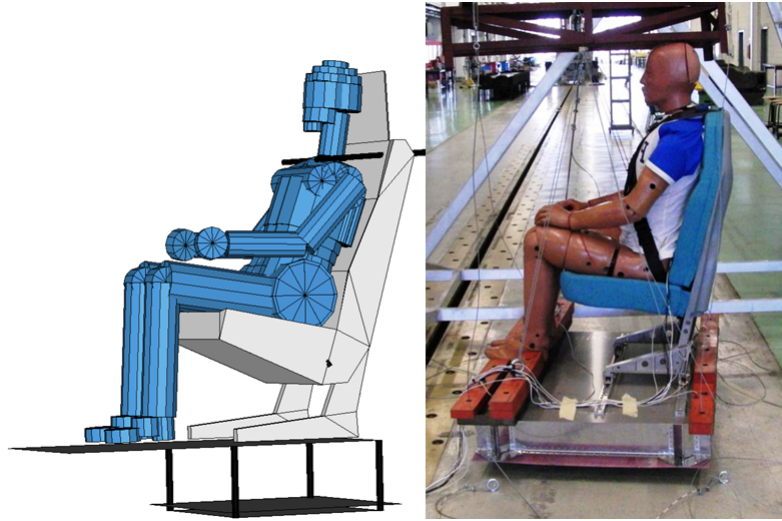


Figure 15: Modello numerico di ATD ed ATD reale

Gli ATD sono progettati per riprodurre le caratteristiche fisiche umane come le dimensioni, la forma, la distribuzione delle masse, la rigidità, l'assorbimento e la dissipazione di energia. Esistono differenti tipologie di ATD che servono per riprodurre differenti categorie di esseri umani di diversa età e sesso. Durante le campagne sperimentali i manichini antropomorfi possono essere dotati di strumenti (accelerometri ed estensimetri soprattutto) in modo tale da registrare i carichi, gli spostamenti e le accelerazioni subite dai differenti segmenti del corpo durante l'impatto.

I primi ATD sono stati introdotti nel 1949 e da allora un certo numero di modelli è stato progettato al fine di incontrare le differenti richieste dedicate per applicazioni specifiche (impatti laterali, impatti frontali, pedoni) in differenti campi (automobilistico ed aeronautico).

Nelle applicazioni aeronautiche moderne si adottano generalmente manichini della generazione HYBRID II 50th percentile. Ai giorni nostri sono disponibili diversi modelli FEM e multibody di ATD nei codici commerciali usati per le analisi numeriche. Il modello di manichino usato in questo lavoro di ricerca è stato sviluppato e validato nell'ambito di un precedente lavoro di tesi al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano [15;16;17;18].

La deformabilità locale delle singole parti del manichino è fondamentale durante i contatti ed influenza in maniera consistente i carichi misurati e gli altri indicatori della severità dell'impatto. Per questo motivo è importante rappresentare correttamente la realtà del manichino nelle sue singole parti, andando ad analizzare la sua struttura interna. Lo scheletro di un ATD usato nei

test sperimentali è composto principalmente da parti metalliche (acciaio, leghe leggere di alluminio e bronzo) mentre le parti molli da una schiuma di poliuretano. La spina è costituita da parti metalliche e gomma, mentre la pelle esterna è riprodotta con uno strato di materiale vinilico.

I segmenti del modello numerico sono stati modellati usando corpi rigidi, dati gli scenari di impatto considerati in questo lavoro. Le proprietà inerziali delle differenti sottoparti del manichino sono state definite in modo tale da riprodurre correttamente le caratteristiche dei segmenti dell'Hybrid II. Le proprietà di massa e di inerzia di tutti i corpi rigidi sono state attribuite a specifici punti di riferimento (generalmente il centro di gravità della singola parte).

#### **2.4.1 Le connessioni tra i differenti segmenti dell'ATD**

Gli elementi di connessione usati per modellare le articolazioni, sono stati implementati definendo equazioni di vincolo tra i gradi di libertà delle diverse parti. Questi elementi consentono l'imposizione di vincoli cinematici in modo da rappresentare il moto relativo tra i diversi componenti. Tali elementi possono essere usati anche per definire relazioni generalizzate tra forza e spostamento (o velocità) in modo da poter considerare attriti, arresti e rotture che fisicamente intervengono nei movimenti relativi tra le varie parti del corpo.

Oltre a ciò, gli elementi di contatto sono stati usati per introdurre adeguate rigidità tra i segmenti. Di fatto, come accade per i manichini antropomorfi sperimentali, l'attivazione muscolare non è stata considerata ed il comportamento passivo della muscolatura è stato riprodotto per mezzo di resistenze torsionali.

#### **2.4.2 Le interazioni tra le diverse parti dell'ATD**

Il posizionamento del modello dell'ATD rispetto al sedile è realmente importante e può influenzare significativamente i risultati numerici. Per questo motivo il modello è stato posizionato in modo da attivare gli algoritmi di contatto tra manichino e sedile già all'inizio dell'analisi.

I contatti sono stati definiti tra le differenti superfici dell'ATD ed il sedile usando relazioni propriamente definite tra la pressione di contatto e lo schiacciamento. Diverse leggi di contatto sono state poi introdotte per modellare il contatto tra le diverse sottoparti di cui è composto il manichino. È stata introdotta anche un'interazione di contatto tra i piedi e la base.

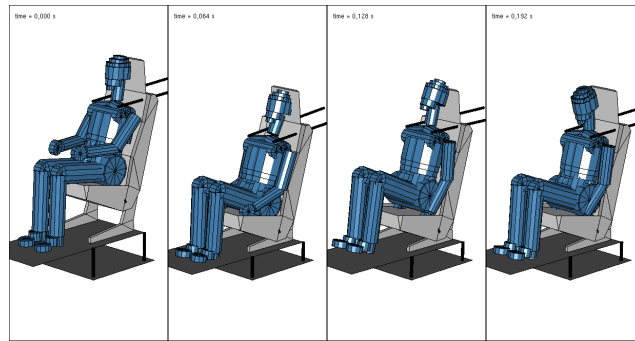


Figure 16: Sequenza di impatto

## 3 Validazione del modello

Questo capitolo tratta la validazione del modello fisico ricreato e precedentemente descritto. A tale scopo vengono confrontati i risultati numerici con i dati sperimentali ottenuti da tre diverse prove di crash.

### 3.1 I casi di riferimento

Il modello fisico creato è stato validato attraverso il confronto dei risultati appartenenti a tre diverse prove sperimentali.

Tali validazioni sono state condotte comparando l'andamento nel tempo del carico lombare dell'ATD e la corsa dei vari dispositivi dedicati all'assorbimento dell'energia di impatto presenti nei vari casi test.

Il primo caso di validazione riguarda una prova sperimentale condotta presso il LaST del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano in collaborazione con Agusta Westland che ha indagato il risultato dell'interazione tra sedile aeronautico e sotto-pavimento crashworthy.

Gli altri due casi test a cui ci si è riferiti in questo lavoro di tesi risultano invece coinvolti nei progetti europei HeliSafe e HeliSafe TA, che sono stati portati avanti dal 2000 al 2007. Questi progetti hanno avuto come obiettivo quello di migliorare la sopravvivenza degli occupanti sia nell'abitacolo che nella cabina di comando di un elicottero, in caso di impatto. La ricerca si è concentrata, in particolare, su diversi argomenti come la progettazione della cellula e dei sedili, l'adozione di airbag e il sistema di ritenuta (cinture di sicurezza). I test di crash sono stati realizzati su una struttura prototipo di un elicottero, al fine di convalidare uno strumento di simulazione e il sistema di sicurezza sviluppato.

### 3.2 Il primo caso di validazione

Il primo caso a cui si riferisce questo capitolo riguarda una prova in configurazione verticale in cui si è sfruttata l'accelerazione gravitazionale per raggiungere la velocità di impatto prefissata pari ad 8 m/s.

Il componente provato è costituito da una porzione tipica del sottopavimento, formato da un parallelepipedo di dimensioni 970x830x160 [mm] dotato di quattro incroci, cinque guide di aggancio, il sedile elicotteristico e un ATD Hybrid II con spina dorsale dritta, tenuto fermo dalla cintura a quattro punti del sedile.





Figure 17: Primo caso di validazione

Per simulare la presenza dei carichi strutturali provenienti dalle parti non presenti dell'elicottero è stata studiata una configurazione bilanciata da 164 Kg di masse aggiuntive. La configurazione finale vedeva tre masse da 12 kg posizionate posteriormente al sedile e un totale di 128 kg frontali, collegate tramite perni alle guide di aggancio.

### **3.2.1 Modellazione degli assorbitori del sedile e del sottopavimento**

Riguardo all'esperimento sono date, oltre alle caratteristiche geometriche e di massa delle varie componenti, anche le leggi costitutive dell'assorbitore del sedile e degli incroci del sotto pavimento. Questi ultimi dati sono stati ricavati attraverso prove su macchinari a massa battente ubicati nei laboratori LAST.

Di seguito vengono riportate le curve sperimentali e numeriche relative ai due assorbitori modellati.

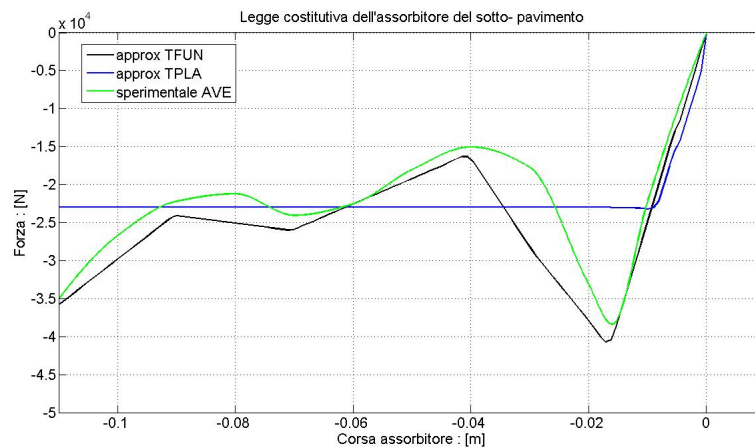


Figure 19: Legge di carico dell'assorbitore del pavimento con diverse approssimazioni

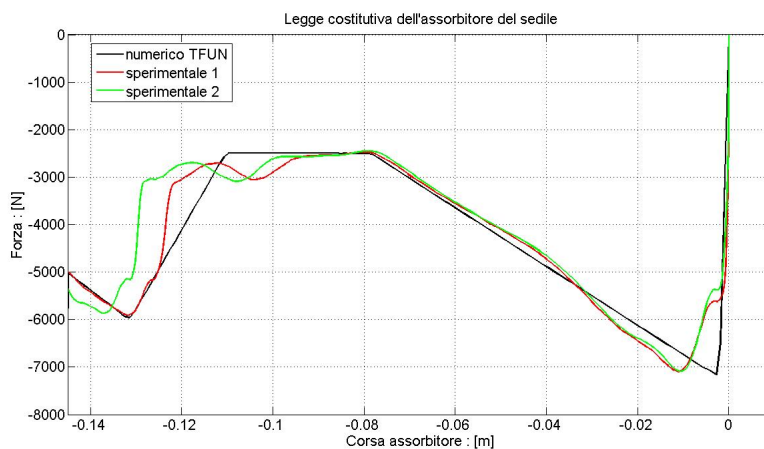


Figure 18: Curva di carico dell'assorbitore del sedile

Per la modellazione di queste curve si è proceduto per step, migliorando di volta in volta la qualità dell'approssimazione e misurando la variazione dei risultati ottenuti. Alla fine, per entrambi i dispositivi, si è deciso di introdurre una legge non lineare attraverso il comando TFUN.

Si fa notare inoltre che le curve sperimentali riportate nei grafici sono state filtrate con filtro numerico CFC 180, in accordo con la specifica SAE J211, che propone raccomandazioni sull'applicazione dei filtri in materia di prove di crash.

### 3.2.2 I risultati

Le misurazioni conseguite da tale prova consentono di confrontare lo schiacciamento del sottopavimento e l'andamento nel tempo del carico lombare subito dall'ATD.

Di seguito sono riportati i dati riguardanti lo schiacciamento del sotto- pavimento.

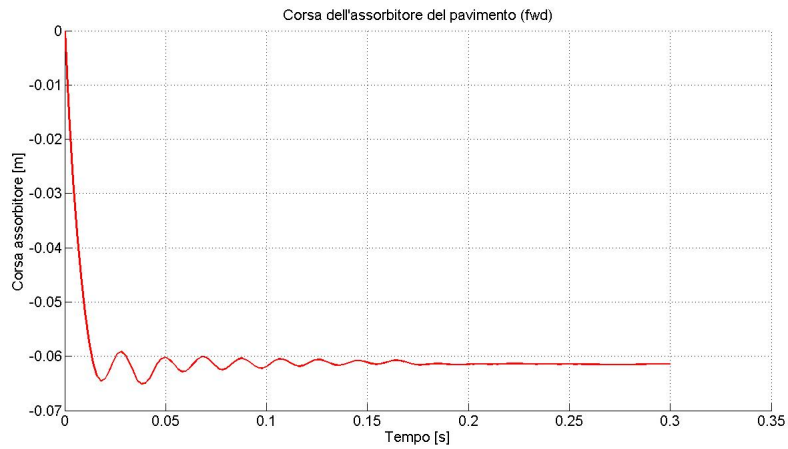


Figure 20: Schiacciamento dell'assorbitore del sotto- pavimento (fwd)

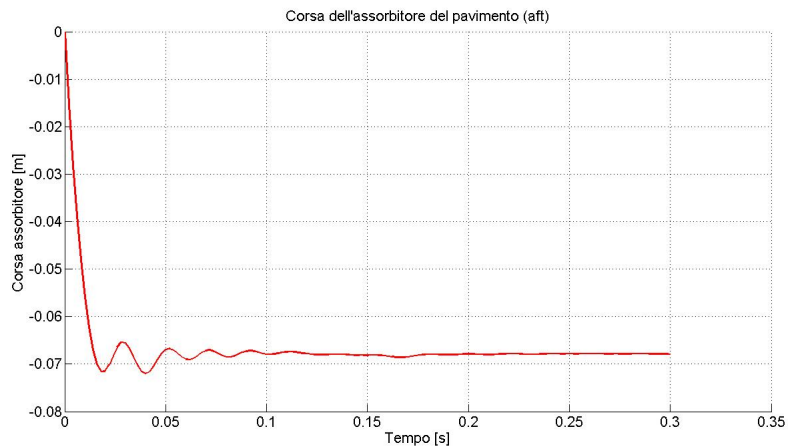


Figure 21: Schiacciamento dell'assorbitore del sotto- pavimento (aft)

Schiacciamento incrocio (aft)	Schiacciamento incrocio (fwd)
40 mm	20 mm

Table 3: Dati sperimentali

Risulta importante sottolineare che le condizioni dinamiche prima descritte hanno indotto il fenomeno del fine corsa nell'assorbitore del sedile, causando il picco del carico trasmesso al manichino, come si nota nella figura sottostante.

Infatti, per quanto riguarda il carico lombare, il confronto risulta coerente fino al raggiungimento della corsa massima disponibile dell'assorbitore. Dopo tale punto la forza risulta sovrastimata a causa della complessità della modellazione del fondocorsa del sedile.

Nonostante ciò questa discrepanza non risulta significativa in quanto lo sfruttamento di tutta la corsa disponibile dell'assorbitore del sedile deve sempre essere evitato, per evitare improvvisi aumenti delle accelerazioni e dei carichi trasmessi all'occupante.

Il massimo carico lombare sostenibile è superato sia nel test che nell'analisi numerica.

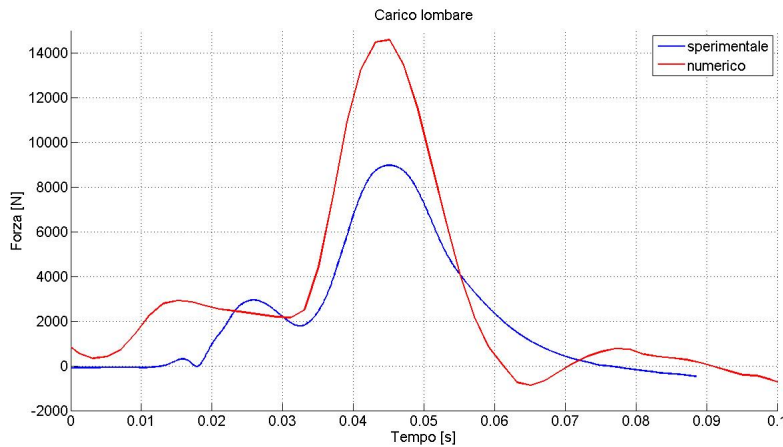


Figure 22: Carico lombare nel manichino ATD

Come riportato dalle figure e dalle tabelle riportate, sussiste una buona convergenza dei dati riguardanti lo schiacciamento del sotto pavimento e l'andamento del carico lombare.

Per questi motivi si ritiene che l'analisi numerica modelli correttamente il fenomeno fisico precedentemente descritto.

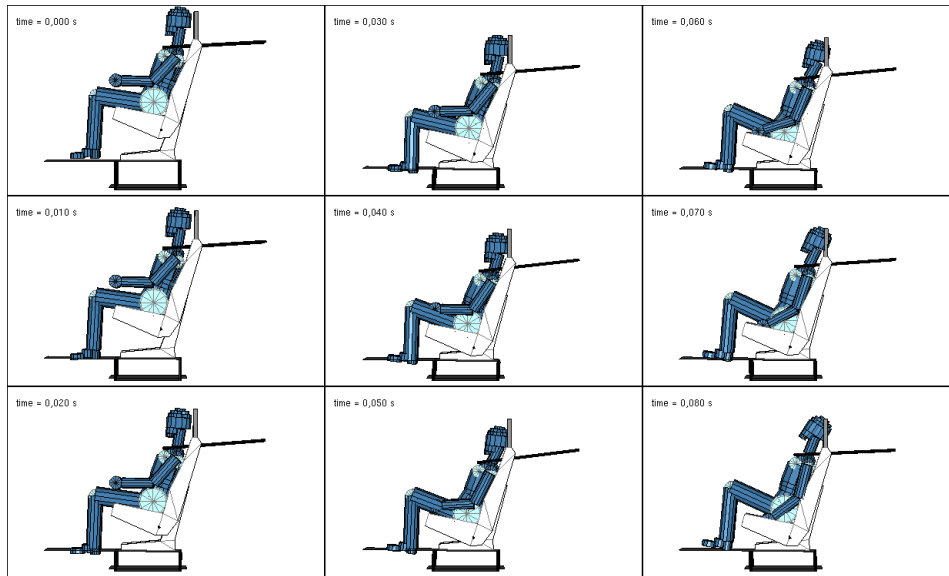


Figure 23: Dinamica dell'impatto

### 3.3 Il secondo caso di validazione

Questo test riguarda la certificazione del sedile dell'AB139 Agusta Westland condotto dall'ente MGA Research.

I sedili dell'AB139 sono costituiti da profilati di alluminio lavorati che supportano una seduta ed una piastra lavorata per lo schienale.

Un sistema di assorbimento dell'energia, di cui è nota la curva caratteristica, è fissato lungo le travi di sostegno.

Il sedile del passeggero è dotato di una cintura di sicurezza a quattro punti.

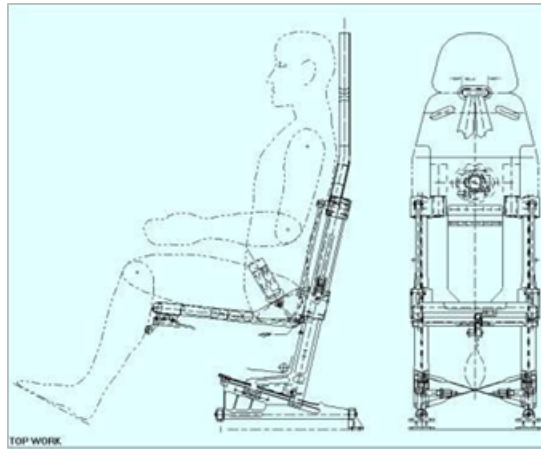


Figure 24: Posizionamento del manichino antropomorfo

Questa tipologia di prova vuole determinare le prestazioni del sedile e delle cinture di sicurezza in una condizione in cui la componente predominante del carico di impatto è diretta lungo la colonna vertebrale dell'ATD ma che comprende anche una componente longitudinale del carico.

