

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale e dell'Informazione Dipartimento di Scienze  
e Tecnologie Aerospaziali Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria  
Aeronautica



## **COMPORTAMENTO DINAMICO GLOBALE DI UNA MOTOCICLETTA A SEGUITO DI UN CRASH TEST E VALUTAZIONE DI ALCUNI SCENARI DI IMPATTO CON ATTENZIONE AL SISTEMA AIRBAG MOTOCICLISTA**

Relatore: Prof. Marco Anghileri

Correlatore: Dr. Sergio Marco Bassi

Tesi di Laurea Magistrale di:

Fabio Musicco – ID: 858409

Anno Accademico 2019/2020



# Sommario

Al giorno d'oggi, la sicurezza stradale ricopre un ruolo fondamentale per stabilire i parametri da rispettare nella progettazione di strutture per garantire la protezione degli esseri umani coinvolti in fenomeni di crash. Attraverso diversi studi sulla casistica degli incidenti, si è riusciti ad individuare accessori e sistemi di protezione che garantiscano, per quanto essa possa essere fattibile, l'incolumità dei passeggeri e dei guidatori. Per far fronte alla risoluzione di questi problemi, la sicurezza passiva è di primaria importanza nello studio dei crash. Si è pensato che il sistema di sicurezza passiva per eccellenza usato nelle autovetture, l'airbag, potesse essere "trasportato" anche nel mondo dei veicoli a due ruote. Sebbene la maggior parte dei test sugli airbag siano legati all'ambito automobilistico, la presenza di nuove soluzioni tipo airbag per motociclisti ha imposto la verifica anche di queste tramite prove sperimentali su motociclisti. A tal proposito, sono state sviluppate controparti numeriche dei manichini antropomorfi utilizzati nei test e sono stati sviluppati alcuni modelli di automobili e motociclette che riproducano fedelmente i modelli reali in tutte le loro parti. Lo scopo di questa tesi è analizzare il corretto comportamento strutturale della motocicletta che si verifica a seguito di un impatto dopo una fase di miglioramento e valutare alcuni scenari di impatto tipici del contesto cittadino contro un modello semplificato di autovettura con particolare attenzione ai tempi di apertura caratteristici degli airbag per valutare quanto un airbag possa aiutare in questi tipi di impatto. Verranno analizzati tre tipi di impatto che rappresentano gli incidenti più comuni in ambito cittadino seguendo alcune statistiche sul numero e sulla natura degli incidenti nella maggior parte delle città italiane più rilevanti.

# Indice

<b>Capitolo 1: Introduzione</b> .....	1
1.1 Obiettivi.....	1
1.2 Struttura della tesi.....	2
1.2.1 Modello di moto e sua ottimizzazione.....	2
1.2.2 Precarico del modello numerico.....	3
1.2.3 Simulazioni impatto motocicletta-autoveicolo.....	4
1.3 Indici di lesione.....	4
1.3.1 HIC.....	4
<b>Capitolo 2: Stato dell'arte</b> .....	6
2.1 Evoluzione della sicurezza passiva.....	6
2.2 Manichini antropomorfi moderni.....	9
2.3 Modelli ad elementi finiti.....	10

2.4	Airbag per motociclisti.....	11
<b>Capitolo 3: Normativa .....</b>		<b>14</b>
3.1	Airbag.....	14
3.2	Preparazione della prova.....	15
3.2.1	Definizioni di condizioni di impatto .....	15
3.2.2	Requisiti necessari per la validazione del test.....	18
<b>Capitolo 4: Ottimizzazione modello di motocicletta per crash test.....</b>		<b>20</b>
4.1	Modello motocicletta.....	20
4.1.1	Modello motocicletta reale.....	20
4.1.2	Modello motocicletta numerico.....	21
4.2	Analisi e modifiche .....	22
4.2.1	Analisi sperimentali .....	22
4.1.2	Modifiche strutturali.....	24
4.3	Risultati .....	31
<b>Capitolo 5: Manichino antropomorfo.....</b>		<b>33</b>
5.1	Caratterizzazione Hybrid III.....	34
5.2	Configurazione manichino.....	35
5.2.1	Unità di misura ed offset.....	35

5.2.2	Posizionamento globale del manichino .....	36
5.2.3	Posizionamento arti del manichino .....	37
5.3	Casco.....	39
5.4	Definizione Contatti .....	40
5.2.1	Contatti tra manichino e motocicletta .....	41
5.2.2	Spotweld .....	41
5.5	Precarico del modello.....	43
5.5.1	Terminazione Dynamic Relaxation .....	43
5.5.2	Parametri richiesti per la Dynamic Relaxation .....	44
5.6	Dynamic Relaxation del modello .....	45
<b>Capitolo 6: Analisi FEM dei crash test .....</b>		<b>47</b>
6.1	HIC <sub>36</sub> .....	47
6.2	Configurazione impatto.....	48
6.2.1	Modellazione prova a 135°.....	49
6.2.2	Modellazione della prova a 90° .....	50
6.2.1	Modellazione della prova a 90° con motocicletta ferma.....	50
6.3	Fotogrammi simulazioni.....	51
6.3.1	Impatto a 135° .....	52

6.2.2	Impatto a 90° autovettura ferma .....	55
6.2.1	Impatto a 90° motocicletta ferma .....	57
<b>Capitolo 7: Risultati e conclusioni .....</b>		<b>60</b>
7.1	Sviluppi futuri .....	62





# Elenco delle figure

1.1	Modello di moto iniziale .....	3
2.1	Curva di Eiband per accelerazioni verticali .....	7
2.2	Sierra Sam, il primo manichino antropomorfo .....	8
2.3	Hybrid III .....	9
2.4	Hybrid III Rigid .....	11
2.5	Zone protette dall'airbag per motociclisti.....	12
2.6	Airbag meccanico con cavo di aggancio .....	13
3.1	Configurazioni incidenti .....	16
3.2	Mappatura OV .....	17
3.3	Mappatura MC .....	17
3.4	Inclinazione asse longitudinale MC rispetto ad OV .....	18
4.1	Kawasaki ZXR 400.....	21
4.2	Modello reale e modello numerico .....	22