Per rendersi conto del posizionamento del manichino antropomorfo si faccia riferimento alla figura sottostante.

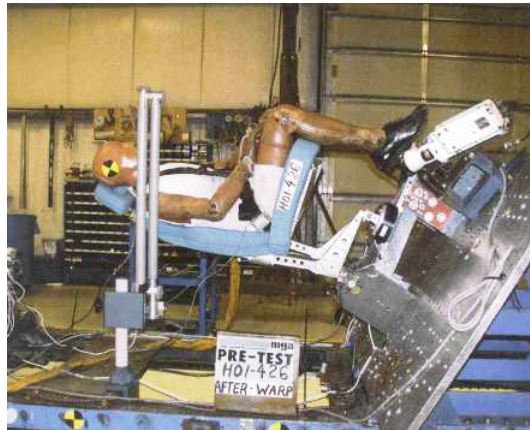


Figure 25: Setup della prova

Come imposto da normativa, il complesso è stato accelerato lungo una slitta orizzontale seguendo un profilo di accelerazione triangolare con picco a 30 g, di cui viene riportato il grafico (figura 26).

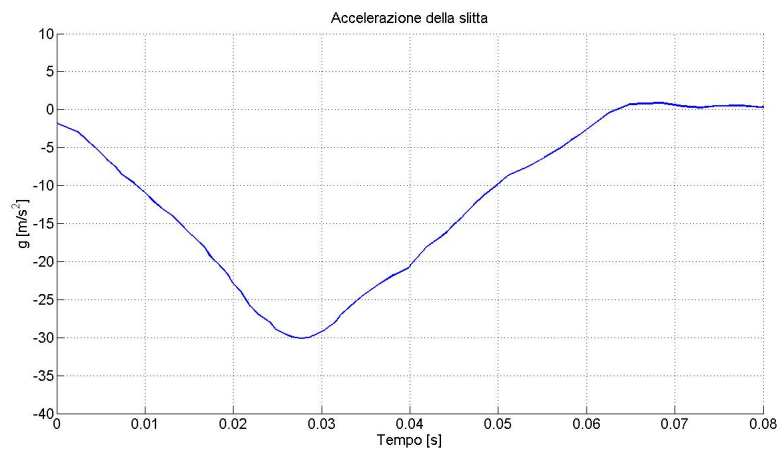


Figure 26: Accelerazione della slitta

Come nel primo caso di validazione, è dato l'andamento del carico lombare; attraverso questa curva è possibile affrontare il confronto tra misurazioni sperimentali e numeriche.

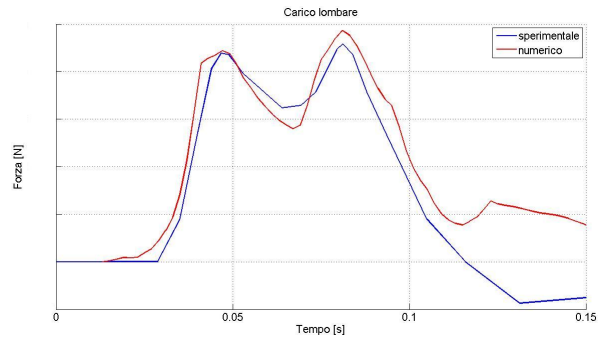


Figure 27: Carico lombare

Anche in questo caso è possibile attestare la validità del modello numerico. Come si può notare, nella figura 27 mancano i valori del carico lombare; questo accorgimento è stato preso in base alla considerazione che il rapporto, a cui si fa riferimento in questo paragrafo, risulta essere riservato e non divulgabile.

Viene di seguito mostrata una sequenza di immagini che descrivono la dinamica dell'esperimento numerico.

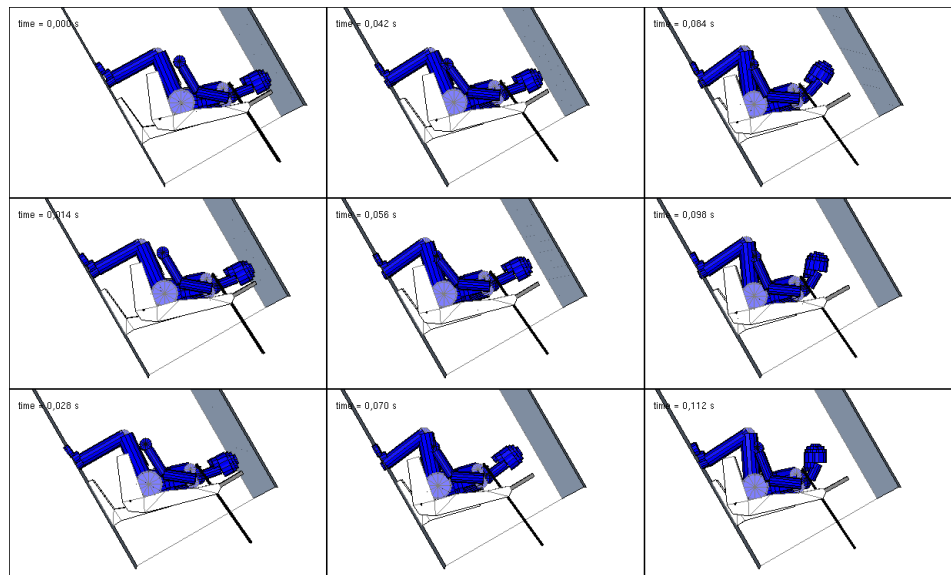


Figure 28: Dinamica dell'impatto



### 3.4 Il terzo caso di validazione

Come accennato nel paragrafo introduttivo di questo capitolo, l'ultimo caso di validazione riguarda una prova di decelerazione imposta di un sedile aeronautico all'interno del programma europeo HeliSafe.

Come previsto dalla normativa vigente, in tale prova l'asse longitudinale del sedile deve formare con l'asse orizzontale un angolo di  $60^\circ$ . Tuttavia il picco massimo di decelerazione imposto ha raggiunto un minimo 27 g anziché di 30 g.

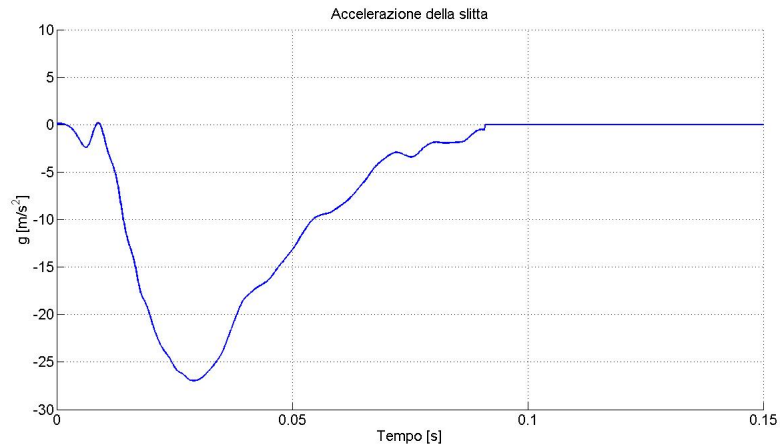


Figure 29: Accelerazione della slitta

Come nel primo caso, anche qui è possibile confrontare sia l'andamento del carico lombare che lo schiacciamento dell'assorbitore del sedile. Di seguito viene riportato il confronto tra risultati numerici e dati sperimentali, i quali sono stati filtrati con filtro CFC 180.

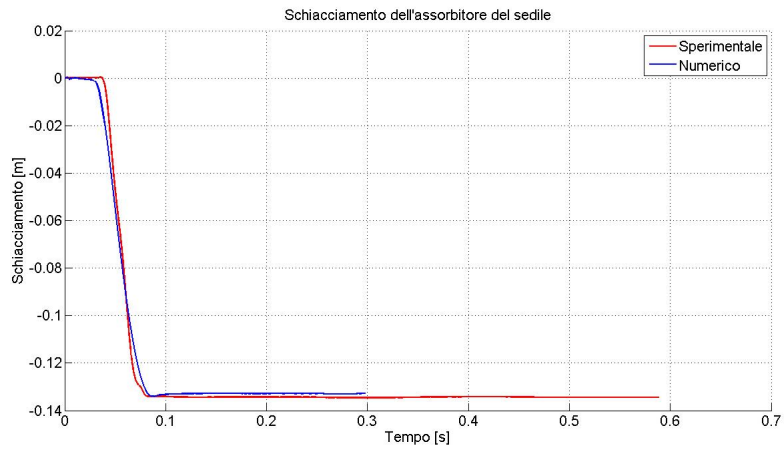


Figure 30: Schiacciamento dell'assorbitore del sedile

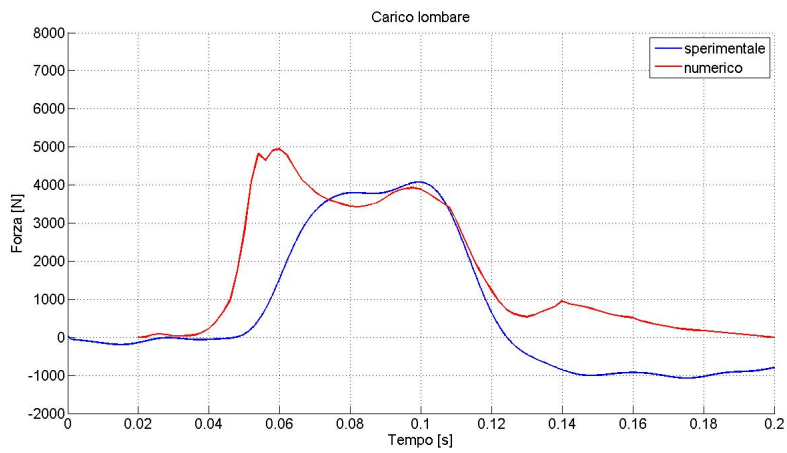


Figure 31: Carico lomabare

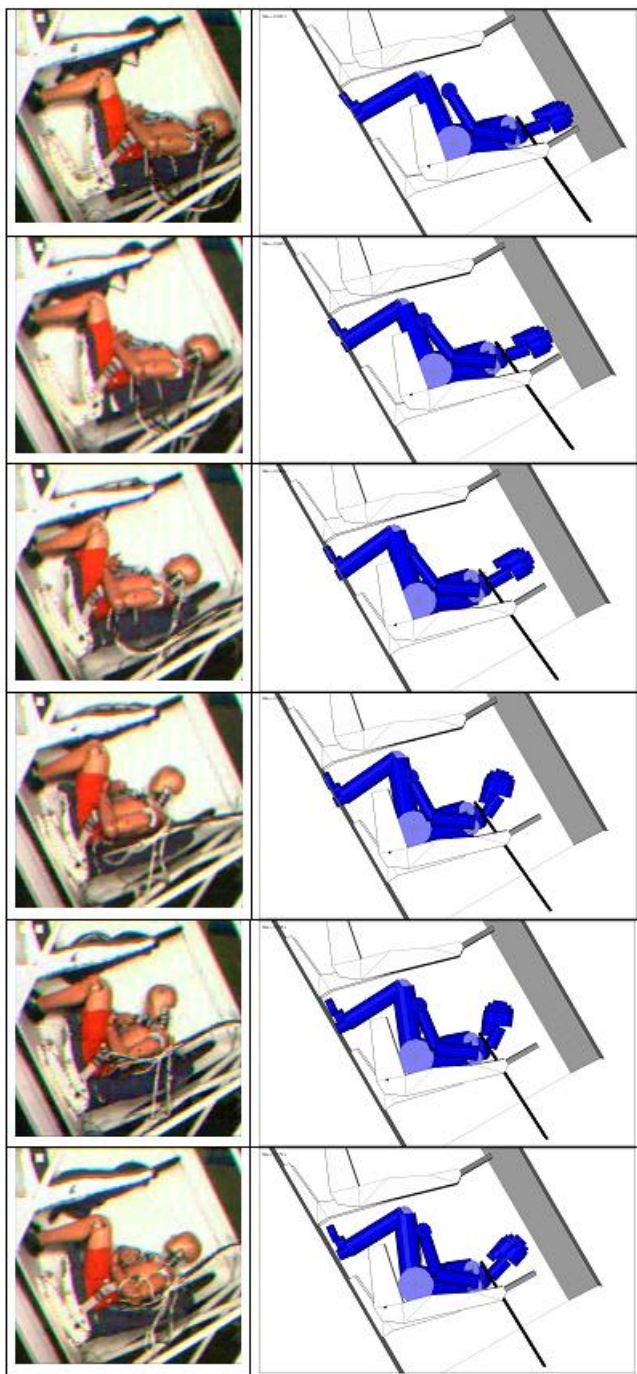


Figure 32: Dinamica dell'impatto

### 3.5 Conclusioni riguardo ai casi di validazione

Il modello rappresenta a tutti gli effetti una configurazione realistica di un impatto; infatti gli assorbitori all'interno del modello permettono di ricreare condizioni di sicurezza passiva verosimili.

Chiaramente i risultati ottenuti sono relativi alla più semplice condizione di impatto, quella verticale, che permette di analizzare i comportamenti di tutti gli assorbitori che lavorano in maniera analoga.

Come si denota dai grafici precedentemente elaborati, gli assorbitori sono sollecitati da forze che rispecchiano abbastanza fedelmente i carichi reali e ciò permette di affermare la fedeltà del modello numerico ricreato.

Particolare enfasi va posta anche sul ridotto tempo di calcolo richiesto. Infatti, nelle simulazioni dello stesso fenomeno, riportate in altri lavori di tesi [21;22], la complessità del modello e il piccolissimo timestep caratteristico delle soluzioni esplicite erano causa di tempi di calcolo estremamente lunghi anche per processori moderni.

Al contrario, le simulazioni precedentemente riportate, eseguite con processore Pentium® Dual-Core CPU T4200 da 2.00 GHz, hanno richiesto in media tempi di calcolo inferiori al minuto.

Questa riduzione risulta essere un obiettivo esplicito di questa tesi. L'importanza di questo argomento è legata soprattutto alla necessità di realizzare un'analisi di sensitività per l'ottimizzazione del progetto strutturale.

## 4 Studio di sensibilità e ottimizzazione

Questo capitolo risulta essere una prima applicazione del modello numerico precedentemente validato. L'obiettivo finale è quello di ottimizzare le caratteristiche meccaniche dei dispositivi di assorbimento di energia al fine di minimizzare i valori di forza trasmessi alla spina dorsale del manichino.

Come si dimostrerà nel seguito i risultati di questi studi di sensibilità consentono di rendere sopravvivibili alcune condizioni di impatto che ad oggi, sono considerate fatali.

### 4.1 Il modello

Come mostrato nei capitoli precedenti, il modello numerico ricreato riguarda una prova in configurazione puramente verticale in cui si è imposta una velocità di impatto pari a 10 m/s.

L'insieme è costituito da una porzione tipica del sottopavimento formato da un parallelepipedo di dimensioni 600x600x200 [mm] dotato di quattro incroci, ognuno dei quali è stato modellato con un elemento beam ed un elemento rod, posti in parallelo. La stessa curva di carico elastica perfettamente plastica è stata attribuita a tutti gli elementi di intersezione del tipo beam. La corsa disponibile di questo assorbitore di energia è di 195 mm, superato tale valore la risposta non lineare dell'elemento rod passa rapidamente da un valore nullo ad un valore elevato di forza per riprodurre il fenomeno del fine corsa del sotto pavimento.

Il sedile e il manichino antropomorfo sono stati posizionati in maniera centrale rispetto ai quattro elementi di intersezione. Il piede dell'ATD è stato messo in contatto con la parte anteriore della struttura del sotto pavimento.

Anche all'assorbitore di energia del sedile è stato attribuito un comportamento elastico perfettamente plastico ed una corsa pari a 145 mm.

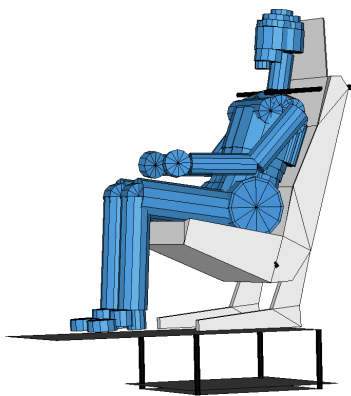


Figure 33: Modello numerico usato per le analisi di sensitività

## 4.2 Analisi di sensitività : le forze di attivazione degli assorbitori di energia

Le analisi di sensitività qui riportate sono state eseguite considerando come variabili le forze di attivazione di entrambi gli assorbitori di energia: quello del sedile e quello del sotto pavimento.

La forza del dispositivo di assorbimento del sedile è stata fatta variare da 5000 N a 15000 N mentre il range della forza delle intersezioni del sottopavimento parte da un valore minimo di 2000 N ad un valore massimo di 12000 N. Questi range sono stati ricavati da considerazioni fisiche ed osservando i tipici valori adottati nella modellazione di simili elementi. La forza di crash dell'intersezione di un sotto pavimento elicotteristico non può essere eccessivamente ridotta altrimenti il suo normale comportamento operativo ne sarebbe influenzato. Allo stesso modo, il medesimo livello di forza non dovrebbe essere eccessivamente incrementato al fine di evitare la concentrazione di carichi in pochi punti della struttura.

È stata realizzata una griglia regolare di 7x7 punti di calcolo, considerando uno step di 1000 N per far variare i parametri di forza nel loro range dal valore minimo al valore massimo. Ciò è stato permesso dalla procedura Full Factorial Allocation grazie alla quale è stato possibile allocare le differenti valutazioni e realizzare automaticamente le analisi. Questa particolare procedura genera una griglia di punti all'interno del dominio di interesse. Il numero di punti considerati cresce esponenzialmente rispetto alla dimensione del dominio di interesse e al numero di variabili.

Infine la fase di post-processing è stata automatizzata per rendere più facile l'estrazione delle informazioni desiderate, richiamando l'andamento temporale del carico lombare ed il suo valore massimo e lo schiacciamento dei dispositivi di assorbimento dell'energia (le intersezioni del sotto pavimento e l'assorbitore del sedile).

### 4.2.1 I risultati

Nella figura sottostante è possibile identificare la regione di sopravvibilità che individua quelle condizioni che permettono di rispettare i requisiti dettati dalla normativa in termini di carico lombare massimo pari a 6672 N.

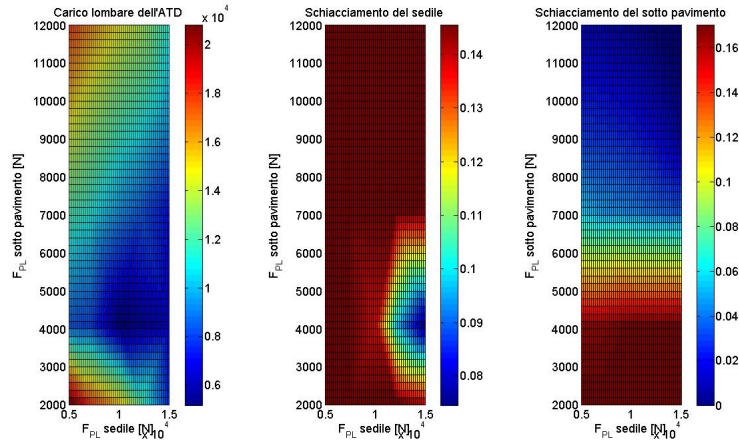


Figure 34: Analisi di sensitività

Considerando l'impatto prima descritto si nota che i valori più bassi del carico lombare si raggiungono in corrispondenza di valori ridotti della forza di attivazione dell'assorbitore del subfloor (intorno ai 5000 N), mentre i valori di forza del dispositivo del sedile che garantiscono la sopravvivenza sono tendenzialmente elevati (da 9000 N a 15000 N).