4.3	Frames impatto scooter .....	22
4.4	Fase finale impatto scooter.....	23
4.5	Primo impatto modello iniziale e rotazione della forcella .....	25
4.6	Hourglass vs Energia Interna .....	26
4.7	Spessore tubi forcella del modello preliminare prima e dopo la modifica.....	27
4.8	Oscillazione forcella preliminare e forcella modificata .....	27
4.9	Doppio disco e parafango .....	27
4.10	Test parafango con materiale carena .....	28
4.11	Impatto contro un muro del modello.....	29
4.12	Impatto con nuove sospensioni. Si può notare la deformazione del parafango a seguito dell'impatto contro il muro.....	30
4.13	Confronto modello originale/modificato .....	31
5.1	Manichino in posizione eretta .....	33
5.2	Differenze tra i due modelli .....	34
5.3	Vista in pianta, prospetto e profilo del punto H.....	37
5.4.1	Sistemi di riferimento locali gamba destra .....	38
5.4.2	Sistemi di riferimento locali braccio destro .....	38
5.5	Posizionamento manichino.....	39

5.6	Vista frontale e laterale del casco .....	39
5.7	Sistema moto/manichino completo .....	40
5.8	Funzionamento contatti Ls-Dyna.....	41
5.9	Andamento qualitativo curva di gravità .....	43
5.10	Andamento qualitativo curva di gravità della fase di DR .....	45
5.11.1	Confronto fase iniziale e fase finale DR della zona pelvica .....	46
5.11.2	Confronto fase iniziale e fase finale DR piede sinistro .....	46
6.1	Casistica incidenti stradali anno 2010.....	48
6.2	SPC parte autovettura.....	49
6.3	Energia di Hourglass dei test preliminari.....	51
6.4	Energia di Hourglass dei test ufficiali .....	52
6.5	Impatto dopo $t=0.091s$ .....	53
6.6	Interazione manichino autovettura impatto a $135^\circ$ .....	54
6.7	HIC Impatto a $135^\circ$ .....	54
6.8	Impatto dopo $t=0.0565 s$ .....	55
6.9	Interazione manichino autovettura impatto a $90^\circ$ (autovettura ferma).....	56
6.10	HIC Impatto a $90^\circ$ .....	56
6.11	Impatto laterale motocicletta manichino .....	57

6.12	Interazione manichino autovettura impatto a 90° (motocicletta ferma).....	58
------	---	----



# Capitolo 1

## Introduzione

Lo scopo principale di questo capitolo è quello di presentare il lavoro svolto, cercando di chiarire i passi affrontati per raggiungere e conseguire gli obiettivi della tesi.

### 1.1 Obiettivi

Negli ultimi anni la sicurezza ricopre un ruolo di fondamentale importanza nella fase di progettazione delle strutture. I sistemi di sicurezza possono essere divisi in due categorie principali: sistemi di sicurezza attivi e sistemi di sicurezza passivi. I primi hanno l'obiettivo di minimizzare la probabilità che avvenga un fenomeno di crash, mentre i secondi servono a minimizzare le conseguenze una volta che il fenomeno è avvenuto. In campo aerospaziale e automobilistico, uno degli obiettivi principali del progetto è la realizzazione di strutture che garantiscano la salvaguardia di un particolare componente o di uno o più esseri umani a seguito di un impatto. Nel campo motociclistico, la struttura difficilmente può salvaguardare la salute dell'essere umano. Quindi, accessori come casco o paraschiena sono diventati essenziali per l'incolumità fisica o per la riduzione di danni causati da un qualsivoglia tipo di incidente. L'accresciuta importanza della degli aspetti relativi alla sicurezza richiede l'uso di strumenti sempre più sofisticati per valutare la sopravvivenibilità. In questo contesto sono possibili due approcci differenti: test sperimentali e simulazioni numeriche. Nei test sperimentali per indagare la biomeccanica del corpo umano a seguito di fenomeni di impatto vengono utilizzati manichini

antropomorfi; questi ultimi permettono di valutare in modo accurato alcuni parametri significativi legati al fenomeno di impatto in esame. Per effettuare prove sperimentali è però necessario sostenere costi economici legati all'equipaggiamento e al laboratorio che, essendo molto alti, rappresentano uno svantaggio importante. Al contrario le simulazioni numeriche sono più economiche e l'aumento della potenza di calcolo disponibile ha reso sempre più efficace l'utilizzo di queste simulazioni, che permettono di valutare una grande quantità di parametri impiegando una minor parte di tempo e di costo rispetto alle prove sperimentali. Entrambe le tipologie di test sono comunque importanti nello studio di un qualsiasi fenomeno perché essi si completano tra di loro, facendo sì che si ottengano i migliori risultati possibili. Nello studio di problematiche di crash è molto comune l'utilizzo di solutori ad elementi finiti con integrazione esplicita nel tempo. Questi codici sono particolarmente adatti per l'analisi di fenomeni ad alta energia di breve durata.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di simulare un impatto tra una motocicletta sportiva ed un autoveicolo in ambito cittadino, andando ad analizzare il comportamento della struttura della motocicletta cercando di migliorare il modello di moto disponibile e cercando di valutare alcuni scenari tipici di impatto, ponendo particolare attenzione ai tempi di apertura dell'airbag. In particolare, il secondo aspetto riveste un'importanza notevole nel mondo degli airbag per motociclette, dispositivi che vengono indossati dal guidatore al fine di aumentare la sicurezza sul veicolo e di salvaguardare il più possibile gli organi vitali coinvolti in un impatto di qualsiasi genere.

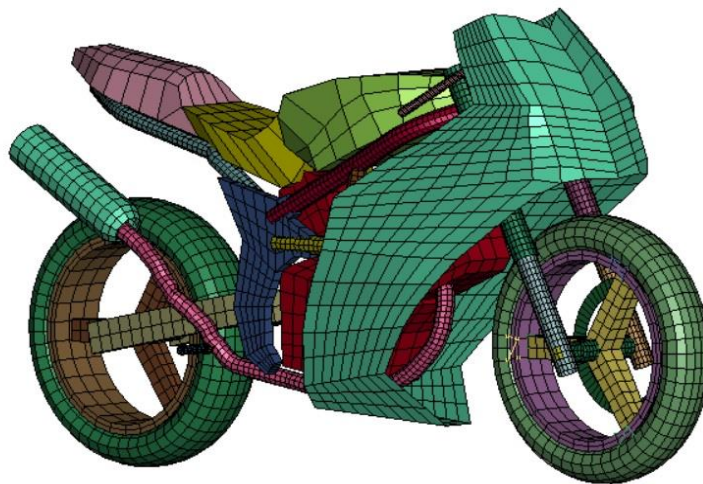
Il solutore a elementi finiti usato in questa tesi è LS-DYNA. Questo codice è molto diffuso in campo aerospaziale, automobilistico e industriale; il suo scopo principale è quello di studiare fenomeni dinamici altamente non lineari tramite integrazione esplicita nel tempo. Questo codice è in grado di gestire grandi deformazioni, non linearità nei comportamenti dei materiali e cambiamenti nelle condizioni al contorno. Solitamente viene utilizzato per studiare fenomeni che coinvolgono alte velocità ed energie per brevi periodi di tempo come impatti ed esplosioni.