Per questa combinazione di valori, sia la corsa del sedile che quella delle intersezioni del sotto pavimento risultano vicine al raggiungimento del valore massimo disponibile.

Si noti come il crash completo degli elementi del sotto pavimento non risulti avere lo stesso effetto sulla storia temporale del carico lombare che causa il fenomeno del fine corsa dell'assorbitore del sedile. Infatti, come si nota dal grafico sopra riportato, il raggiungimento del fine corsa delle intersezioni del subfloor spesso non comporta un ripido incremento del carico trasmesso al manichino. È possibile giustificare questo comportamento considerando la mitigazione degli effetti dovuta alla presenza di uno stadio di assorbimento di energia addizionale rappresentato dal sedile e dal corpo stesso.

La figura sottostante è stata ricavata nelle stesse condizioni della Fig. 33 con l'accortezza di rendere invisibile il campo di valori che corrispondono al raggiungimento del fine corsa del dispositivo del sedile. Questo accorgimento permette di escludere a prescindere quelle soluzioni che sicuramente portano a valori di carico lombare decisamente superiori al limite previsto dalla normativa

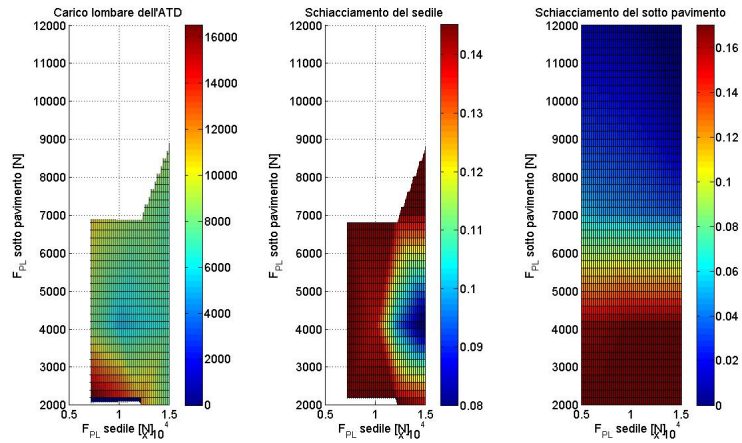


Figure 35: Analisi di sensitività senza le soluzioni che causano il fine corsa dell'assorbitore del sedile

In questi grafici è possibile notare come il valore massimo del carico lombare tenda a decrescere all'aumentare della somma dello schiacciamento degli assorbitori del sedile e del subfloor.

È possibile avere un focus migliore selezionando il solo diagramma del carico lombare. Nelle figure sottostanti è stata modificata la barra indicatrice dell'intensità del carico, associando al colore blu le zone di sopravvivenza.

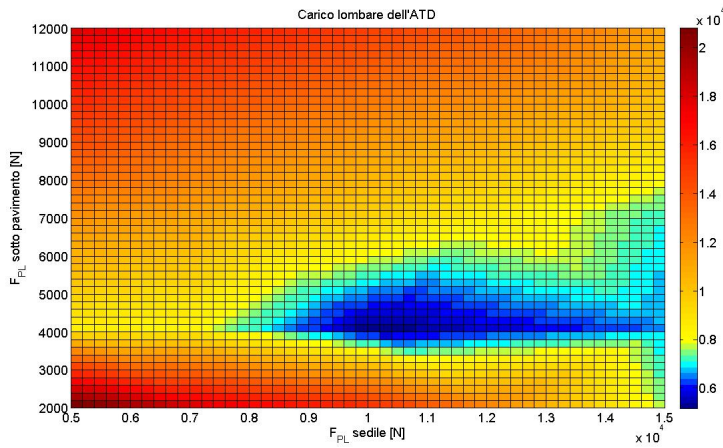


Figure 36: Superficie di risposta del carico lombare



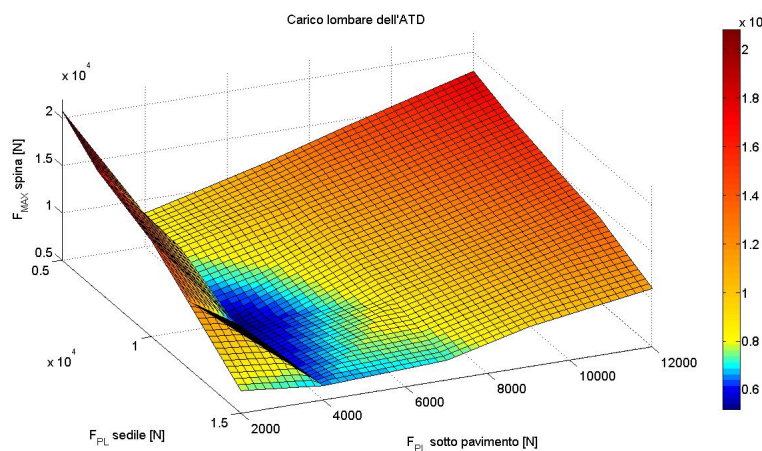


Figure 37: Diagramma 3D del carico lombare

### 4.3 Analisi di sensitività : la pendenza del tratto plastico

Le analisi qui presentate sono state eseguite considerando come variabili le forze di attivazione di entrambi gli assorbitori di energia e le rispettive rigidzze plastiche.

Di seguito si riporta lo schema di una legge di carico tipica del modello numerico di un assorbitore di energia.

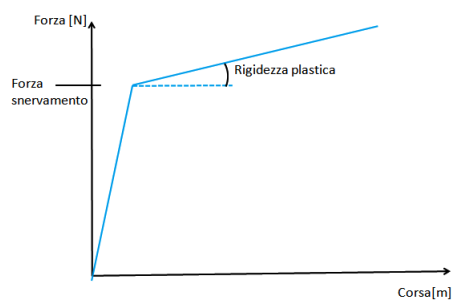


Figure 38: Esempio di legge di carico modellata

In tale grafico si evidenzia la presenza di due parametri principali: la forza di plasticizzazione (o forza di attivazione) e la pendenza del tratto plastico. Quest'ultimo parametro rappresenta il soggetto del presente paragrafo e l'obiettivo è quello di accertare quale ruolo possa avere nell'ambito della minimizzazione della trasmissione del carico al manichino.

Come nel paragrafo precedente, anche qui la forza di attivazione dell'assorbitore del sedile varia da un valore di 5000 N ad un massimo di 15000 N, mentre il range della forza delle intersezioni del sottopavimento parte da un valore minimo di 2000 N ad un valore massimo di 12000 N.

### 4.3.1 La pendenza del tratto plastico del dispositivo del sedile

Per indagare il ruolo della rigidità plastica dell'assorbitore del sedile nell'ambito della minimizzazione del carico lombare si è deciso di realizzare uno studio di sensitività, facendo variare questo terzo parametro da un valore minimo di  $-25000 \text{ N/m}$  fino ad un valore massimo di  $25000 \text{ N/m}$ . Questi limiti sono stati decisi al fine di rendere consistente l'aumento (o la riduzione) della forza opposta dall'assorbitore nel suo campo plastico, evitando problemi indesiderati. Infatti una variazione maggiore di questa variabile rischierebbe di rendere il sistema non conservativo (per valori più negativi) o il sedile troppo rigido (per valori più positivi).

Di seguito si riportano gli output più rilevanti in funzione delle forze di attivazione dei dispositivi di assorbimento, mentre il terzo parametro risulta fissato di volta in volta.

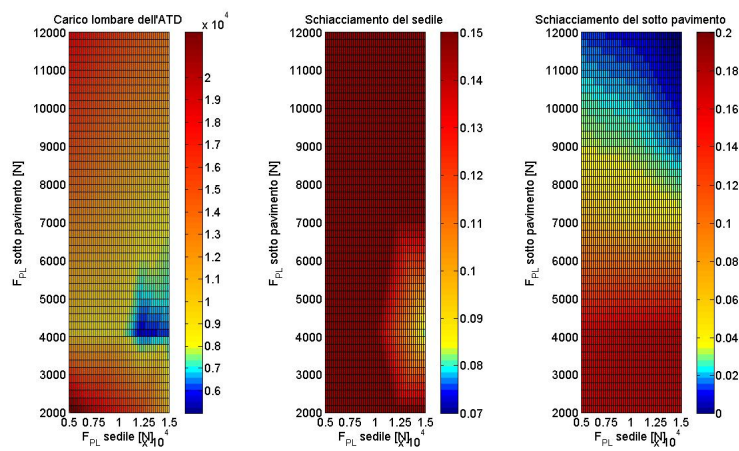


Figure 39: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{seat} = -25000 \text{ N/m}$

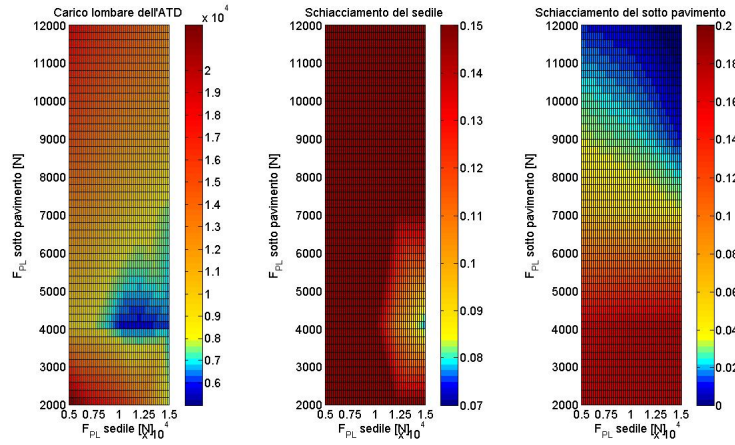


Figure 40: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{seat} = -10000\text{N/m}$

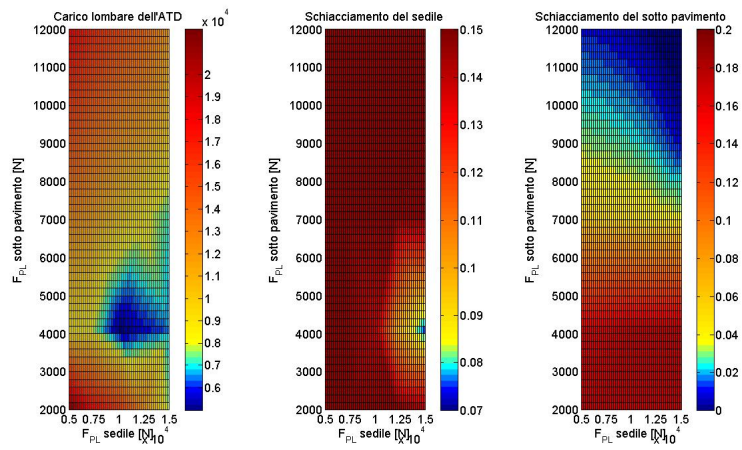


Figure 41: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{seat} = 0\text{N/m}$

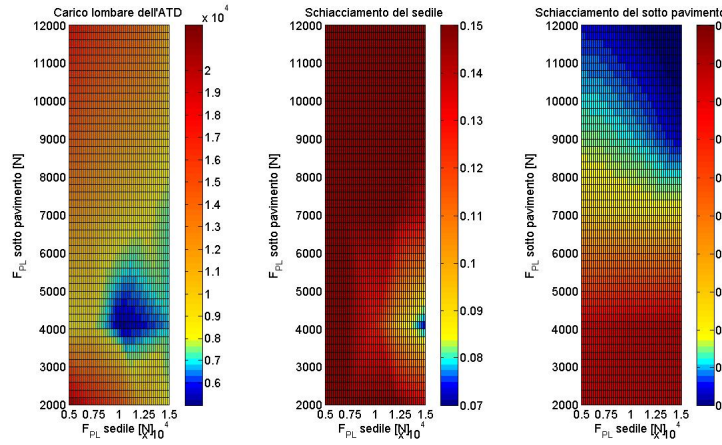


Figure 42: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{seat} = 10000\text{N/m}$

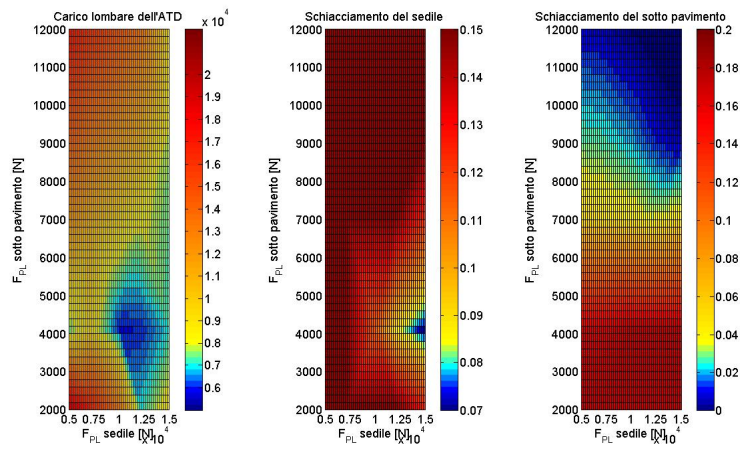


Figure 43: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{seat} = 25000\text{N/m}$

Per meglio interpretare le conseguenze della variazione della pendenza del tratto plastico del dispositivo del sedile è possibile focalizzarsi sul solo grafico del carico lombare.

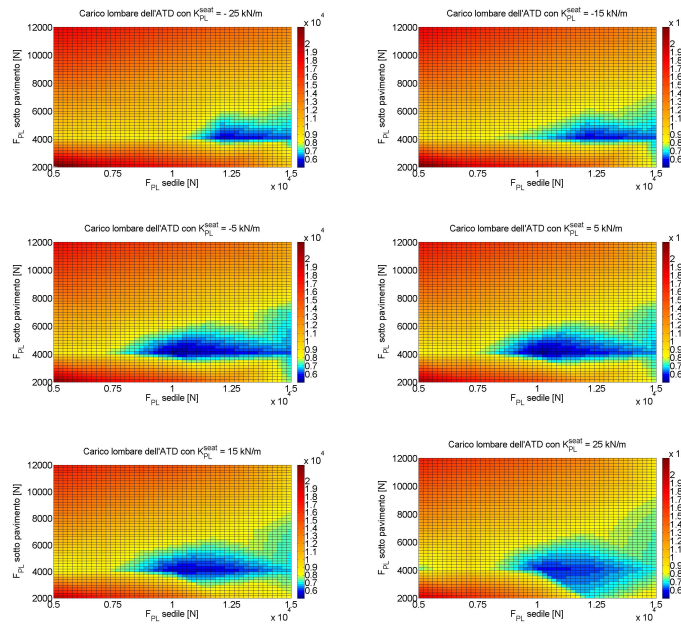


Figure 44: Sequenza di grafici del carico lombare al variare della  $K_{pl}^{seat}$

In questa sequenza di immagini il parametro KPL è stato fatto variare da -25000 N/m a 25000 N/m con uno step di 10000 N/m per ogni frame.

La prima considerazione derivante dalla combinazione di queste tre variabili riguarda la zona di sopravvivenza che appare più ampia all'aumentare della  $K_{pl}$  nel suo campo positivo. Questo effetto favorevole è tuttavia mitigato da un aumento medio del livello di carico lombare trasmesso. L'origine di tale fenomeno è da ricercarsi nell'effetto di irrigidimento del sedile causato da un valore positivo della pendenza del tratto plastico del relativo dispositivo di assorbimento. È noto, infatti, che un sedile più rigido previene il fenomeno del corsa, ma al contempo trasmette più efficacemente i carichi all'ATD.

Considerazioni analoghe possono essere tratte esaminando la corsa dei due assorbitori. In particolar modo è facile notare come l'irrigidimento del dispositivo del sedile, causato da valori positivi della terza variabile, si traduca in una riduzione del suo schiacciamento. Ciò riduce la capacità di assorbimento del sistema, la quale è però in parte recuperata dagli incroci del sotto pavimento che tendono quindi ad aumentare il proprio schiacciamento.

Alla luce di tali risultati, la condizione più auspicabile è quella di avere un assorbitore di energia del sedile caratterizzato da una legge di carico con  $K_{pl}$  positiva.

### 4.3.2 La pendenza del tratto plastico del dispositivo del sotto pavimento

A questo punto è interessante ricercare come la pendenza del tratto plastico dell'assorbitore del sotto pavimento possa influenzare la trasmissione del carico lombare. Questo parametro è stato fatto variare da un valore minimo di  $-10000$  N/m fino ad un valore massimo di  $30000$  N/m. Anche in questo caso i limiti del campo di variazione della variabile sono stati dettati dalla necessità di evitare problemi indesiderati. Infatti, valori inferiori rischierebbero di rendere il sistema non conservativo, mentre valori maggiori renderebbero il sotto pavimento troppo rigido.

Si riportano ora gli output in funzione delle forze di attivazione dei dispositivi di assorbimento, mentre il terzo parametro risulta fissato di volta in volta.

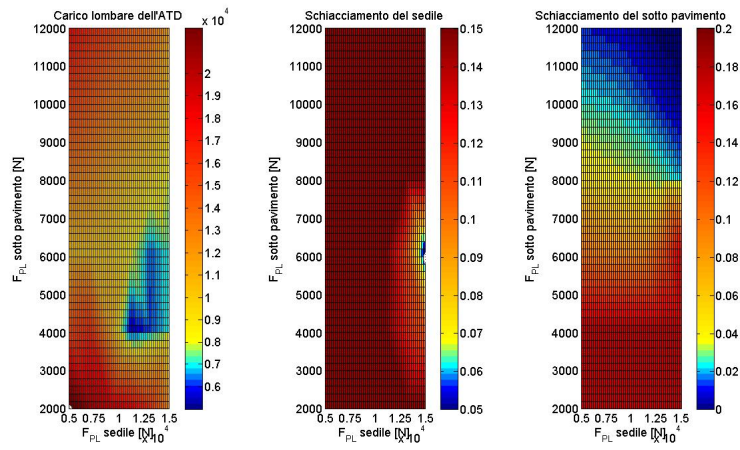


Figure 45: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{subf} = -10000$  N/m

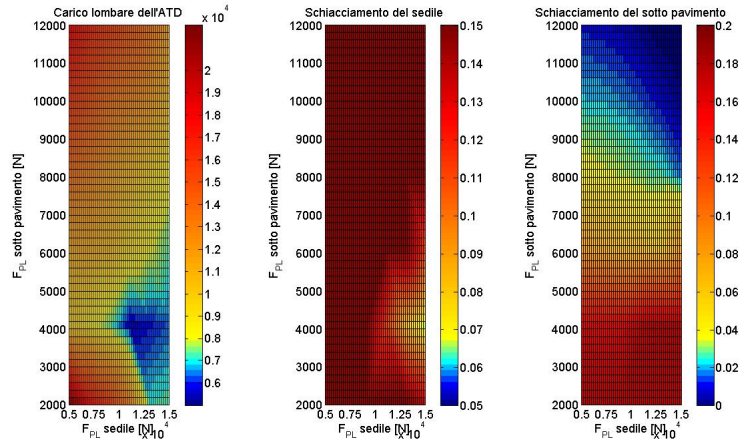


Figure 46: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{subf} = 4000\text{N/m}$

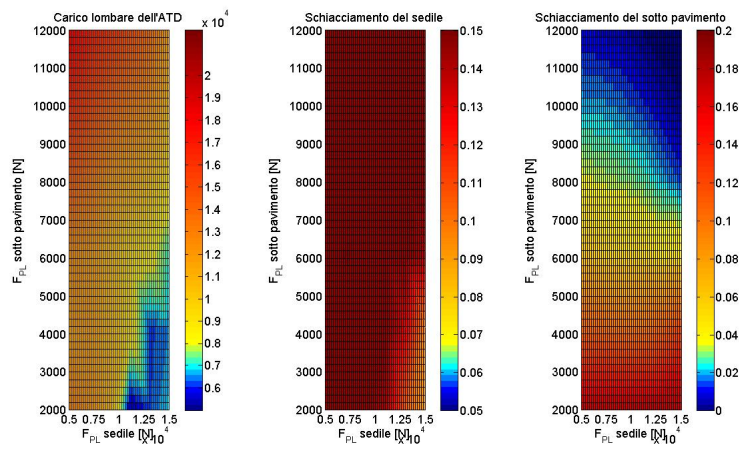


Figure 47: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{subf} = 17000\text{N/m}$

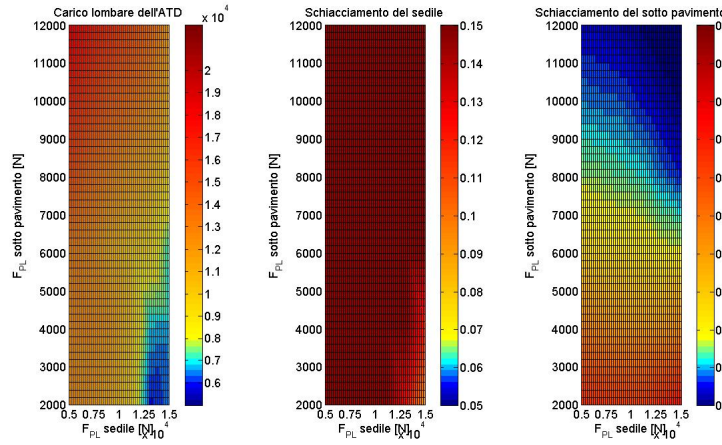


Figure 48: Analisi di sensitività con  $K_{pl}^{subf} = 30000\text{N/m}$

Per meglio interpretare le conseguenze della variazione della pendenza del tratto plastico del dispositivo del sotto pavimento è possibile focalizzarsi sul solo grafico del carico lombare. Nella sequenza di immagini che segue il parametro KPL è stato fatto variare da -10000 N/m a 30000 N/m con uno step di 7000 N/m per ogni frame.