## 1.2 Struttura della tesi

### 1.2.1 Modello di moto e sua ottimizzazione

Il capitolo 3 dell'elaborato riguarda l'ottimizzazione di un modello di moto precedentemente sviluppato. L'obiettivo è quello di garantire un comportamento fisico accettabile in modo tale che vengano riprodotti

correttamente gli aspetti globali principali di un evento di crash di un motociclo reale. Per fare ciò, si è simulato un impatto perpendicolare della motocicletta contro un muro rigido verticale. I risultati sono stati paragonati alle prove sperimentali effettuate presso il La.S.T. su un motociclo, così da confrontare il comportamento dinamico globale della struttura a seguito dell'impatto, in modo tale da capire come si comporta generalmente un veicolo a due ruote in caso di incidente. Questi test sono stati effettuati su un Liberty Piaggio, un classico scooter da città, a cui è stata data una velocità iniziale. Esso è stato fatto impattare contro una superficie rigida per capirne il comportamento nel corso di un fenomeno di impatto. Successivamente, analizzando in maniera approfondita la parte anteriore del veicolo, sono stati fatti i vari confronti con il modello numerico progettato in un elaborato precedente, il quale presentava una motocicletta rappresentata in maniera approssimata (Figura 1.1). Il modello è stato quindi definito in maniera più dettagliata sia dal punto di vista geometrico che dal punto di vista funzionale, cercando di avvicinarsi quanto più possibile al modello reale in termini di peso e caratteristiche tecniche.



*Figura 1.1: Modello di moto iniziale*

## 1.2.2 Precarico del modello numerico

Fatte le dovute modifiche, nel Capitolo 5 il modello è stato sottoposto ad un precarico iniziale. Il modello di manichino, per riprodurre correttamente la controparte reale, ha bisogno di una fase di assestamento. Per risolvere questo problema sono state effettuate numerose simulazioni numeriche volte a migliorare la risposta del modello tramite una fase di *dynamic relaxation*, in cui il modello intero, quindi manichino e motocicletta, si assesta a seguito della forza di gravità.



### 1.2.3 Simulazioni impatto motocicletta-autoveicolo

Il capitolo 5 dell'elaborato è incentrato sull'esecuzione di una prova numerica di impatto motociclo con manichino contro autoveicolo; per questa prova è stato assemblato un modello numerico che permette di ottenere buoni risultati con tempi di calcolo ritenuti adeguati. Le diverse configurazioni di impatto sono state estrapolate dalla normativa sugli impatti stradali, andando a rispettare tutti i vari requisiti necessari ed analizzando le statistiche riguardanti gli scenari di impatto tipici in ambito cittadino.

## 1.3 Indici di lesione

I manichini antropomorfi permettono la valutazione di un gran numero di parametri tra cui forze, momenti, accelerazioni e spostamenti. Gli indici di lesione nascono dalla necessità di correlare le misure effettuate durante le prove con la probabilità di subire lesioni. Conoscendo accelerazioni, forze e momenti applicati in specifici punti è possibile calcolare l'indice di lesione che più si adatta alla prova in esame. La relazione che lega un particolare valore di un indice di lesione con quelle effettivamente riportate, deriva da prove effettuate su cadaveri, animali e volontari dalle quali è stato possibile misurare le grandezze di interesse e valutare approfonditamente le lesioni subite.

### 1.3.1 HIC

L'HIC – Head Injury Criterion – è il criterio di lesione più diffuso per impatti che coinvolgono direttamente la testa. Per calcolare l'HIC è necessario conoscere le storie temporali delle accelerazioni che agiscono sul baricentro della testa.

La probabilità di riportare una lesione è legata all'HIC tramite l' AIS – Abbreviated Injury Scale – e il valore massimo accettabile è 1000. Questo valore corrisponde ad una probabilità dell'80% di riportare una lesione con AIS minore di 3. La relazione completa tra HIC e AIS è mostrata in Tabella 1.1.

L' AIS è un sistema sviluppato dall' AAAM – Association of Advancement of Automotive Medicine – che permette di classificare la severità delle lesioni. La classificazione avviene secondo una scala che parte da un valore minimo di 1, corrispondente ad una lesione minore, fino ad un valore massimo di 6, corrispondente ad una lesione letale:

- AIS 1 – Lesione minore – Lesioni cerebrali leggere con mal di testa, lesioni cervicali leggere, colpo di frusta, vertigini, perdita di conoscenza, presenza di abrasioni e contusioni.
- AIS 2 – Lesione moderata – Commozione cerebrale con o senza fratture craniche, meno di quindici minuti di incoscienza, piccole rotture corneali, distacco della retina, fratture del viso o del naso.
- AIS 3 – Lesione seria – Commozione cerebrale con o senza fratture craniche, più di quindici minuti di incoscienza, perdita della vista, frattura esposta del viso, frattura cervicale senza danni al midollo spinale.
- AIS 4 – Lesione grave – Frattura del cranio composta o scomposta con gravi lesioni neurologiche.
- AIS 5 – Lesione critica – Commozione cerebrale con o senza frattura cranica, più di dodici ore di incoscienza, emorragia cranica, indicazioni neurologiche critiche.
- AIS 6 – Lesione mortale – Morte, parziale o totale danno del tronco cerebrale, frattura e/o lacerazione della parte superiore del collo con lesioni del midollo spinale.

La relazione tra AIS ed HIC è la seguente:

<b>HIC</b>	<b>AIS</b>	<b>Livello di lesione del cervello e della testa</b>
135-519	1	Mal di testa o vertigini
520-899	2	Perdita di conoscenza per meno di 1 ora - frattura lineare
900-1254	3	Perdita di conoscenza da 1 a 6 ore – frattura depressa
1255-1574	4	Perdita di conoscenza da 1 a 24 ore – frattura aperta
1575-1859	5	Perdita di conoscenza per più di 25 ore – ematoma diffuso
>1860	6	Non sopravvivibile

*Tabella 1.1: HIC-AIS*

# Capitolo 2

## Stato dell'arte

Nell'ultimo secolo la sicurezza passiva ha avuto uno sviluppo molto importante; in questo capitolo è brevemente presentata l'evoluzione dai primi studi sui crash test fino ai moderni modelli a elementi finiti di essere umano. Inoltre, verrà introdotto il concetto di airbag e come esso sia stato trasportato nel mondo delle motociclette. Infine, verrà brevemente descritto il tipo di manichino usato durante le analisi: Hybrid III Rigid [1], manichino antropomorfo utilizzato per il modello ad elementi finiti.

### 2.1 Evoluzione della sicurezza passiva

La necessità di avere strumenti per investigare il comportamento degli esseri umani durante eventi di crash nasce all'inizio del Novecento. In quel periodo, l'utilizzo delle prime automobili disponibili esponeva il corpo umano a impatti molto più severi di quelli che si verificavano abitualmente in precedenza. In aggiunta le automobili non prevedevano alcun tipo di sistema di sicurezza, rendendo gli incidenti spesso fatali [2].

I primi crash test vennero svolti utilizzando cadaveri, animali e volontari. I test con i cadaveri presentavano alcuni problemi: in primo luogo problemi etici legati all'utilizzo di cadaveri e, in secondo luogo, i cadaveri non rappresentavano un campione significativo della popolazione dato che erano principalmente anziani caucasici deceduti per cause naturali (FONTE). Per

queste ragioni i test sui cadaveri vennero presto abbandonati e la stessa cosa successe con i test sugli animali a seguito di alcune proteste mosse da associazioni animaliste [3]

Molto importante fu il contributo del colonnello John Paul Stapp della US Air Force, considerato da molti uno dei pionieri nell'ambito dei crash test. Nello sviluppo della sua ricerca condusse moltissimi esperimenti su volontari e su se stesso, con l'obiettivo di indagare la risposta del corpo umano durante fenomeni di impatto.

Nel 1959 Martin Eiband creò una serie di curve di tolleranza alle accelerazioni utilizzando dati presenti in letteratura (Figura 2.1) [4]. Le curve, conosciute come curve di Eiband, sono divise in tre zone: una prima zona in cui le accelerazioni applicate non provocano alcun danno all'occupante, una seconda zona in cui l'occupante subisce lesioni moderate ma non si trova in pericolo di vita e una terza zona in cui le lesioni riportate risultano essere critiche o fatali. La maggiore limitazione di queste curve è legata al fatto che i dati riguardanti lesioni severe sono ricavati principalmente da test sugli animali e quindi la loro biofedeltà risulta essere limitata. Un'altra importante limitazione è che queste curve non forniscono alcuna indicazione sulla localizzazione precisa delle lesioni riportate, ma danno solamente un'indicazione globale sulla sopravvivenibilità.

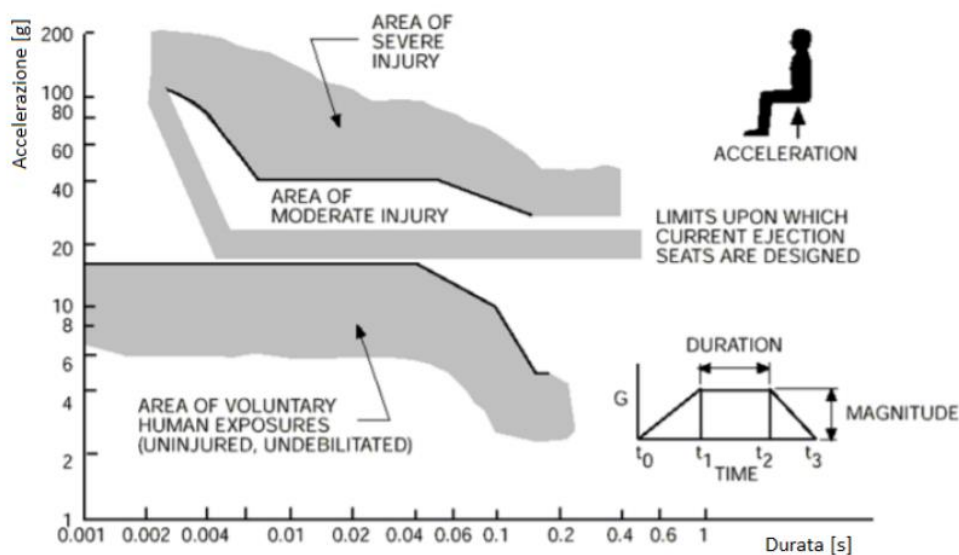


Figura 2.1: Curva di Eiband per accelerazioni verticali

Per quanto riguarda invece l'utilizzo di manichini, già nel 1949 Samuel W. Alderson in collaborazione con la Sierra Engineering Co. creò il primo manichino antropomorfo che venne chiamato Sierra Sam (Figura 2.2). Il suo scopo era quello di essere utilizzato nella fase di test di sedili eiettabili e

imbracature per applicazioni militari. Sierra Sam venne costruito basandosi su dati antropometrici derivanti da 'Anthropometry of USAF Personnel' e rappresentava un uomo più alto e più pesante del 95% della popolazione maschile [5]. La strumentazione di bordo era molto limitata e permetteva di misurare unicamente tre accelerazioni ortogonali agenti sul baricentro della testa. Per questo motivo e per la sua limitata biofedeltà, Sierra Sam venne presto sostituito con manichini antropomorfi più adatti per studiare fenomeni di crash in ambito aeronautico e automobilistico. Gli sviluppi introdotti in seguito includono la creazione di modelli che rappresentano diverse fasce di popolazione, il miglioramento della biofedeltà e l'implementazione di un numero sempre maggiore di sensori, permettendo così l'identificazione di un grande numero di parametri di interesse.