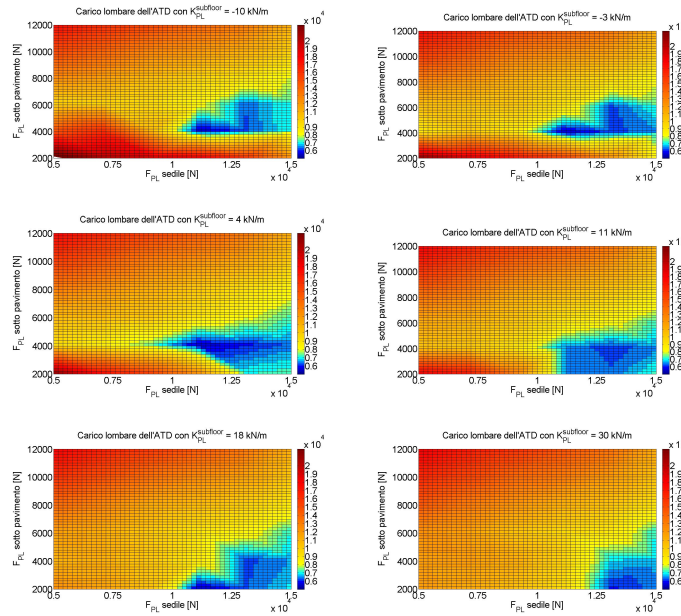


Figure 49: Sequenza di grafici del carico lombare al variare della  $K_{pl}^{subf}$

Analizzando questi grafici si evidenzia un cambiamento sostanziale rispetto al caso precedente.



Questa volta, infatti, l'adozione di valori positivi di  $K_{pl}$  comporta una riduzione della zona di sopravvivenza che tende a spostarsi verso valori più elevati di forza plastica del dispositivo del sedile.

Anche in questo caso, infatti, l'aumento della rigidità plastica si traduce in un irrigidimento degli incroci del sottopavimento, i quali trasmettono forze maggiori al sedile ed al manichino che così facendo, risulta soggetto a carichi lombari maggiori.

Quest'analisi è confermata anche dall'andamento dello schiacciamento dei due assorbitori di energia. Infatti, all'aumentare della  $K_{pl}$  si evidenzia una riduzione della corsa degli incroci del subfloor e contemporaneamente un aumento dello schiacciamento del dispositivo di assorbimento del sedile. Dopo tali considerazioni è possibile stabilire che la condizione più performante sia quella di un assorbitore di energia del sotto pavimento caratterizzato da una legge di carico con pendenza del tratto plastico negativa o al più nulla.

#### **4.3.3 La combinazione degli effetti dei due dispositivi**

Per arrivare alla definizione di valori ottimi risulta necessario indagare la combinazione degli effetti delle  $K_{pl}$  dei due assorbitori sull'andamento del carico lombare trasmesso all'ATD.

Per la definizione dei campi di valutazione delle due variabili sopra citate, si fa riferimento ai risultati ottenuti nei precedenti paragrafi. In particolar modo si considera una pendenza dell'assorbitore del sedile variabile da un minimo di 0 N/m ad un massimo di 20000 N/m, mentre per il secondo parametro si valuta un minimo di -10000 N/m ed un massimo di 0 N/m.

A differenza dei casi precedenti, si fissa il valore della forza plastica del dispositivo del sedile a 12000 N, mentre la forza di attivazione degli incroci del sotto pavimento è stabilita a 4000 N. La scelta di questi valori è stata decisa al fine di garantire una più ampia zona di sopravvivenza al variare delle due rigidità plastiche.

Questa procedura ha permesso di impostare uno studio di sensibilità facilmente interpretabile attraverso le figure sotto riportate.

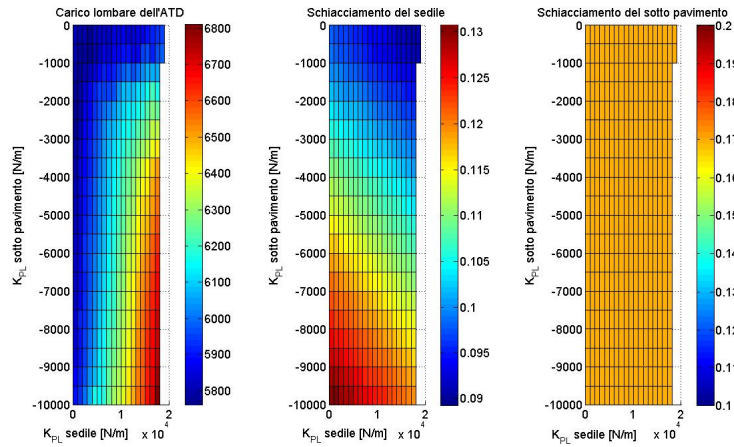


Figure 50: Superficie di risposta al variare delle pendenze del tratto plastico per gli assorbitori del sedile e del sotto pavimento

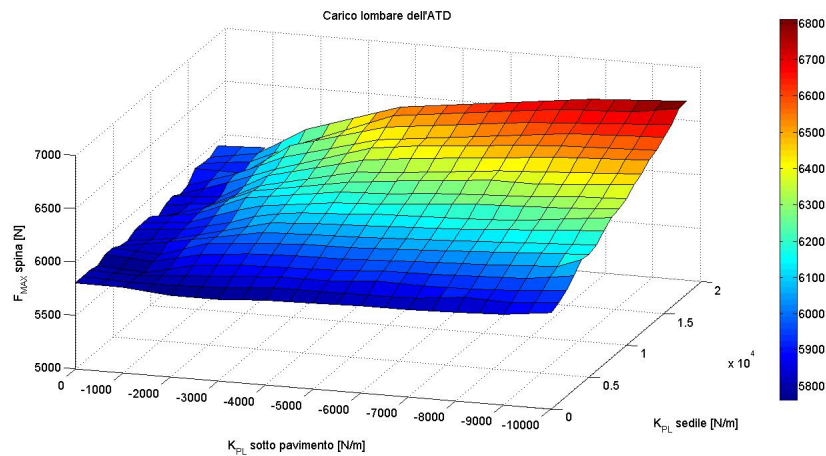


Figure 51: Diagramma 3D della variazione del carico lombare

Analizzando il grafico del carico lombare sembra che la miglior combinazione delle due variabili sia quella che prevede entrambi i valori piccoli in valore assoluto. Questo caso garantisce, infatti, i valori minori di carico trasmesso al manichino antropomorfo.

Questa condizione assicura contemporaneamente un basso livello dello schiacciamento dell'assorbitore di energia del sedile, mentre la corsa del sotto pavimento risulta essere pressoché indifferente alla variazione delle due rigidezze plastiche, attestandosi attorno ad un valore di 0.17 mm.

Alla fine di queste considerazioni è possibile lanciare una procedura di ricerca dei valori ottimi con l'obiettivo di garantire il minor carico lombare possibile trasmesso all'ATD.

#### 4.4 Ricerca dei valori di ottimo

Le analisi esposte in precedenza avevano lo scopo di comprendere le possibili dinamiche d'interazione tra i quattro parametri caratterizzanti le curve di carico dei due dispositivi e di fornire valori limite giustificabili delle suddette variabili.

Alla luce degli studi fatti è quindi possibile lanciare un'analisi di ricerca dei valori ottimali a quattro parametri al fine di garantire il miglior livello di assorbimento di energia del sistema completo.

In accordo con quanto esposto nel capitolo precedente si è deciso di far variare la  $K_{pl}$  dell'assorbitore del sedile da un valore minimo di 0 N/m ad un valore massimo di 20000 N/m. Mentre per quanto riguarda il corrispettivo parametro del sotto pavimento, si è deciso di passare da un valore di 0 N/m ad un valore di -1000 N/m.

Conseguentemente si è deciso che la forza di attivazione del dispositivo del sedile avesse come minimo 9000 N e come massimo 14000 N. Per quanto riguarda il corrispondente parametro degli incroci del subfloor si è imposto di partire da un valore di 3000 N fino a 7000 N.

La ricerca del punto di minimo è stata eseguita attraverso un algoritmo genetico con obiettivo singolo. Questo tipo di procedura parte da un certo numero di possibili soluzioni (individui) chiamate popolazione e provvede a farle evolvere nel corso dell'esecuzione: a ciascuna iterazione, esso opera una selezione di individui della popolazione corrente, impiegandoli per generare nuovi elementi della popolazione stessa, che andranno a sostituire un pari numero d'individui già presenti, e a costituire in tal modo una nuova popolazione per l'iterazione (o generazione) seguente. Tale successione di generazioni evolve verso una soluzione ottimale del problema assegnato.

Questa procedura ha permesso di ricavare una condizione per cui il manichino risulta soggetto ad un carico lombare massimo pari a 5514 N, cioè ben al di sotto del limite previsto da normativa, pari a 6672 N. I risultati qui riportati sono stati validati modificando l'estensione del dominio delle variabili e il metodo di ricerca della condizione ottima.

Di seguito si riporta una tabella contenente i valori dei parametri selezionati dal programma e i grafici delle curve di carico dei due assorbitori.

Output	Valore numerico
Forza di attivazione assorbitore sedile	11000 N
Forza di attivazione assorbitore subfloor	5000 N
Rigidezza plastica assorbitore sedile	5000 N/m
Rigidezza plastica assorbitore subfloor	-2000 N/m

Table 4: Valori numerici delle variabili selezionati dall'ottimizzazione

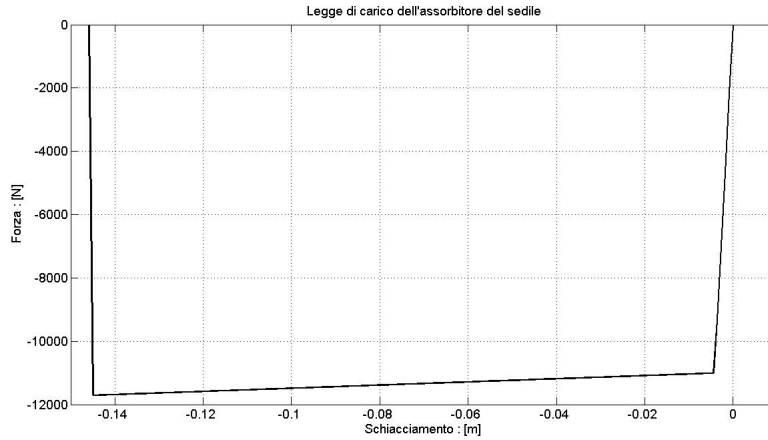


Figure 52: Legge di carico del dispositivo del sedile ottimizzato

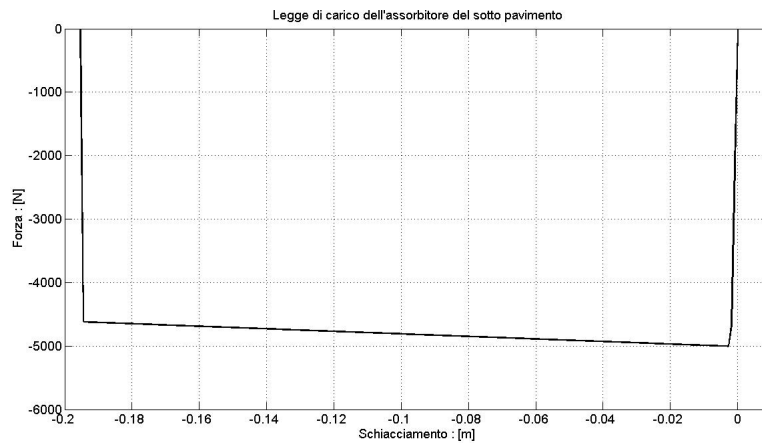


Figure 53: Legge di carico del dispositivo del sotto pavimento ottimizzato

Come si può notare dalle leggi di carico dei due assorbitori, il valore della pendenza del tratto plastico ottimo selezionato dal codice genetico è così piccola da indurre una variazione minima rispetto alla forza di plasticizzazione. Per questo motivo, nei calcoli riportati nel capitolo successivo, non si terrà conto della rigidità come parametro da ottimizzare, adottando quindi l'ipotesi di leggi di carico elastiche perfettamente plastiche per entrambi i modelli di assorbitori d'energia.

## 4.5 La prova certificativa per il sedile ottimizzato

I risultati della procedura di ottimizzazione mostrati in precedenza avevano lo scopo di comprendere le possibili dinamiche d'interazione tra i quattro parametri caratterizzanti i dispositivi di assorbimento, senza però tenere conto del vincolo imposto dalla normativa riguardante i sedili crashworthy.

Come accennato nell'introduzione, infatti, il sedile di un elicottero deve essere provato con una prova d'impatto verticale, durante il quale deve subire un profilo di decelerazione triangolare con picco massimo a 30 g in un intervallo di tempo non inferiore a 0,031 s. Allo scopo di soddisfare i termini previsti dalla normativa vigente è stata ricreata una prova certificativa numerica usando il modello di sedile precedentemente ottimizzato.

Di seguito si riporta il risultato di tale prova, in termini di accelerazione imposta e carico lombare misurato.

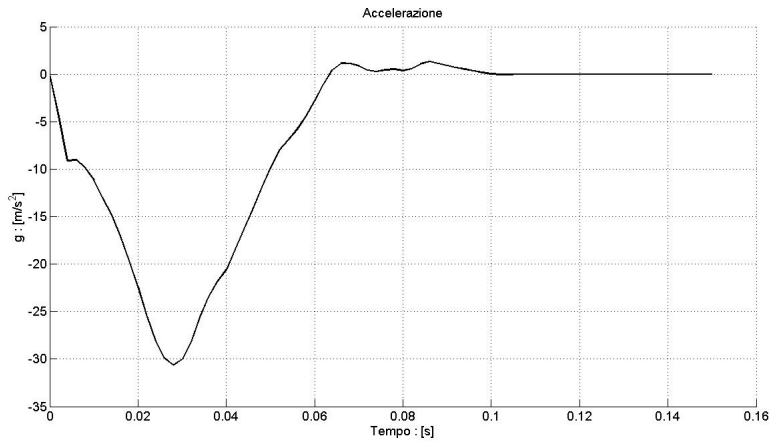


Figure 54: Accelerazione imposta alla slitta

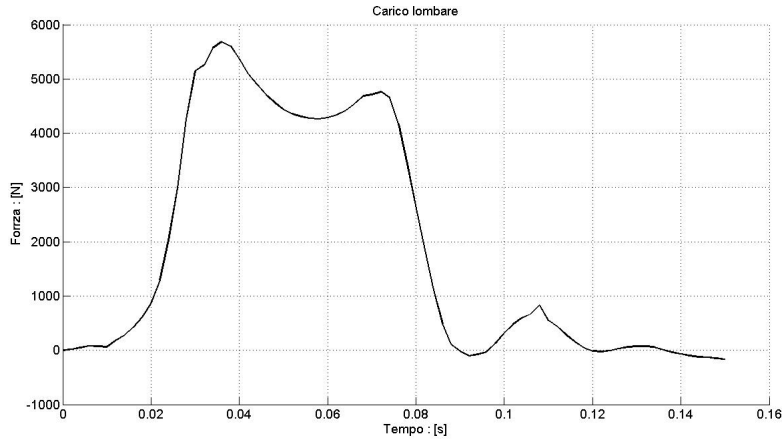


Figure 55: Carico lombare trasmesso all'ATD durante la prova certificativa

Come si può osservare dalla figura 54, il sedile ottimizzato rispetta i dettami previsti dalla normativa vigente, in quanto il valore massimo del carico lombare risulta inferiore al limite prescritto.

Per completezza si riporta una sequenza di frame della prova certificativa numerica.

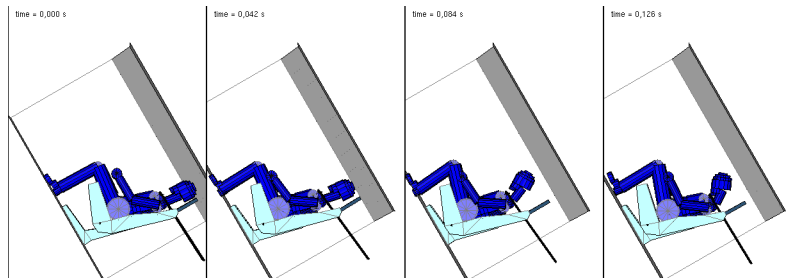


Figure 56: Sequenza di frame della prova certificativa

#### 4.6 Differenti condizioni di velocità di impatto

All'interno della letteratura che tratta di crash di elicotteri è possibile ricercare dati statistici riguardanti le condizioni di impatto più frequenti. Ciò è stato permesso dalla recensione di una vasta collezione di dati riguardanti i crash sopravvissibili e non. Nella figura sottostante vengono riportate le velocità verticali e longitudinali di impatti riferiti sia ad elicotteri civili che militari [23].

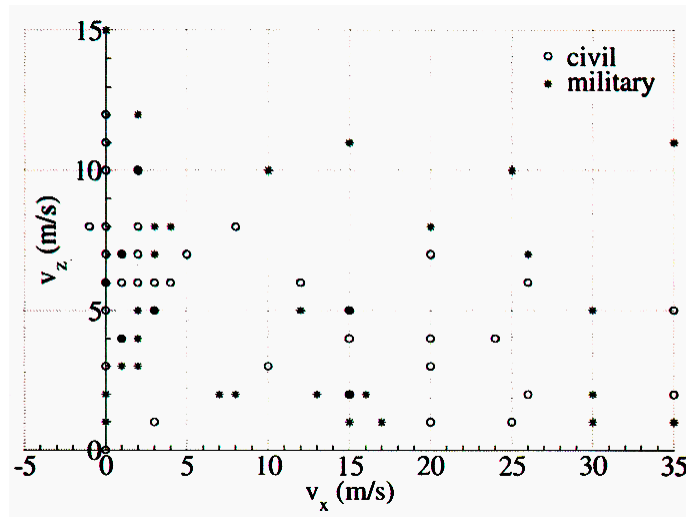


Figure 57: Distribuzione delle velocità d’impatto di elicotteri civili e militari

Come spesso sottolineato, nel presente lavoro di tesi viene considerato solo il caso di impatto puramente verticale. Questo tipo di condizione rappresenta solo una dei possibili scenari di crash. Ciononostante, in questo contesto particolare le capacità degli assorbitori di energia possono essere sfruttate appieno. Inoltre, per analizzare la presenza di una componente orizzontale di velocità, è richiesta una modellazione più sofisticata del sottofondo per rendere adeguatamente conto delle componenti delle forze di taglio.