*Figura 2.2: Sierra Sam, il primo manichino antropomorfo*

## 2.2 Manichini antropomorfi moderni

Nel 1971 gli ingegneri della General Motors Company crearono l'Hybrid I, un manichino antropomorfo che combinava le migliori caratteristiche dei vari modelli presenti sul mercato; l'Hybrid I rappresentava un uomo più alto e pesante del 50% della popolazione maschile. Questo manichino venne sostituito un anno dopo; nel 1972 venne creato l'Hybrid II che presentava un sostanziale miglioramento nella strumentazione di bordo, ma non permetteva di prevedere la presenza di lesioni come conseguenza di un fenomeno di crash. Per rispondere a questa necessità nel 1976 venne creato l'Hybrid III (Figura 2.3): il comportamento della testa di questo manichino è simile a quello di una testa umana, la spina dorsale è curva e permette di ottenere una postura realistica nei test in cui si deve rappresentare un occupante; le articolazioni sono modellate in modo da massimizzare la ripetibilità delle prove e le spalle sono modellate in modo tale che l'imbracatura tramite cintura di sicurezza risulti efficace; la possibile strumentazione installabile sull'ATD è stata ampliata permettendo di misurare un massimo di 44 canali tra cui accelerazioni, forze, momenti e spostamenti.

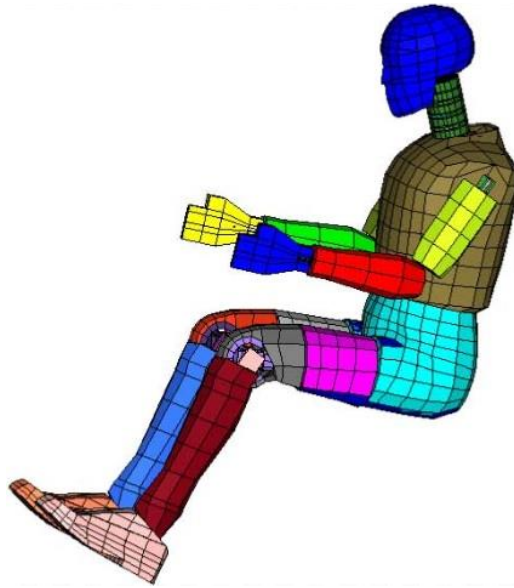


*Figura 2.3: Hybrid III*

L'Hybrid III, attualmente sviluppato da Humanetics Innovative Solutions, è ancora il manichino antropomorfo maggiormente utilizzato; viene usato nell'industria automobilistica e aerospaziale per valutare sistemi di protezione degli occupanti e sopravvivenibilità agli impatti. Questo manichino è richiesto per test certificativi di impatto frontale per tutte le autovetture commercializzate negli USA e in alcuni altri paesi [6].

## 2.3 Modelli a elementi finiti

Con il continuo sviluppo di solutori agli elementi finiti e la loro diffusione nella fase di design in tutti i settori industriali, si è reso necessario lo sviluppo di modelli a elementi finiti di manichino. Questi, in combinazione con modelli di sedile, cinture di sicurezza e automobile, vengono utilizzati per riprodurre test sperimentali in un ambiente virtuale. I principali vantaggi delle simulazioni numeriche risiedono nell'enorme riduzione di tempi e costi derivanti dalla preparazione ed esecuzione dei test sperimentali. Attualmente il miglioramento delle prestazioni dei calcolatori permette di ridurre drasticamente il numero di test in laboratorio in favore di un numero sempre maggiore di simulazioni numeriche. Così facendo, è possibile effettuare pochi test sperimentali che, sulla base delle simulazioni numeriche, risultano più accurate. I modelli a elementi finiti di manichino sono migliorati fino a diventare molto complessi e, allo stato attuale, sono in grado di riprodurre con un buon grado di affidabilità il comportamento dei manichini reali. In questa tesi è stato utilizzato un manichino sviluppato da LSTC – Livermore Software Technology Corporation – e, precisamente, un Hybrid III 50th percentile RIGID. Il termine RIGID sta a significare che questo manichino antropomorfo è semi-deformabile. Nonostante ciò, il nome potrebbe creare confusione; è stato quindi aggiunto il termine FAST, il quale si riferisce al costo computazionale non eccessivo a seguito del suo numero di elementi ridotto (13400 contro i 425000 di un Hybrid III 50th percentile male). (Figura 2.4). In questo modello le articolazioni sono modellate attraverso schemi di vincolo gestibili dal software, con range di movimento simili a quelli reali e i contatti tra i vari sottosistemi sono realizzati tramite algoritmi di contatto in grado di riprodurre correttamente la mutua interazione tra le parti costituenti il modello numerico di ATD.



*Figura 2.4: Hybrid III Rigid*

## 2.4 Airbag per Motociclisti

L'evoluzione dei dispositivi di sicurezza in ambito motociclistico ha riguardato tutti gli aspetti della protezione del motociclista. Per quanto riguarda l'abbigliamento, ogni singolo capo o accessorio è stato oggetto di sviluppo e miglioramenti [7]: tra questi, un componente particolare che ha fatto passi da gigante negli ultimi anni è l'airbag indossabile. Il primissimo brevetto di airbag risale al 1952, ma è dagli anni '70 che ha cominciato ad equipaggiare le automobili non senza un grande seguito di critiche ed incertezze sulla sua effettiva funzionalità [8].

Negli anni il sistema è stato perfezionato al punto da essere montato non più solo nel volante ma anche nelle portiere, nei montanti, a protezione di più ampie parti del corpo e addirittura all'esterno dall'abitacolo, per proteggere i pedoni. In seguito, la tecnologia è stata rivista per poter essere anche indossata, soprattutto da ciclisti, motociclisti, sciatori e nell'equitazione, sino a diventare obbligatoria nel MotoGP. L'idea, per quanto riguarda il settore moto, è di Lino Dainese e del suo team e risale al 2003, anno in cui sono arrivati i primi prototipi; poi, nel 2006, i test in pista e le prime gare, fino ad arrivare al 2011 con la commercializzazione della prima giacca con airbag [9].

Suddiviso in due principali categorie, meccanico ed elettronico, l'airbag può equipaggiare tute e giacche o essere indossato come gilet sopra o sotto la giacca. A differenza di un normale paraschiena, il quale distribuisce l'energia dell'urto di modo che non si concentri in un unico punto, l'airbag assorbe una quota parte dell'energia così che essa possa contenere i danni arrecati al corpo



del motociclista non solo lungo la schiena, ma anche nella zona lombare e cervicale.



Figura 2.5: Zone protette dall'airbag per motociclisti

I primi modelli di airbag meccanici che, qualche anno fa, hanno portato questo nuovo concetto di sicurezza nel mondo delle due ruote, lavorano in maniera semplice ma efficace: chi guida è connesso alla moto tramite un cavo che, in caso di caduta, si sgancia andando ad azionare il sistema di gonfiaggio della sacca mediante l'azione di una o più bombolette a gas, con un tempo di attivazione intorno ai 200 millisecondi (Figura 2.5). Il sistema è veloce, semplice e attualmente economico. Normalmente si tratta di gilet comodi da indossare sopra alla giacca, di facile manutenzione e quindi decisamente più versatili di una giacca o tuta.

I dispositivi elettronici o *stand alone* sono la versione più evoluta dell'airbag per motociclisti e funzionano grazie a una centralina che controlla sensori, giroscopi e accelerometri; inoltre, attraverso una serie di algoritmi, rileva l'impatto e aziona entro 100 millisecondi l'apertura del cuscino protettivo. Da questa analisi si rileva subito il primo punto a favore dell'elettronico: la velocità di azionamento è minore del 50% rispetto a quella di un dispositivo meccanico, oltre alla precisione e all'affidabilità del funzionamento e alla libertà di non essere agganciati alla moto.



*Figura 2.6: Airbag meccanico con cavo di aggancio*

Di recente, sono stati effettuati degli studi su airbag montati direttamente sulla motocicletta. In precedenza, c'era già stato un brevetto depositato da una casa nipponica specializzata nella produzione di airbag automobilistici. Esso è dedicato allo scooter e la sua peculiarità è una protezione più estesa del solito perché oltre al sacco principale, gonfiato a protezione del tronco di chi guida, è dotato di un'appendice che scende a proteggere la zona delle ginocchia. Ad oggi esiste già una casa motociclistica giapponese che ha commercializzato la prima e, al momento, unica moto che monta un airbag nel cruscotto.

# Capitolo 3

## Normativa

Prima di analizzare il crash vero e proprio, verranno descritte le regolamentazioni presenti al giorno d'oggi ed i criteri da rispettare per effettuare questo tipo di test.

### 3.1 Airbag

La normativa che si occupa dell'omologazione e certificazione degli airbag è la EN1621/4. Gli airbag certificati con questa normativa devono obbligatoriamente riportare in maniera ben visibile il pittogramma che assicura al cliente che il prodotto ha soddisfatto tutti i requisiti di sicurezza. I test riguardano i tipi di materiali utilizzati, i tempi di gonfiaggio, la sensibilità al riconoscimento della situazione di incidente, i test di sgonfiaggio, quelli ergonomici e di comfort eseguiti con il sistema airbag gonfio e sgonfio, e i test dei dispositivi di trattenuta del sistema airbag al corpo. I requisiti di questa normativa sono applicabili a diversi design di protettori gonfiabili esclusivamente meccanici e si riferiscono a tutte le aree del corpo che devono essere protette.

I parametri di performance sono stati selezionati in modo tale da garantire un buon compromesso tra protezione, comfort e praticità. I dispositivi che sono troppo rigidi o pesanti non devono essere indossati.

Questa normativa mette in risalto il minimo livello di protezione, il minimo tempo di gonfiaggio airbag e la minima area di corpo che deve essere coperta dopo il gonfiaggio.

Tra le varie norme descritte, fondamentale per il lavoro svolto è quello che viene definito "*intervention time*": esso è dato dalla somma di due contributi:

1. Tempo di attivazione: è il lasso di tempo usato dal sistema di innescamento per innescare la bomboletta di gas. Esso corrisponde all'intervallo di tempo tra l'inizio dell'incidente e l'inizio del gonfiaggio;
2. Tempo di gonfiaggio: è il lasso di tempo impiegato per gonfiare completamente l'airbag.

Da normativa, questo *intervention time* non deve essere superiore ai 200 ms. Questo vuol dire che ciascuna parte del corpo che l'airbag protegge deve essere salvaguardata in un tempo inferiore. Sarà quindi posta attenzione al tempo necessario al manichino per toccare ostacoli esterni al sistema studiato.

## 3.2 Preparazione della prova

La regolamentazione dei crash test numerici e sperimentali viene affrontata dalla Organizzazione Mondiale ISO (International Organization for Standardization). L'obiettivo principale di questa organizzazione è quello di fornire standard internazionali; in particolare la ISO 13232 si occupa di testare ed analizzare procedure per la valutazione della ricerca di dispositivi di protezione per motociclisti a seguito di crash. Essa è divisa in otto parti, riportate di seguito:

1. Definizioni, simboli e considerazioni generali;
2. Definizione di condizioni di impatto in relazione ai dati sugli incidenti;
3. Manichino antropomorfo per crash test motocicletta;
4. Variabili da misurare, strumentazione e procedure di misurazione;
5. Indici di lesione ed analisi rischi/benefici;
6. Procedure test impatti su vasta scala;
7. Procedure di standardizzazione per performare simulazioni numeriche di crash test di motoveicoli;
8. Documentazione e report.

Le parti inerenti al lavoro di tesi verranno analizzate nei paragrafi successivi.

### 3.2.1 Definizioni di condizioni di impatto

Uno degli scopi della ISO 13232-2 è quello di fornire una base statistica per definire le condizioni del crash test, quindi quali impatti avvengono in maniera frequente nel mondo reale e quali configurazioni di incidenti risultano essere più dannose per il corpo umano. In linea generale, per effettuare un crash tra un motoveicolo ed un autoveicolo, bisogna definire l'angolo di impatto, che è

l'angolo tra la linea centrale dell'autovettura e la linea centrale della moto al momento dell'impatto.