Ritornando al diagramma di inizio paragrafo, è possibile notare una grande varietà delle condizioni di impatto. Quindi, data la necessità di progettare adeguati dispositivi di assorbimento di energia, risulta essenziale considerare differenti condizioni di velocità d’impatto. Per realizzare questi studi di sensitività si è fatto riferimento al modello precedentemente ottimizzato, variando solamente la velocità di crash.

Di seguito viene riportata la storia temporale del carico lombare dell’ATD nei diversi casi considerati.

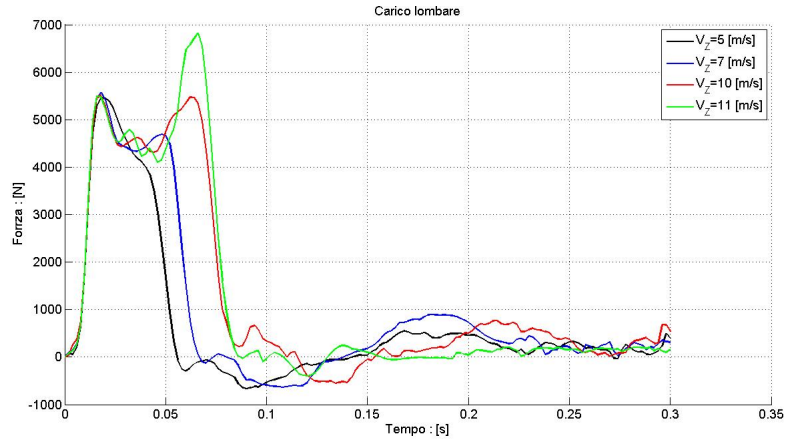


Figure 58: Carico lombare a differenti velocità d'impatto

Il grafico riportato dimostra indubbiamente l'efficienza dei dispositivi di assorbimento risultati dall'ottimizzazione. Infatti, considerando una velocità variabile fino a 11 m/s, si è coperto circa il 95% della casistica riportata dagli studi statistici.



## 5 Ottimizzazione degli stadi di assorbimento di un modello completo di elicottero

Il seguente capitolo rappresenta il primo tentativo di estendere i concetti precedentemente esposti ad un modello numerico completo di elicottero AW109, dotato di sottopavimento, sedile e carrello crashworthy. Come sempre l'obiettivo è quello di minimizzare la forza trasmessa alla spina dorsale dell'ATD.

### 5.1 Il modello numerico

Il modello di elicottero considerato è simile alla struttura e alla distribuzione di massa di un AW109. Questo elicottero, progettato agli inizi degli anni '70, appartiene alla vecchia generazione di velivoli, non essendo provvisto di un dispositivo di assorbimento di energia nel subfloor né di altre tipologie di dispositivi crashworthy.

L'AW109 ha una fusoliera metallica senza sotto pavimento ed è dotato di carrelli d'atterraggio retrattili. La versione qui considerata è quella civile, disposta per il trasporto di 4-6 passeggeri più due piloti.

A partire dal modello iniziale è stato aggiunto un sotto pavimento con incroci metallici, sei sedili Martin Baker e due carrelli principali crashworthy. Di seguito viene riportata un'immagine relativa al modello numerico completo, dotato dei dispositivi di assorbimento di energia.

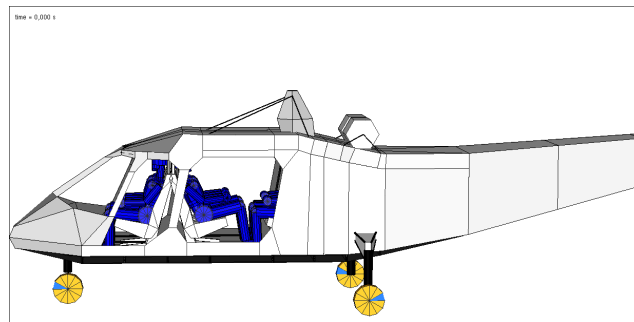


Figure 59: Modello di elicottero completo

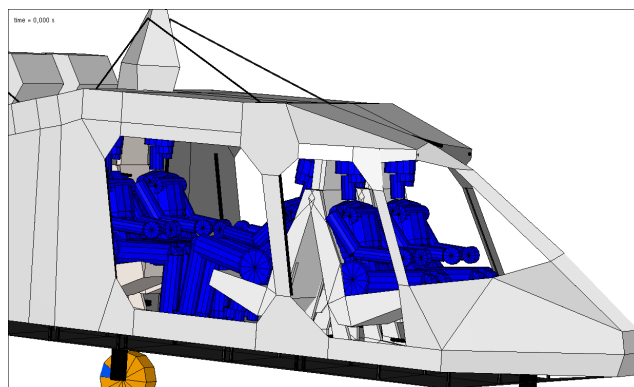


Figure 60: Modello di elicottero completo (particolare)

Di seguito si entra nel dettaglio della modellazione multi corpo dell'elicottero.

#### 5.1.1 Il sotto pavimento

Come dimostrato dai risultati dei capitoli precedenti, la presenza del subfloor può influenzare significativamente l'assorbimento di energia e, quindi, può contribuire alla limitazione dei carichi lombari trasmessi agli occupanti.

Nel modello considerato la struttura del sotto pavimento ha dimensione trasversale massima pari a 1,22 m e una lunghezza di 5,3 m. Per collegare il pavimento della cabina con la pelle esterna sono stati modellati 38 incroci. L'ubicazione di questi elementi è stata determinata considerando la posizione dei montanti della cabina e dei sedili. Ogni intersezione è stata modellata con un elemento beam dotato di legge costitutiva elastica perfettamente plastica. Tali dispositivi sono stati suddivisi in due categorie: assorbitori d'energia interni ed assorbitori d'energia perimetrali (posti in corrispondenza dei montanti della cabina). Questi ultimi sono stati modellati considerando una forza di attivazione sensibilmente più elevata, data la loro funzione di sostenimento della struttura e dei carichi inerziali derivanti dalle turbine e dal rotore principale.

La corsa disponibile di ogni assorbitore del sotto pavimento è di 100 mm. Quest'ultimo valore è stato sensibilmente diminuito rispetto ai casi di studio precedentemente descritti. Tale decisione è legata alla presenza del carrello di atterraggio che in normali condizioni operative, deve poter funzionare senza subire l'interferenza del sotto pavimento.

Di seguito viene presentato un layout del modello sopra descritto.

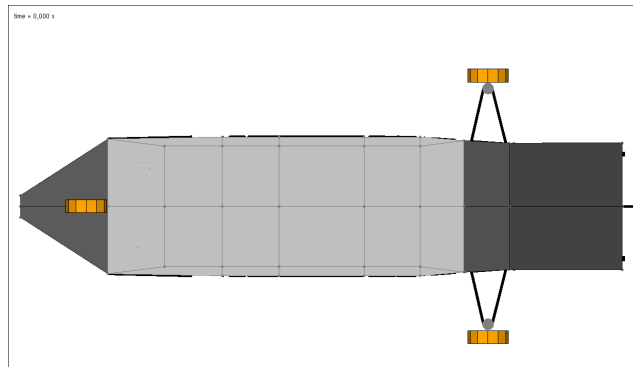


Figure 61: Layout del sotto pavimento

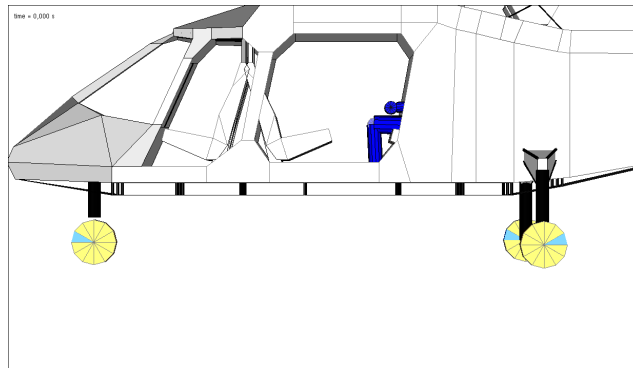


Figure 62: Particolare degli incroci del sotto pavimento

Come si nota dall'immagine sopra riportata, la struttura subfloor è rappresentata da una ripartizione di 28 unità elementari dotati ciascuna di massa e inerzia proprie. Per l'interconnessione di queste sottostrutture sono stati modellati gli elementi di irrigidimento longitudinali e trasversali attraverso dei deformable points. In questo modo, la deformata del sotto pavimento risulta continua e senza lacerazioni della pelle esterna.

### 5.1.2 Il carrello di atterraggio crashworthy

Il carrello di atterraggio è spesso il primo componente del velivolo ad essere coinvolto nel caso di impatto al suolo. Un carrello adeguatamente progettato insieme all'unione di sottopavimento, sedile e cinture di sicurezza, può ridurre i carichi trasferiti agli occupanti e dare un contributo significativo per migliorare la resistenza strutturale agli urti.

Un carrello di atterraggio crashworthy può essere realizzato introducendo un apposita fase di assorbimento di energia, attivata in condizioni di impatto. Per gli elicotteri, una soluzione efficiente

è rappresentata dall'adozione di un dispositivo di assorbimento di energia meccanica, integrato nel carrello di atterraggio.

L'elemento supplementare di assorbimento di energia può essere montato coassialmente al cilindro di un ammortizzatore oleopneumatico. Nelle soluzioni presentate nella letteratura tecnica, gli elementi frangibili collegano l'ammortizzatore al perno di articolazione e sono destinate a rompersi a un livello dato di carico, al fine di attivare la fase di assorbimento di energia d'urto.

Un altro aspetto critico dello sviluppo di un carrello di atterraggio crashworthy è rappresentato dalla risposta dell'ammortizzatore oleopneumatico, il quale è effettivamente progettato per il funzionamento nella condizione di atterraggio normale, mentre gli scenari di crash sono caratterizzati da velocità verticali significativamente superiori.

Di conseguenza, anche le soluzioni che si basano su dispositivi di assorbimento di energia meccanica devono tener conto di un notevole incremento delle forze viscose rispetto alle normali condizioni di progetto. A seconda del lay-out del sistema, le sovrappressioni causate dalle alte velocità relative tra il pistone e il cilindro possono avere effetti differenti. Nei casi più favorevoli è necessario dimensionare l'ammortizzatore per carichi sensibilmente superiori a quelli considerati per carrelli normali. In altri set-up, le forze viscose derivanti dalle alte velocità di impatto vengono direttamente trasmesse alla fusoliera e possono causare la rottura del carrello di atterraggio o di parti strutturali a cui trasmette i carichi di terra per decelerare l'intero aeromobile.

Una soluzione per ridurre i picchi di carico viscosi nell'ammortizzatore è rappresentata dall'adozione di valvole o spine blow-out. Queste valvole devono essere specificamente progettate per condizioni di crash, al fine di modificare la geometria degli orifizi che determinano le perdite di carico viscoso.

Viene ora riportato lo schema di funzionamento di una valvola per la riduzione dei picchi della reazione viscosa.

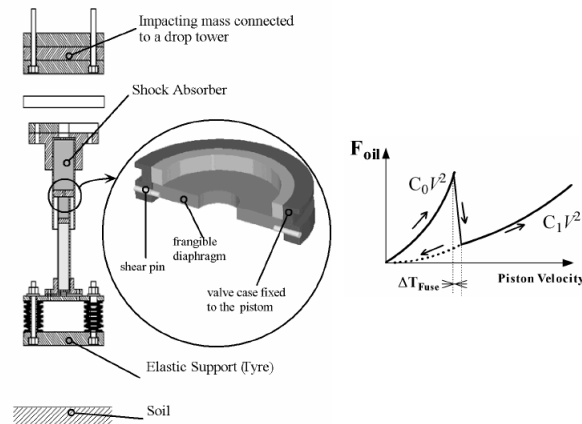


Figure 63: Schema di funzionamento della valvola per la riduzione della reazione viscosa

In realtà esistono dei sistemi più efficienti, che aumentando l'area di trafilamento in maniera graduale non determinando una caduta di forza significativa, piuttosto un suo livellamento.

Di seguito è riportata un'immagine della deformazione del carrello completo prima descritto.

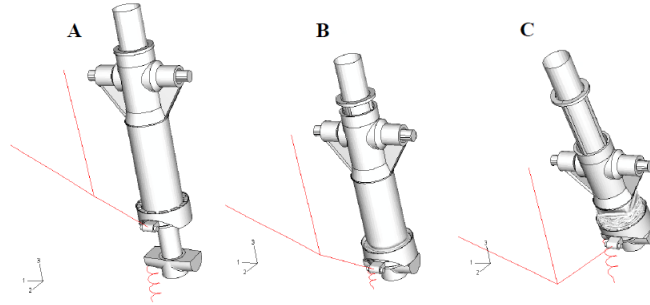


Figure 64: Deformazione di un carrello crashworthy

Questa tipologia di carrelli genera una reazione particolare, caratterizzata da un andamento difficilmente modellabile. Di seguito si riporta il confronto tra la reazione del carrello nella condizione normale e nella condizione di crash.

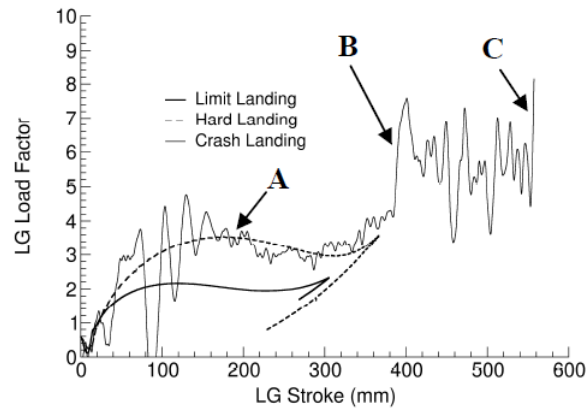


Figure 65: Esempio di Legge di carico di un carrello crashworthy

Nel modello numerico il dispositivo del carrello di atterraggio è stato riprodotto dall'insieme di due elementi posti in parallelo. Il primo consiste in una beam avente una legge di carico, modellata attraverso una TFUN in grado di rappresentare l'andamento desiderato della reazione elastica. Il secondo elemento è invece un damper, a cui è stata associata una legge di carico (proporzionale alla velocità di schiacciamento dell'ammortizzatore), atta a riprodurre la reazione viscosa.

Per ricreare gli stadi anticrash del dispositivo reale è stato necessario modificare la legge della parte elastica e viscosa, andando a porre un valore di forza limite, oltre il quale la reazione non può

più crescere e quindi non può trasmettere picchi di forza troppo elevati. Di seguito si riporta un esempio di legge di carico di un carrello di atterraggio crashworthy con forza limite imposta a 40 kN.

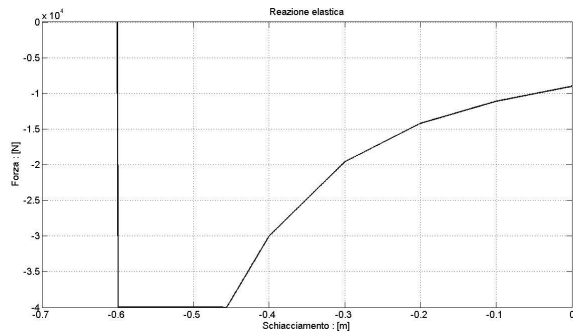


Figure 66: Esempio di reazione elastica di un carrello crashworthy

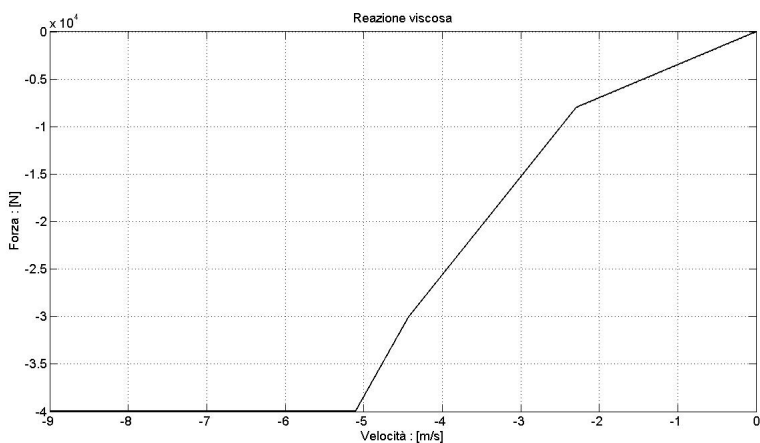


Figure 67: Esempio di reazione viscosa di un carrello crashworthy

A prescindere dalle considerazioni riguardanti la situazione di crash, va ancora sottolineato che il dimensionamento del carrello è stato eseguito tenendo conto delle condizioni di normal landing. Si presentano a questo punto i risultati di una simulazione con velocità di atterraggio pari a 2,5 m/s.

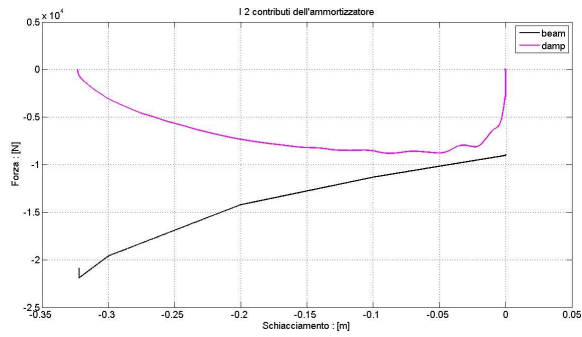


Figure 68: Reazione elastica e viscosa del carrello principale

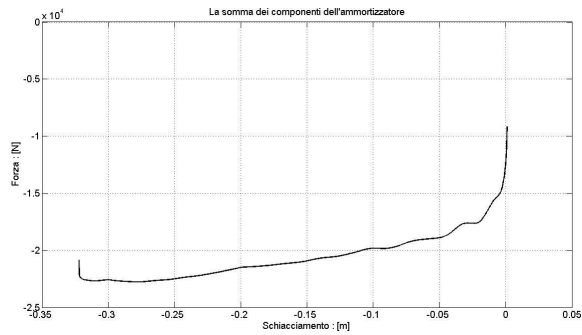


Figure 69: Reazione totale carrello

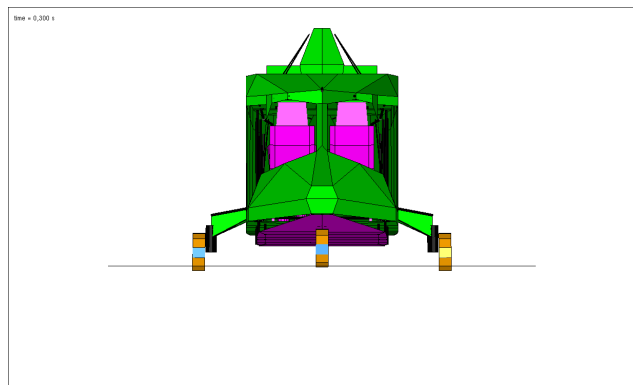


Figure 70: Configurazione dell'elicottero dopo l'atterraggio

È quindi possibile concludere che il carrello inserito nel modello numerico risulta essere rispettoso della normativa, presentando un'efficienza elevata nei casi di normal e hard landing. Oltre a

ciò dispone di caratteristiche crashworthy tali da renderlo di fatto un dispositivo di assorbimento dell'energia di impatto al pari di sotto pavimento e sedile.

### 5.1.3 Il sedile Martin Baker

Il modello numerico del sedile aeronautico Martin Baker è lo stesso utilizzato nei capitoli precedenti. Anche il relativo dispositivo di assorbimento di energia non è stato cambiato, data l'efficacia dimostrata nelle prove prima illustrate.

Il numero e la posizione dei sedili è stata determinata a partire da considerazioni riguardanti la tipica configurazione di un elicottero a trasporto civile. Per quanto riguarda i passeggeri, si è deciso di considerare un unico manichino antropomorfo posto nella cabina passeggeri sul sedile diretto nel senso di marcia. Questa scelta è giustificata dalla necessità di ridurre i tempi di calcolo che altrimenti non sarebbero stati conciliabili con l'obiettivo di avere una serie di analisi di sensitività.

Di seguito si riporta uno schema esplicativo della posizione dei sedili e del passeggero.

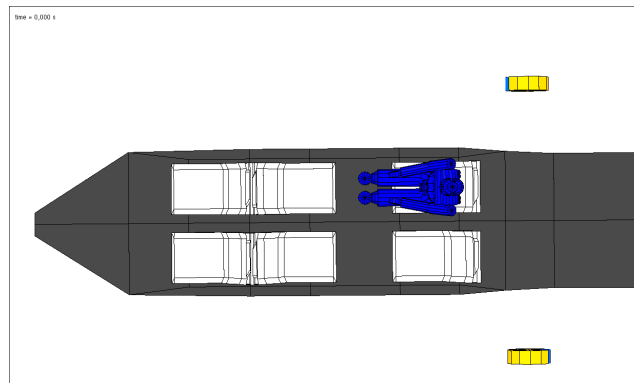


Figure 71: Layout della disposizione di sedili e manichino ATD

## 5.2 Confronto tra assorbitori ottimizzati e assorbitori classici

All'interno di questo capitolo si vuole dimostrare la bontà dei risultati fin qui raggiunti, procedendo con un confronto tra assorbitori classici e assorbitori ottimizzati. Questi ultimi, in particolare, sono i dispositivi del sedile e del sotto pavimento dotati di una legge di carico ottimizzata attraverso gli studi condotti nel quarto capitolo.

Si riportano a questo punto le leggi di carico degli assorbitori del sedile e del sotto pavimento risultanti dalle analisi di ottimizzazione.



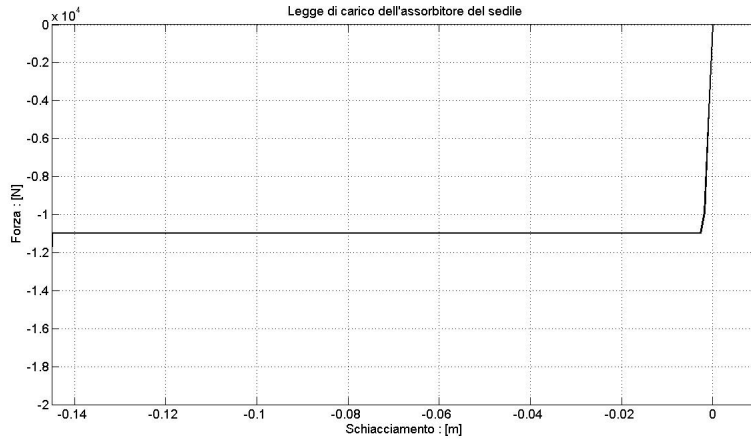


Figure 72: Legge di carico ottimizzata dell'assorbitore del sedile

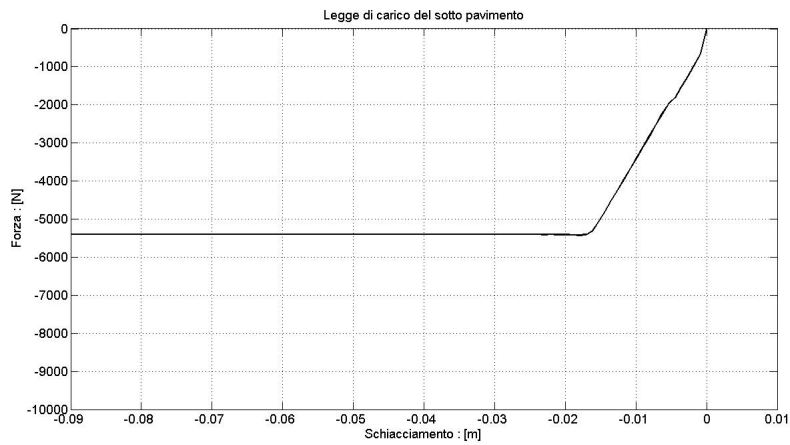


Figure 73: Legge di carico ottimizzata dell'assorbitore del sotto pavimento

Per gli assorbitori non ottimizzati si faccia riferimento ai dispositivi testati nel capitolo della prima validazione. Di seguito si riportano le relative leggi di carico.

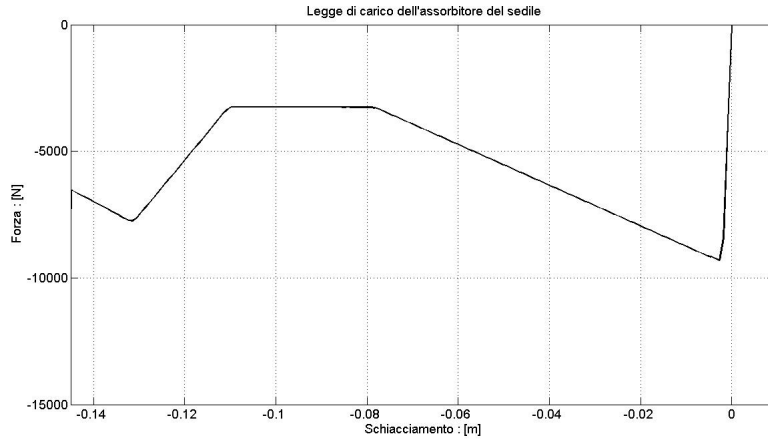


Figure 74: Legge di carico non ottimizzata dell'assorbitore del sedile

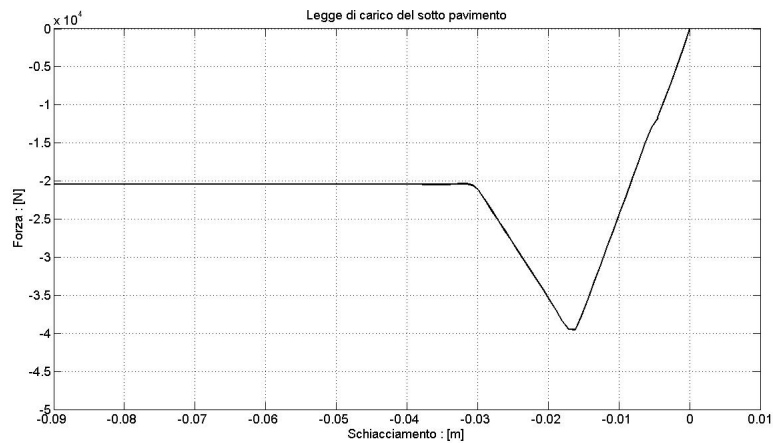


Figure 75: Legge di carico non ottimizzata dell'assorbitore del sotto pavimento

Si noti che le leggi di carico degli assorbitori del subfloor sopra riportate sono state applicate ai soli incroci interni; mentre, per quanto riguarda gli elementi perimetrali, è stata fissata per entrambe le simulazioni una legge costitutiva elastica perfettamente plastica, con una forza di attivazione pari a 50000 N.

Entrambe le simulazioni sono state eseguite partendo dalla condizione iniziale di velocità d'impatto pari a 10 m/s. Il modo migliore per paragonare i risultati è quello di confrontare la storia temporale del carico lombare dei manichini.

Di seguito si riporta l'andamento nel tempo della forza trasmessa al manichino, ricordando che il suo limite previsto dalla normativa è pari a 6672 N.

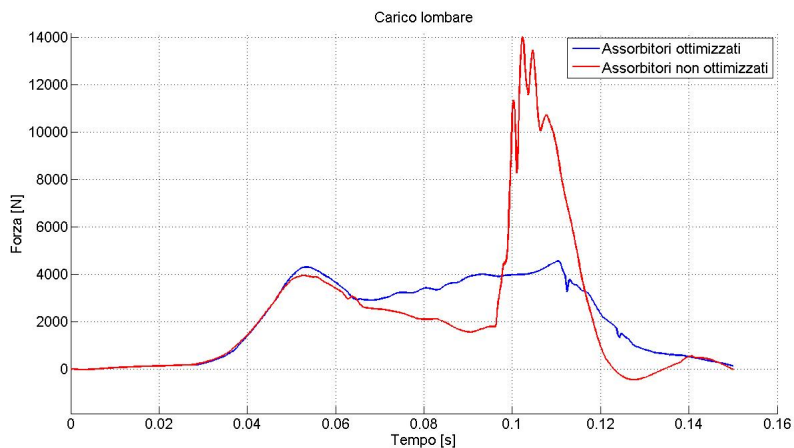


Figure 76: Confronto del carico lombare

Per completezza si riporta anche il confronto di altri parametri come la corsa del dispositivo di assorbimento del sedile e degli incroci del sotto pavimento.

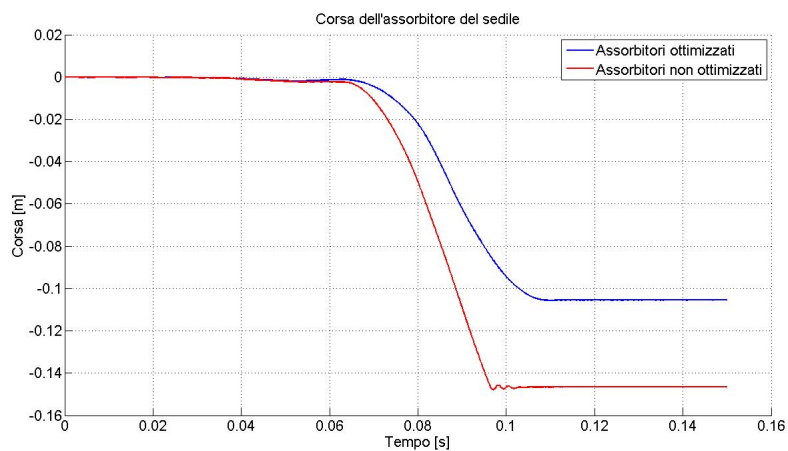


Figure 77: Confronto della corsa dell'assorbitore del sedile

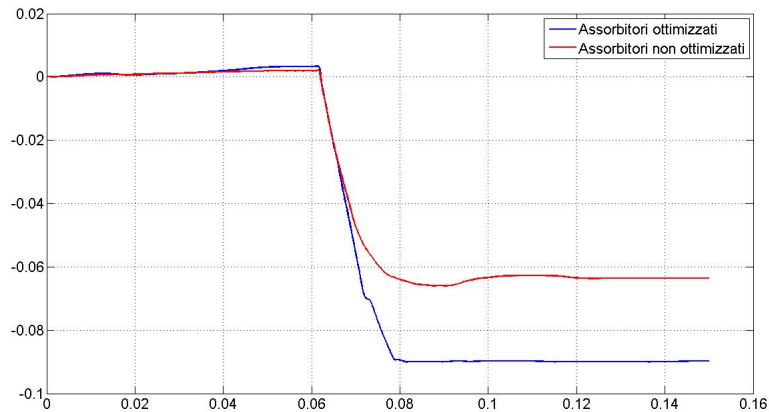


Figure 78: Confronto della corsa dell'assorbitore del sotto pavimento

Analizzando i grafici sopra riportati si evidenzia l'efficienza dei dispositivi ottimizzati che senza nemmeno sfruttare a fondo le proprie caratteristiche, riescono a garantire un carico lombare massimo di poco superiore ai 4000 N, cioè ben al di sotto del limite previsto dalla normativa. Al contrario gli assorbitori non ottimizzati causano un picco nella forza trasmessa al manichino superiore ai 14000 N.

Focalizzando l'attenzione sul grafico della corsa del dispositivo del sedile è possibile intuire le cause di questa profonda differenza di comportamento. Quello che si nota è infatti il raggiungimento del fine corsa di questo assorbitore che di conseguenza causa il fenomeno del fine corsa.

Da questo semplice confronto si comprende quale siano le vere potenzialità e i possibili benefici di uno studio combinato dei dispositivi di assorbimento dell'energia d'impatto.

Particolare enfasi va posta anche sul ridotto tempo di calcolo richiesto. Infatti, la simulazione del modello completo dotato di tutti gli strumenti crashworthy eseguite con processore Pentium® Dual-Core CPU T4200 da 2.00 GHz, ha richiesto in tempo di calcolo di circa 5 minuti. Questo vantaggio sarà di grande importanza nelle analisi di sensitività per l'ottimizzazione del progetto strutturale.

### 5.3 Analisi di sensitività : le forze di attivazione degli assorbitori

Le analisi di sensitività qui riportate vogliono ricalcare il lavoro svolto nel quarto capitolo, con l'obiettivo di valutare il comportamento del modello completo di elicottero e, in particolare, dei dispositivi di assorbimento dell'energia d'impatto, alla luce della presenza di un nuovo stadio rappresentato dal carrello d'atterraggio crashworthy. In questo primo step sono state considerate come variabili solo le forze di attivazione degli assorbitori di energia del sedile e del sotto pavimento.

La forza del dispositivo di assorbimento del sedile è stata fatta variare da 9000 N a 15000 N mentre il range della forza delle intersezioni del sottopavimento parte da un valore minimo di 2000

N ad un valore massimo di 12000 N.

È stata considerata una griglia regolare di 6x6 punti di calcolo, considerando uno step di circa 1000 N per far variare i parametri di forza nel loro range dal valore minimo al valore massimo. Anche in questo caso le superfici di risposta sono state realizzate con la procedura Full Factorial Allocation grazie alla quale è stato possibile allocare le differenti valutazioni e realizzare automaticamente le analisi. Come accennato nel precedente paragrafo, questa procedura genera una griglia di punti all'interno del dominio di interesse. Il numero di punti considerati cresce esponenzialmente rispetto alla dimensione del dominio di interesse e al numero di variabili.

Gli output valutati dal programma sono rappresentati dall'andamento temporale del carico lombare e dello schiacciamento dei dispositivi di assorbimento dell'energia (le intersezioni interne del sotto pavimento e l'assorbitore del sedile). Si è scelto di operare le simulazioni considerando una velocità d'impatto pari a 11 m/s. Questo valore, che negli studi valutati precedentemente risultava un limite, qui può essere considerato come punto di partenza, grazie anche alla presenza del terzo stadio di assorbimento d'energia costituito dal carrello principale.

### 5.3.1 I risultati

Di seguito vengono riportati i grafici esplicativi dell'analisi di sensitività precedentemente descritta.

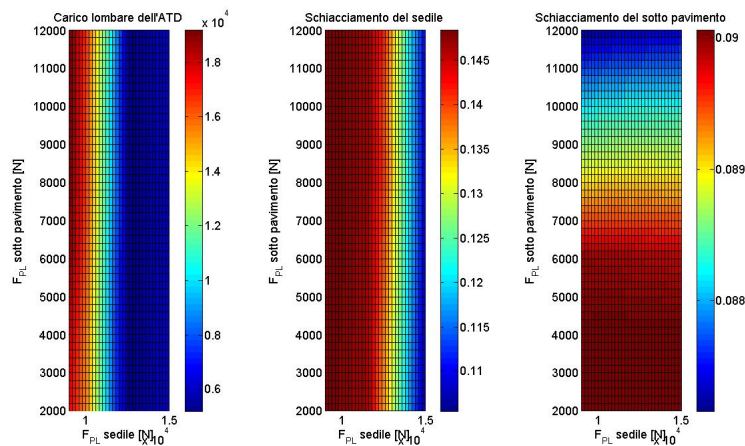


Figure 79: Analisi di sensitività sul modello di elicottero completo

È possibile avere un focus migliore selezionando il solo diagramma del carico lombare. Nelle figure sottostanti è stata modificata la barra indicatrice dell'intensità del carico, associando al colore blu le zone di sopravvivenza.

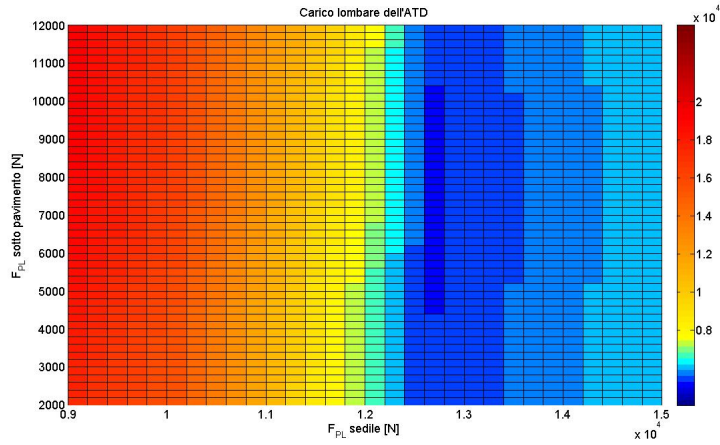


Figure 80: Superficie di risposta del carico lombare

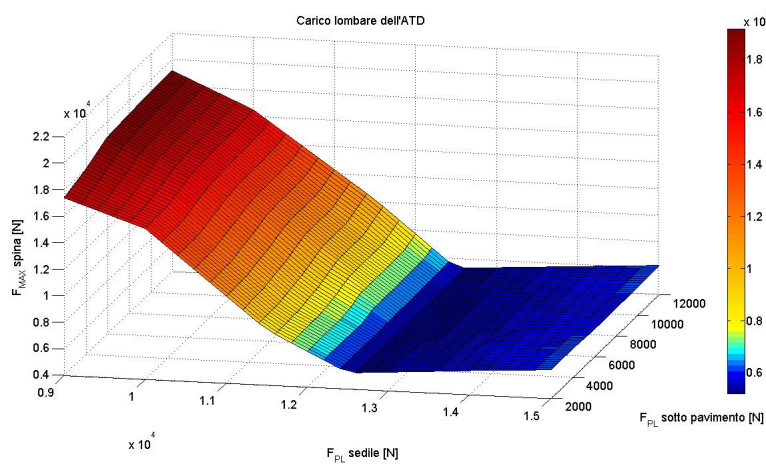


Figure 81: Diagramma 3D del carico lombare

Considerando le condizioni d’impatto si nota che i valori più bassi del carico lombare si raggiungono in corrispondenza di valori tendenzialmente elevati della forza di attivazione del dispositivo del sedile (da 12500 N a 14000N), mentre i risultati sembrano essere piuttosto insensibili alla forza di plasticizzazione degli incroci del subfloor.

Anche in questo caso è possibile notare come il crash completo degli elementi del sotto pavimento non risulti avere lo stesso effetto sulla storia temporale del carico lombare che causa il fenomeno del fine corsa dell’assorbitore del sedile.

La figura sottostante è stata ricavata nelle stesse condizioni della Fig. 78 con l’accortezza di

rendere invisibile il campo di valori che corrispondono al raggiungimento del fine corsa del dispositivo del sedile.

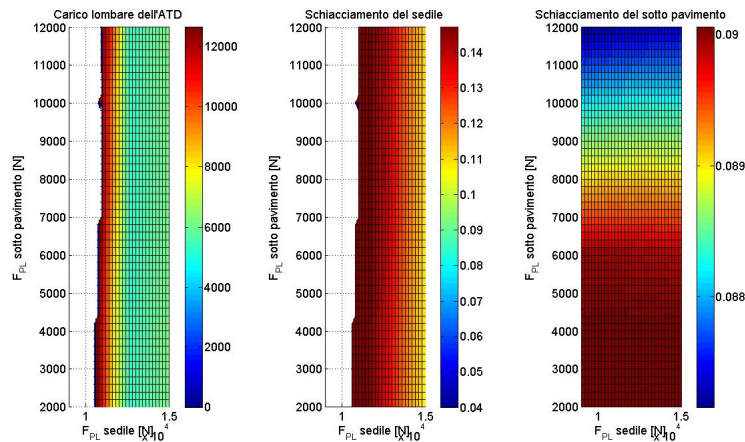


Figure 82: Analisi di sensitività sul modello di elicottero completo, senza i valori che causano il fine corsa

Questi grafici permettono di evidenziare che la soluzione ottima giace nella fascia compresa tra la zona sopravvivibile e la zona non sopravvivibile e che il gradiente della superficie di risposta in questo spazio è molto ripido. Dunque, il punto di progetto dovrebbe essere scelto considerando il necessario margine di sicurezza e che l’impatto possa avvenire anche a velocità superiori (eventualità rara), cercando di sfruttare il più possibile la corsa di entrambi gli assorbitori del sedile e del sotto pavimento, prevenendo però il fenomeno del fine corsa per il dispositivo del sedile.

Alla luce di queste considerazioni, un possibile punto di progetto sarebbe quello che prevede una forza di attivazione degli incroci del subfloor pari a 8000 N e un corrispondente valore per il dispositivo del sedile pari a 13000 N.

Di seguito si riporta l’andamento temporale del carico lombare dell’ATD nelle condizioni di impatto prima descritte e nel punto di progetto sopra citato.

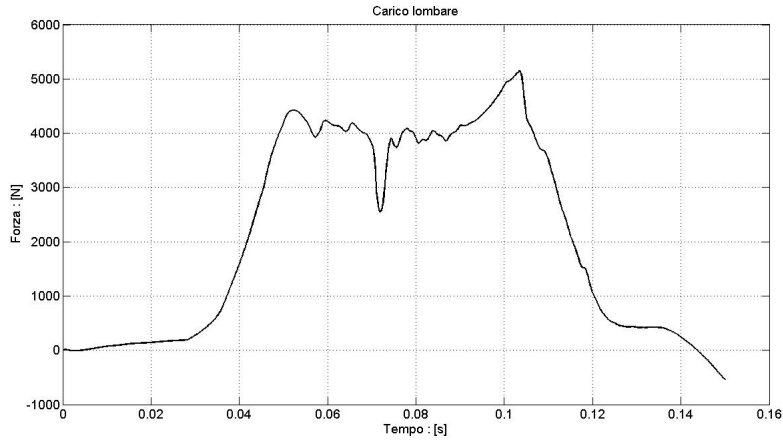


Figure 83: Carico lombare dell'ATD per la soluzione di progetto

Per completezza si riportano anche i dati riguardanti la reazione del carrello d'atterraggio.

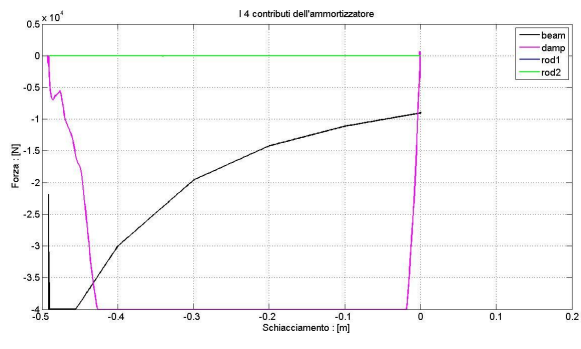


Figure 84: Contributo elastico e viscoso del carrello



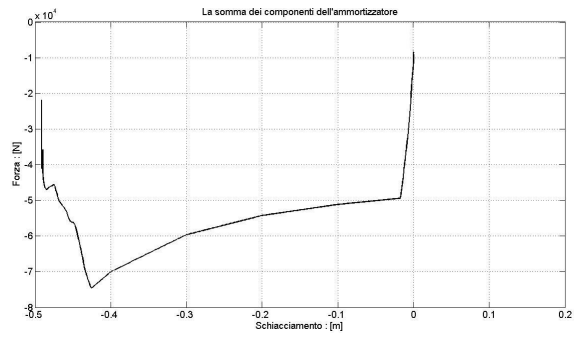


Figure 85: Reazione completa del carrello

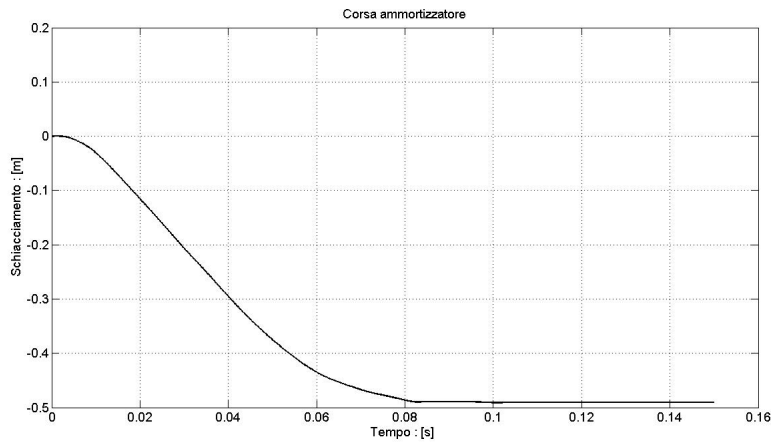


Figure 86: Corsa dell'ammrtizzatore

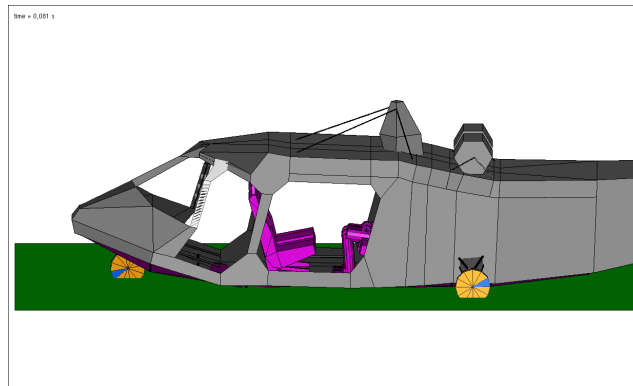


Figure 87: Deformata finale elicottero nel caso ottimizzato

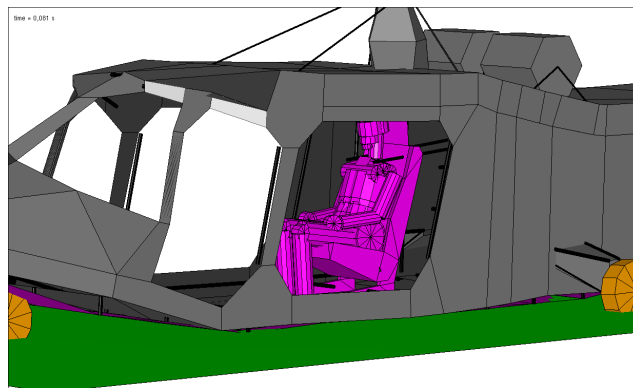


Figure 88: Particolare della deformata finale elicottero nel caso ottimizzato

#### 5.4 Analisi di sensitività: le forze di attivazione degli assorbitori perimetrali del sotto pavimento

Come dichiarato all'inizio del capitolo, gli incroci sono stati suddivisi in due gruppi: quelli interni e quelli perimetrali. A questi ultimi è stata assegnata una legge di carico elastica perfettamente plastica con forza di attivazione di 50kN, valore più elevato rispetto a quello assegnato ai dispositivi interni del sotto pavimento.

Questa scelta è stata precedentemente giustificata dalla necessità di avere elementi in grado di sostenere i carichi derivanti dai montanti e i carichi inerziali originati dalle turbine e dal rotore principale. A questo punto risulta interessante osservare come questo parametro possa influire sulle caratteristiche di assorbimento di energia dell'intero velivolo.

Mantenendo una velocità di impatto pari a 11 m/s, è stata fatta variare la forza del dispositivo di assorbimento del sedile da 9000 N a 15000 N mentre il range della forza delle intersezioni del

sottopavimento è stato fatto partire da un valore minimo di 2000 N ad un valore massimo di 12000 N. È stata considerata una griglia regolare di 6x6 punti di calcolo, considerando uno step di circa 1000 N per far variare i parametri di forza nel loro range dal valore minimo al valore massimo. Le analisi sono state quindi ripetute per valori della forza di attivazione degli incroci perimetrali del sottopavimento pari a 25 kN e 100 kN.

Questo range è stato ottenuto da considerazioni fisiche. Il limite inferiore di 25000 N, infatti, non può essere eccessivamente ridotto altrimenti la struttura tenderebbe a caricare maggiormente gli incroci interni, rendendo il sotto pavimento poco efficace. Allo stesso modo, il limite massimo della forza non dovrebbe essere eccessivamente incrementato se non si vuole realizzare una struttura troppo rigida e quindi poco efficiente dal punto di vista crashworthy.

#### 5.4.1 Forza di attivazione degli incroci perimetrali del sotto pavimento pari a 25 kN

Di seguito vengono riportati i grafici relativi all'analisi di sensitività ottenuta imponendo una forza di plasticizzazione dei dispositivi esterni del sotto pavimento pari a 25000 N.

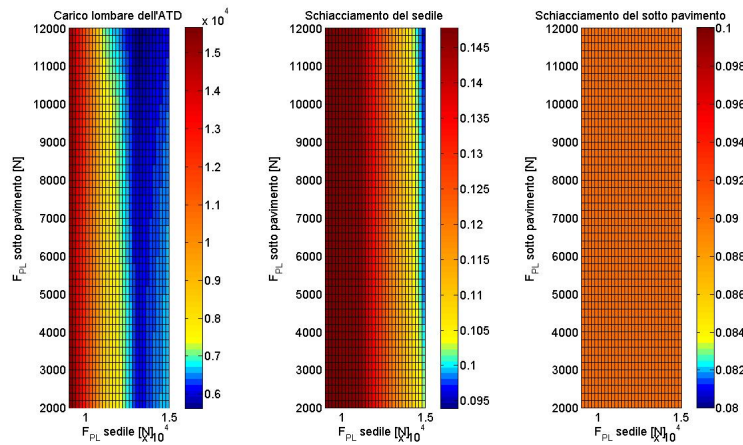


Figure 89: Risultati dell'analisi di sensitività ottenuta per valori della forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 25 kN

Come si può notare dalle immagini, la zona sopravvivibile risulta ridotta rispetto al caso di default caratterizzato da una forza di attivazione di 50 kN. L'origine di questo fenomeno è da ricercarsi nell'eccessiva limitazione della forza di plasticizzazione di questi dispositivi, che ha ridotto le capacità crashworthy dell'intera struttura del sotto pavimento. La minore resistenza degli assorbitori perimetrali del subfloor ha, infatti, causato uno sfruttamento maggiore della corsa degli altri assorbitori (sedile e sottopavimento interno) determinando nella maggior parte dei casi il raggiungimento del fine corsa del sedile.

Per meglio evidenziare i fenomeni sopra descritti, si riporta di seguito il confronto tra i risultati, in termini di carico lombare, nella condizione default e nella condizione a 25 kN. Dai grafici sono

state eliminate quelle soluzioni che determinavano una condizione di fine corsa nell'assorbitore del sedile.

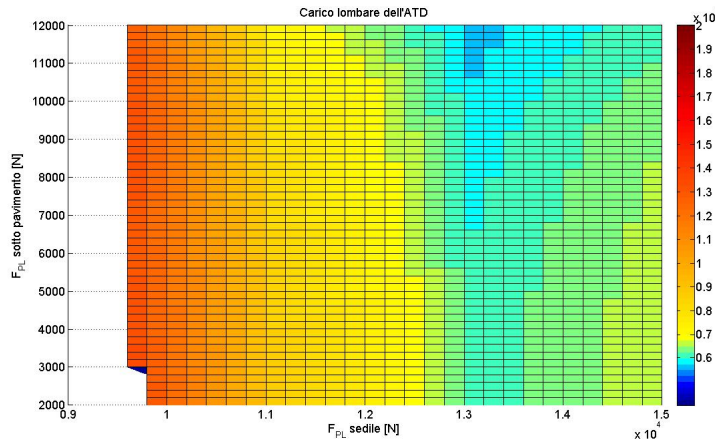


Figure 90: Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 25 kN

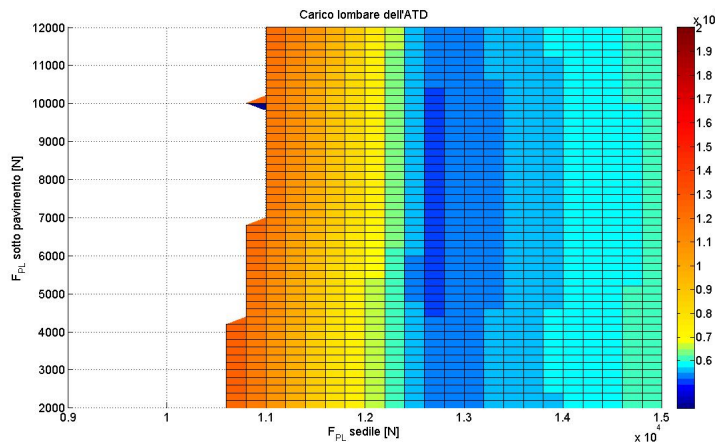


Figure 91: Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 50 kN

#### 5.4.2 Forza di attivazione degli incroci perimetrali del sotto pavimento pari a 100 kN

Di seguito vengono riportati i grafici relativi all'analisi di sensitività ottenuta imponendo una forza di plasticizzazione dei dispositivi esterni del sotto pavimento pari a 100000 N.

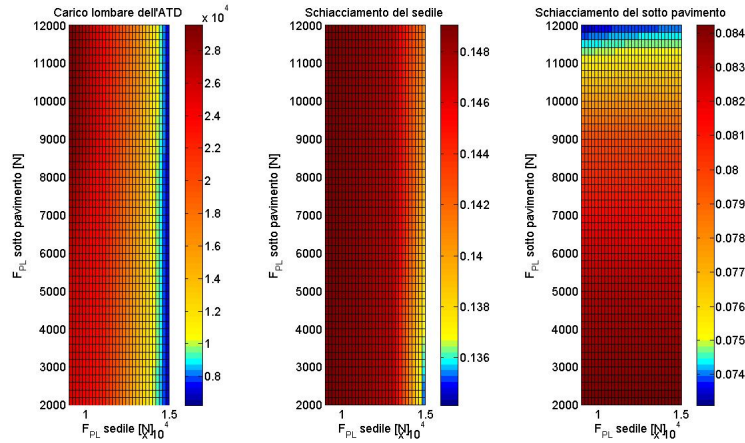


Figure 92: Risultati dell'analisi di sensitività ottenuta per valori della forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 100 kN

Come si può notare dalle immagini, la zona sopravvivibile risulta estremamente ridotta. Ciò è indubbiamente causato dall'eccessiva resistenza di questi dispositivi, che ha ridotto le capacità crashworthy dell'intera struttura. È noto, infatti, che un sotto pavimento troppo resistente non si comporta come un filtro, ma trasmette tutta la forza dell'impatto al resto della struttura causando uno sfruttamento maggiore della corsa degli altri assorbitori (sedile e sottopavimento interno). Anche in questo caso si raggiunge molto frequentemente il fine corsa dell'assorbitore del sedile, determinando un picco eccessivo del carico lombare trasmesso al manichino.

Per meglio evidenziare i fenomeni sopra descritti, si riporta di seguito il confronto tra i risultati, in termini di carico lombare, nella condizione default e nella condizione a 100 kN. Dai grafici sono state eliminate quelle soluzioni che determinavano una condizione di fine corsa nell'assorbitore del sedile.

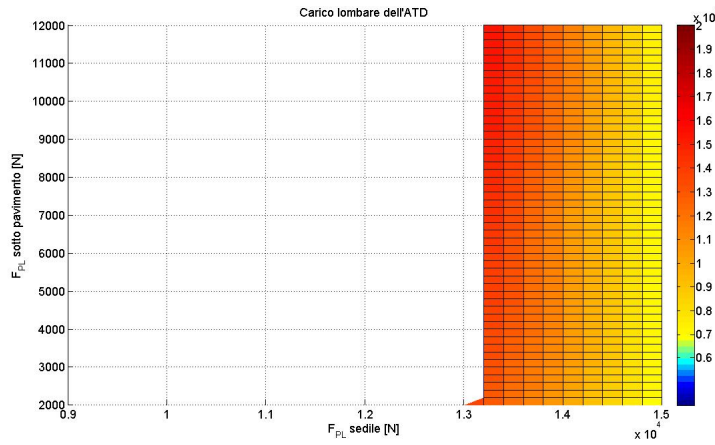


Figure 93: Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 100 kN

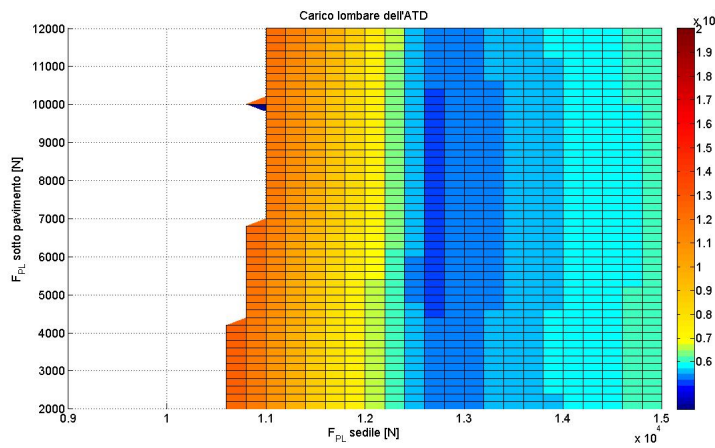


Figure 94: Carico lombare ricavato in condizione d'impatto con forza di attivazione degli incroci perimetrali pari a 50 kN

### 5.5 Analisi di sensitività: La forza limite del carrello crashworthy

Come dichiarato nel paragrafo dedicato al carrello di atterraggio, il modello di elicottero è dotato di un ammortizzatore crashworthy. Questo dispositivo può essere realizzato introducendo un apposita fase di assorbimento di energia, attivata in condizioni di impatto. In tale occasione, infatti, gli elementi frangibili si rompono ad un livello di carico prefissato, al fine di attivare la fase di assorbimento di energia d'urto.

Risulta quindi interessante indagare come il livello di carico limite possa condizionare le capacità di assorbimento di energia dell'intera struttura.

Anche in questa fase si è mantenuta una velocità di impatto pari a 11 m/s. La forza del dispositivo di assorbimento del sedile varia da 9000 N a 15000 N mentre il range della forza delle intersezioni del sottopavimento è stato fatto partire da un valore minimo di 2000 N ad un valore massimo di 12000 N. È stata considerata una griglia regolare di 6x6 punti di calcolo, considerando uno step di circa 1000 N per far variare i parametri di forza nel loro range dal valore minimo al valore massimo. Le analisi sono state quindi ripetute per valori della forza limite del carrello crashworthy pari a 30 kN e 50 kN.

### 5.5.1 Forza limite del carrello pari a 30 kN

Si riportano ora le reazioni elastiche e viscosi caratteristiche del carrello principale implementate nel modello numerico.

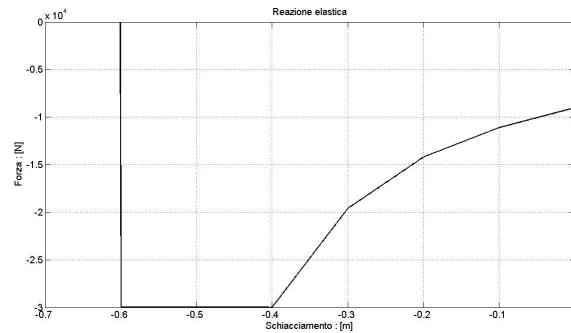


Figure 95: Reazione elastica del carrello avente forza limite pari a 30 kN

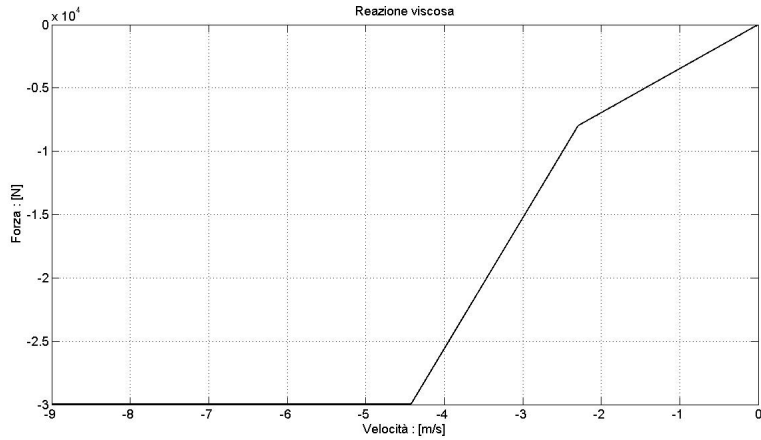


Figure 96: Reazione viscosa del carrello avente forza limite pari a 30 kN

Di seguito vengono mostrati i grafici relativi all'analisi di sensitività ottenuta imponendo una forza limite del dispositivo del carrello di atterraggio pari a 30000 N.

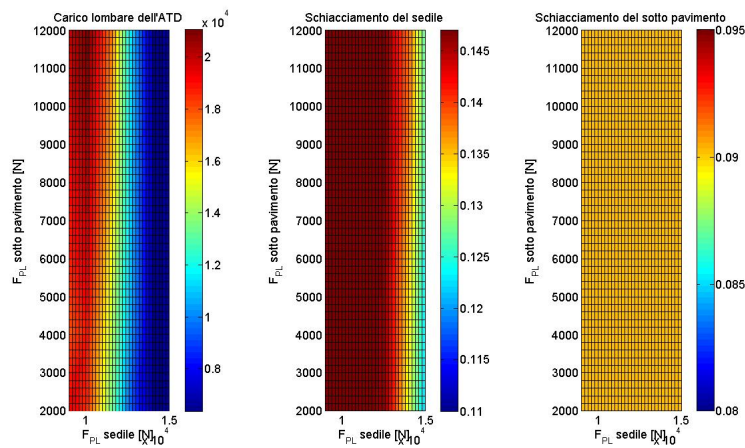


Figure 97: Analisi di sensitività ottenuta per valori del carico limite del carrello principale pari a 30 kN

Per meglio evidenziare i cambiamenti rispetto al caso di default (ottenuto con una forza limite pari a 40 kN) si riporta il confronto tra i risultati, in termini di carico lombare.



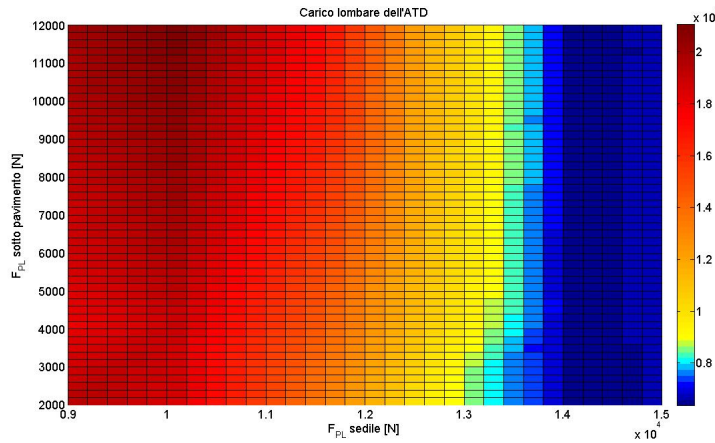


Figure 98: Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 30 kN

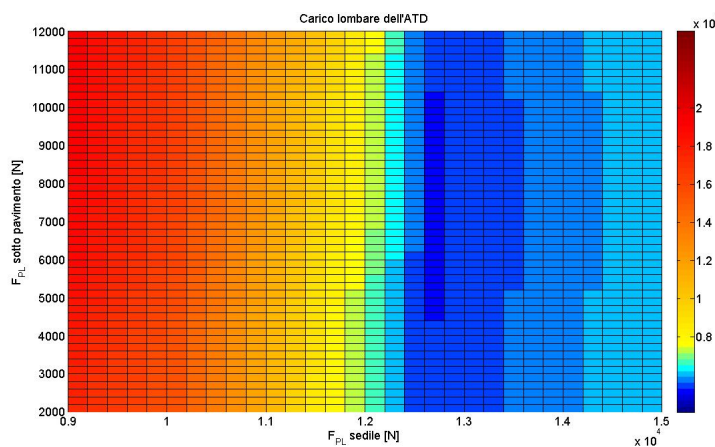


Figure 99: Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 40 kN

Come si può notare dalle immagini sopra riportate, la zona sopravvivibile risulta ridotta rispetto al caso di default. L'origine di questo fenomeno è da ricercarsi nell'eccessiva limitazione della forza limite dell'assorbitore del carrello, che ha ridotto la sua capacità crashworthy. La minore resistenza di questo dispositivo ha, infatti, causato uno sfruttamento maggiore della corsa degli altri assorbitori (sedile e sottopavimento interno) come si può notare dalla Figura 96.

È possibile apprezzare meglio il fenomeno sopra descritto, focalizzando l'attenzione sul confronto del carico lombare nella condizione di default e nella condizione a 30 kN.

Da queste analisi sembrerebbe preferibile un carrello dotato di un elevata forza limite.

### 5.5.2 Forza limite del carrello pari a 50 kN

Si riportano ora le reazioni elastiche e viscose caratteristiche del carrello principale implementate nel modello numerico.

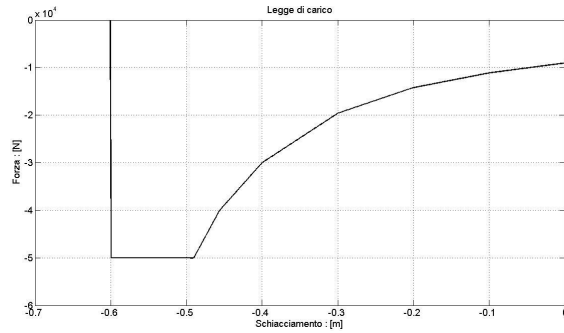


Figure 100: Reazione elastica del carrello avente forza limite pari a 50 kN

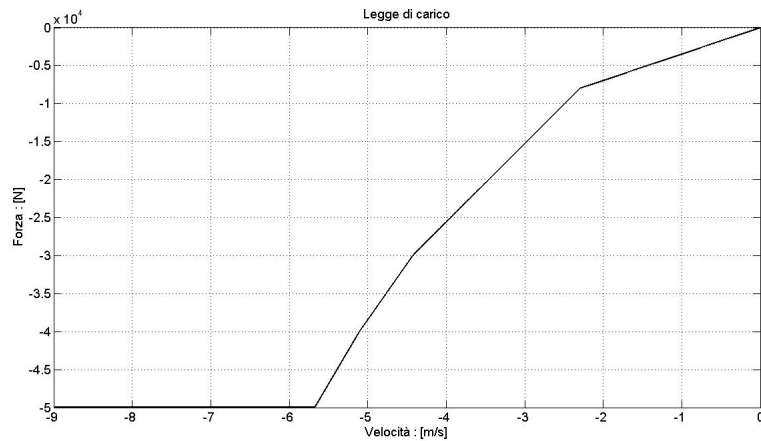


Figure 101: Reazione viscosa del carrello avente forza limite pari a 50 kN

Di seguito vengono mostrati i grafici relativi all'analisi di sensitività ottenuta imponendo una forza limite del dispositivo del carrello di atterraggio pari a 50000 N.

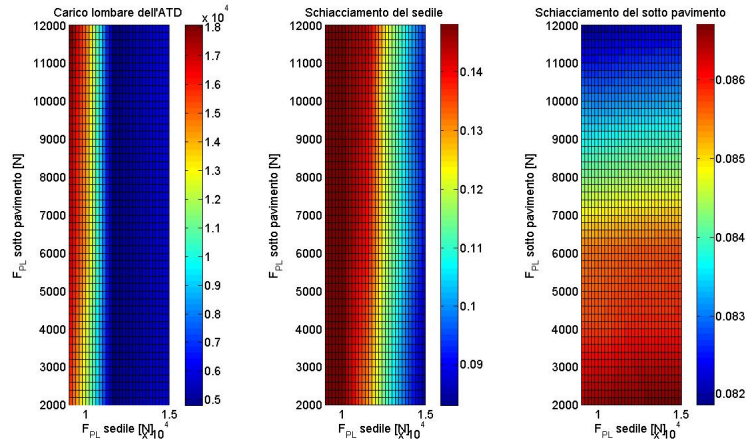


Figure 102: Analisi di sensitività ottenuta per valori del carico limite del carrello principale pari a 50 kN

Anche qui per meglio evidenziare i cambiamenti rispetto al caso di default (ottenuto con una forza limite pari a 40 kN) si riporta il confronto tra i risultati, in termini di carico lombare.

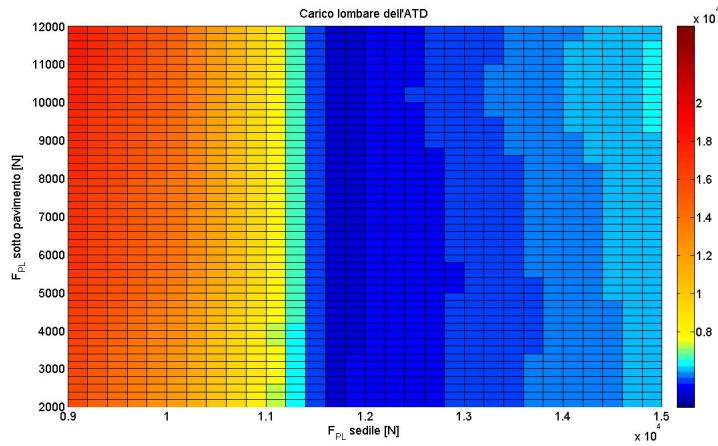


Figure 103: Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 50 kN

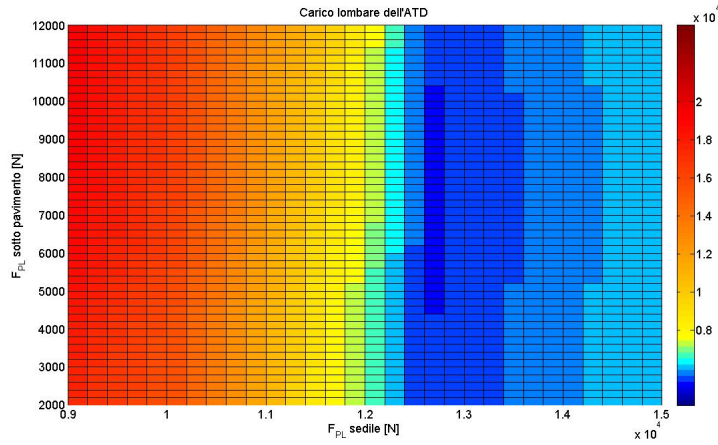


Figure 104: Carico lombare ottenuto per valori del carico limite del carrello pari a 40 kN

Come si può notare dalle immagini riportate nella Figura 101, l'intuizione iniziale era corretta: un carrello con forza limite più elevata tende ad aumentare la zona di sopravvivenza senza trasmettere forze eccessive alla struttura circostante.

È possibile apprezzare meglio il fenomeno sopra descritto, focalizzando l'attenzione sul confronto del carico lombare nella condizione di default e in quella di forza limite a 50 kN.

## 6 Conclusioni

Gli studi presentati in questo lavoro di tesi si riferiscono alla validazione di una tecnica di modellazione capace di inquadrare efficacemente il problema del comportamento in caso di crash di una struttura elicotteristica e di dare valide indicazioni sul design dei dispositivi di assorbimento di energia di impatto.

La tecnica adottata per la definizione del modello numerico è quella multibody. Questa metodologia ha permesso di ottenere una struttura in grado di rappresentare al meglio la realtà, alla luce dei risultati ottenuti dalla fase di validazione. Questa fase di investigazione è stata portata avanti considerando differenti condizioni d'impatto, al fine di identificare le condizioni più critiche di uno scenario di crash.

Le analisi hanno poi condotto, nei capitoli finali, a considerare una struttura completa di elicottero, comprensiva di sedili Martin Baker, sotto pavimento, carrello di atterraggio crashworthy e manichino antropomorfo Hybrid II.

Come accennato più volte all'interno di questa monografia, sono state prese in considerazione solo condizioni di impatto puramente verticali. Questa limitazione non va però vista in senso restrittivo dato che il carico lombare dei passeggeri risulta principalmente affetto da accelerazione e carichi trasferiti al corpo lungo una direzione verticale durante un crash. Inoltre tale scelta ha permesso di esaminare il comportamento delle intersezioni del sotto pavimento, del dispositivo di attenuazione del sedile, del carrello d'atterraggio e soprattutto gli effetti dell'interazione tra tutti gli stadi di assorbimento d'energia di volta in volta considerati.

Per approfondire ancora di più il concetto dell'interazione tra i diversi dispositivi anti crash sono state sviluppate diverse analisi di sensitività, la prima delle quali ha riguardato la variazione della velocità di impatto che è stata aumentata di volta in volta fino a raggiungere un valore massimo di 11 m/s. Per ogni valore considerato della velocità verticale, il carico lombare ha dimostrato una certa sensibilità alla corsa dell'assorbitore del sedile. Ciò è risultato ancora più accentuato nella situazione di raggiungimento del fine corsa. In questi casi, infatti, è stata sempre registrata una ripida crescita del carico lombare dell'ATD, spesso più elevata del limite massimo tollerabile imposto dalle normative vigenti.

In generale si è osservato che i valori più bassi del carico lombare sono stati ottenuti considerando valori della forza di attivazione degli incroci del sotto pavimento pari a 5000 N; questa condizione permette, infatti, lo sfruttamento della maggior parte della corsa di questi elementi.

Dall'altra parte risulta difficile fissare il punto di progetto riguardante il dispositivo del sedile. Questa considerazione è giustificata dal fatto che i carichi lombari minimi sono stati sempre ottenuti per valori della forza di attivazione tali da rendere incombente il raggiungimento della condizione di fine corsa. Per questo motivo risulta necessario considerare alcuni margini di sicurezza.

Questi risultati preliminari sono stati presentati nel quarto capitolo e, anche se ricavati a partire da un modello semplificato, hanno permesso di ottenere importanti informazioni riguardanti l'interazione dei differenti assorbitori di energia. Tali considerazioni sono state poi applicate al

modello più complesso descritto all'interno del quinto capitolo, risultando comunque di indubbia efficacia.

All'interno di quest'ultima fase sono state svolte altre analisi di sensitività allo scopo di confermare le indicazioni viste precedentemente e di ricaverne di nuove, legate soprattutto all'aggiunta del terzo stadio di assorbimento dell'energia d'impatto rappresentato dal carrello di atterraggio.

Grazie all'ottimizzazione di tutto l'insieme dei sistemi di assorbimento è stato quindi possibile migliorare la probabilità di sopravvivenza in caso di crash, anche per velocità di caduta molto elevate (11 m/s). Infatti, considerando quest'ultima condizione, la più gravosa per l'intera struttura, è stato possibile individuare una serie di parametri in grado di garantire la sopravvivenza degli occupanti e i risultati raggiunti sono tali da far pensare di poter raggiungere anche condizioni più estreme.

Un'ultima osservazione degna di nota riguarda il livello di fattibilità di tale progetto. Gli interventi proposti in questo lavoro di tesi, infatti, non stravolgono il progetto generale del velivolo ma si limitano ad aggiungere un sedile anticrash con attenuatori leggermente più duri di quelli standard, un subfloor dello spessore di 10 cm ed un ammortizzatore di cui è stata leggermente modificata la legge di carico. Tali accorgimenti potrebbero facilmente costituire un efficace retrofit su elicotteri già esistenti, migliorando notevolmente le caratteristiche di sicurezza passiva nel campo degli aeromobili ad ala rotante.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Cacchione B. “A hybrid modelling technique for the energy absorption capabilities of a crashworthy helicopter structure”. Dicembre 2010. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano. Tesi di Dottorato.
- [2] Jackson E.K., Fasanella E.L., Boitnott R.L., McEntire J., Lewis A. “Occupant responses in a full-scale crash test of the Sikorsky ACAP helicopter”. Giugno 2002. Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- [3] Astori P. “Multibody simulations for helicopter crashworthiness and experimental results”. Settembre 1996. 22nd European Rotorcraft Forum. Brighton, UK.
- [4] Lanzi L., Airoldi A., Cacchione B., Astori P. “Direct search of feasible region and application to a crashworthy helicopter seat”. Structural and Multidisciplinary Optimization. Febbraio 2011. Bristol, UK.
- [5] Astori P., Ceresa P., Morandini M. “Numerical optimization of a seat energy absorber”. Marzo 2003. Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Delft, NL.
- [6] Alguadich S. “HeliSafeTA helicopter occupant safety technology application – Test report: results of a full-scale test #3”. Novembre 2007. Laboratori CIRA, Capua.
- [7] Astori P. “HeliSafeTA helicopter occupant safety technology application – VEDY-AC and HKS/ABAQUS cabin/cockpit model validation studies”. Febbraio 2006. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano.
- [8] Astori P. “Full-scale helicopter crash landing test and multibody analysis”. Luglio 1997. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano.
- [9] Military standard. MIL-STD-1290(AV), “Light Fixed and Rotary-Wing aircraft Crash Resistance”. September 1988. Washington, DC, Department of Defense.
- [10] Joint Aviation Regulations. JAR 29, “Large Rotorcraft”. December 1993.
- [11] Coltman JW. “Rotorcraft crashworthy airframe and fuel system technology development program”. October 1994. Washington, DC, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- [12] Fox RG. “Helicopter crashworthiness, in new approaches\and answers to aviation safety”. April 19-21 1989. Proceedings of the 34th Corporate aviation seminary.

- [13] Anghileri M. “Dispensa del corso di Sicurezza Passiva”. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano.
- [14] Astori P., Van Tooren M., Verhoef S. “Load reduction in safety belts for general aviation restraint system”. 4th International KRASH User’s Seminar (IKUS4). Amsterdam (NL) 2003.
- [15] Fracasso E. “Sviluppo di un modello numerico di manichino antropomorfo Hybrid III per lo studio di incidenti che coinvolgono l’uomo”. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano. Anno Accademico 2004-2005.
- [16] Oldani E., Fracasso E., Castelletti L.M., Anghileri M. “Development of a numerical model of an anthropomorphic test device for the study of human related impact events”. 5th Ls-DYNA User’s Conference. Birmingham (UK) Maggio 2005.
- [17] Anghileri M., Castelletti L.M., Fracasso E. “Numerical model of anthropomorphic test devices to investigate human related impact events”. 31st European Rotorcraft Forum. Firenze (I) Settembre 2005.
- [18] Anghileri M., Castelletti L.M., Fracasso E. “Hybrid III numerical model for aircraft seat crash performance assessment”. Journal of Aircraft. Settembre- Ottobre 2007.
- [19] EASA Annual Safety Review 2009, European Aviation Safety Agency. <http://easa.europa.eu/communications/general-publications.php>
- [20] Astori P., “Crashworthiness”, Milano, Italia, Dipartimento di ingegneria Aerospaziale.
- [21] Surini A., Nicolotti M. “Analisi sperimentale e numerica della sicurezza passive di un moderno sottopavimento di elicottero”. Anno accademico 2010-2011. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano. Tesi di Laurea Magistrale.
- [22] Tognoli M. “Analisi d’impatto verticale di elicotteri con tecniche numeriche ibride”. Anno accademico 2009-2010. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano. Tesi di Laurea Magistrale.
- [23] Kohrs B., Hajek F. “HeliSafe Helicopter Occupant Safety – Crash scenario”. Giugno 25, 2000. Autoflug GmbH & Co.