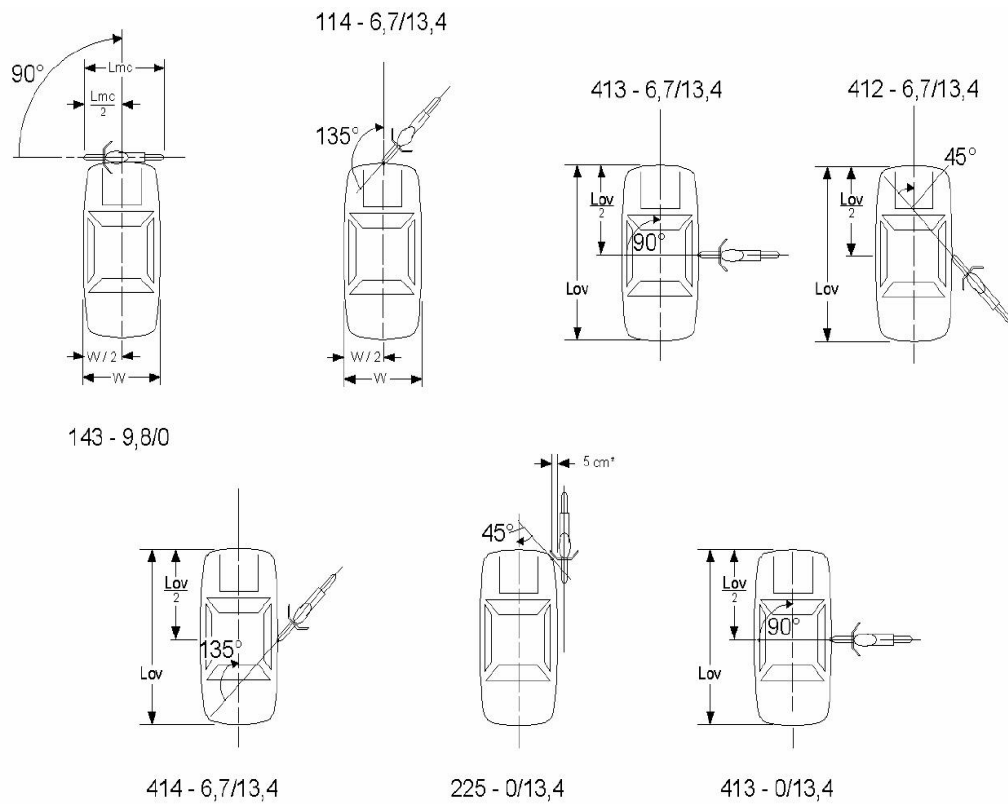


Figura 3.1: Configurazioni incidenti

Una volta definiti i vari angoli di impatto, la normativa prevede alcune condizioni in base al tipo di crash che si vuole affrontare.

Configuration number	OV contact point code (Figure 2)	MC contact point code (Figure 3)	Relative heading angle code (Table 2 & Figure 4)	OV speed m/s	MC speed m/s
1	1	4	3	9,8	0
2	2	1	4	6,7	13,4
3	4	1	3	6,7	13,4
4	4	1	2	6,7	13,4
5	4	1	4	6,7	13,4
6	2	2	5	0	13,4
7	4	1	3	0	13,4

Tabella 3.1: Possibili combinazioni incidenti

Queste sette condizioni riguardano la velocità che entrambi i veicoli devono avere ed i punti di impatto che possono essere analizzati.

I numeri nella tabella corrispondono ai codici che ogni zona di ciascun veicolo possiede. In particolare, per l'autovettura, la mappatura è la seguente:

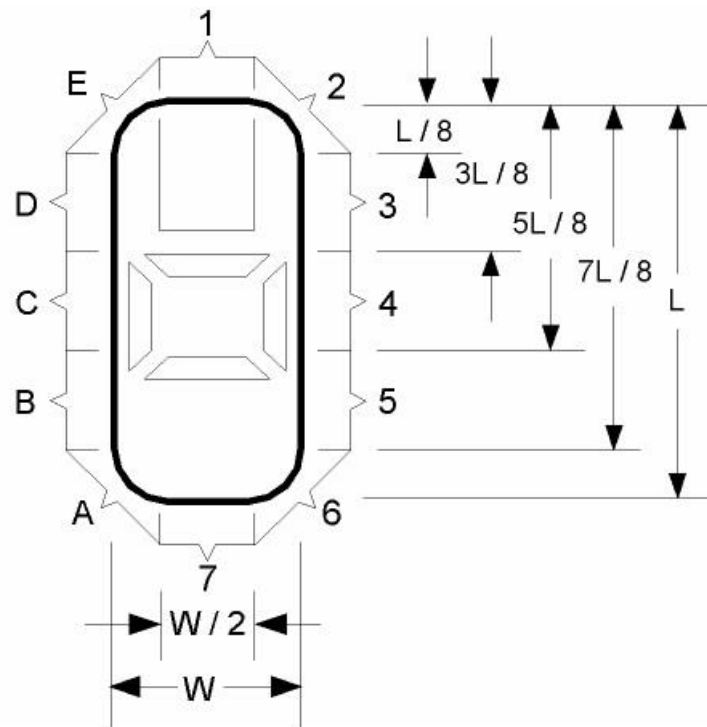


Figura 3.2: Mappatura OV

Dove L e W sono rispettivamente la lunghezza e la larghezza del veicolo.

Per la motocicletta:

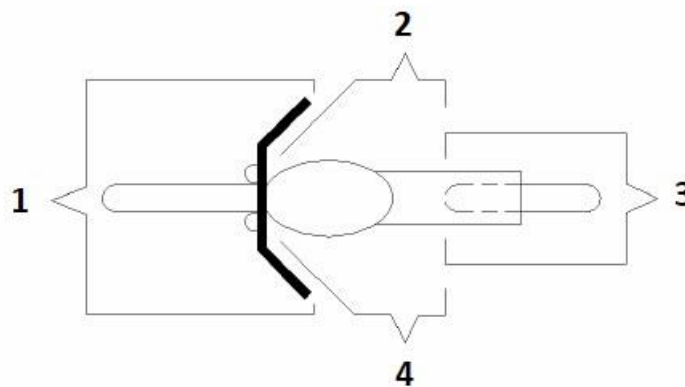


Figura 3.3: Mappatura MC

Di seguito, vengono illustrati i vari angoli di impatto citati nella quarta colonna della tabella X:

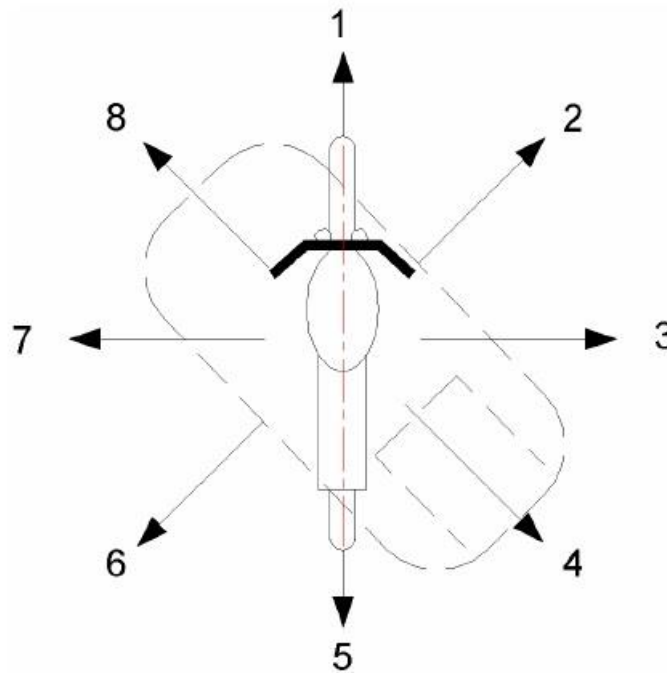


Figura 3.4: Inclinazione asse longitudinale MC rispetto ad OV

### 3.2.2 Requisiti necessari per la validazione del test

La ISO 13232-7 elenca quali sono i “minimum bodies” che devono essere presenti nel modello numerico per far sì che il test sia conforme alla normativa. In particolare, essa fornisce:

1. Convenzioni per calibrare e documentare gli aspetti importanti del modello usato per la simulazione;
2. Linee guida per la definizione e l'uso di modelli matematici per crash test numerici, i quali possono essere correlati con i test sperimentali;
3. Un mezzo per identificare altre configurazioni di impatto per test sperimentali;

Il modello di simulazione deve essere basato su principi matematici e fisici accettabili. Esso deve consistere in una parte che discretizza la motocicletta (MC) e il veicolo opposto (OV), il manichino antropomorfo, il suo posizionamento, il casco e la strada. Nel modello numerico possono variare i seguenti parametri in accordo con la sezione della normativa precedentemente descritta (ISO 13232-2):

- Velocità di impatto MC;
- Velocità impatto OV;

- Punto di contatto MC;
- Punto di contatto OV;
- Angolo relativo tra MC ed OV;

Vengono anche descritte le minime parti che un manichino deve possedere per la validazione del test:

DUMMY	MC	OV
Casco	Ruota frontale	Corpo sospeso
Collo	Ruota posteriore	
Torso superiore ed inferiore	Telaio principale	
Gamba destra e sinistra	Assemblamento forcella superiore	
Piede destro e sinistro	Assemblamento forcella inferiore	
Mano destra e sinistra		
Braccio destro e sinistro		

*Tabella 3.2: Parti necessarie manichino, moto, autovettura*

Nel prossimo capitolo sarà affrontato il miglioramento del modello di moto dal punto di vista geometrico e verrà testato il modello contro un muro per verificarne l'affidabilità del comportamento globale.



# Capitolo 4

## Ottimizzazione modello di motocicletta per crash test

L'obiettivo del seguente lavoro è sviluppare e migliorare il modello FEM di motocicletta in modo tale da garantire un corretto comportamento della dinamica strutturale del motociclo ed assicurare una corretta riproduzione geometrica della controparte reale.

### 4.1 Modello motocicletta

#### 4.1.1 Modello motocicletta reale

Il modello numerico che verrà usato per i test di impatto sarà basato su una Kawasaki ZXR400 del 1998. Essa è una delle prime motociclette sportive prodotte dalla casa motociclistica giapponese ed è il precursore delle moderne Kawasaki Ninja e Kawasaki ZXR. Essa è caratterizzata dalla posizione di guida caricata sull'avantreno e dalla strumentazione ridotta all'essenziale (Figura 4.1).

Nell'elaborato è stato usato questo tipo di motocicletta in quanto, ad oggi, la maggior parte dei test effettuati a livello cittadino si concentrano verso gli scooter. Avendo invece a disposizione una moto sportiva a tutti gli effetti, è

possibile ampliare la casistica ed il bacino delle conoscenze su eventuali impatti urbani con diverse categorie di motociclette.



*Figura 4.1: Kawasaki ZXR 400*

#### 4.1.2 Modello motocicletta numerico

Al fine di creare una rappresentazione del modello più fedele alla realtà si è ritenuto opportuno utilizzare il programma LS-DYNA, il quale offre un'ampia scelta di materiali e soluzioni che, dal punto di vista numerico, permettono di riprodurre in modo ritenuto adeguato le caratteristiche meccaniche della Kawasaki ZXR400.

Confrontando il modello reale con il modello numerico (Figura 4.2), si evince che la rappresentazione numerica si sia basata sugli elementi ritenuti più influenti nel corso di un fenomeno di crash frontale. Infatti, manca il radiatore, manca la parte elettrica del cruscotto e mancano le geometrie del motore centrale, in quanto esso viene rappresentato con un unico blocco solido.

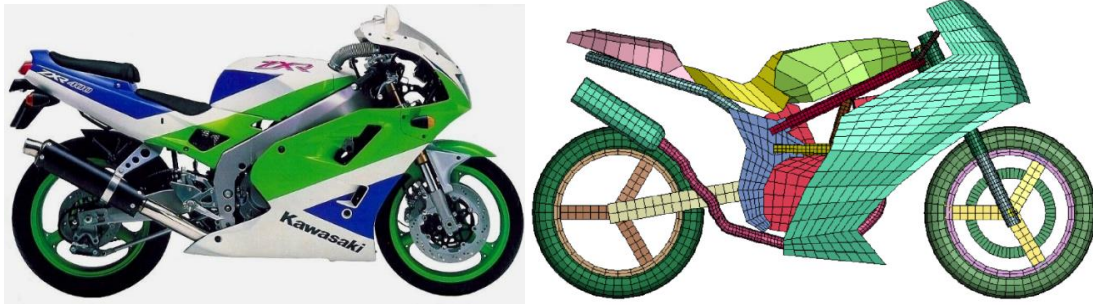


Figura 4.2: Modello reale e modello numerico

## 4.2 Analisi e Modifiche

### 4.2.1 Analisi Sperimentali

Il modello FE disponibile è stato inizialmente utilizzato per lo svolgimento di simulazioni preliminari con l'obiettivo di valutarne il comportamento e identificare oltre agli aspetti su cui lavorare anche i componenti da modificare o introdurre. Poiché non sono stati eseguiti impatti reali col modello di motocicletta a disposizione, il primo passo è stato l'analisi degli impatti di un'altra categoria di motocicli (scooter) effettuati presso il laboratorio La.S.T. del Politecnico di Milano.



Figura 4.3: Frames impatto scooter

Il veicolo analizzato è un Piaggio Liberty 50. Esso ha una massa a vuoto di 112 Kg e viene lanciato ad una velocità di 50 Km/h. Sebbene la categoria di motoveicolo a cui appartiene non è la stessa del modello di motocicletta analizzato in questo elaborato, la dinamica dell'impatto è utile per capire il comportamento globale di un veicolo a due ruote; in particolare i frames saranno utili per capire come interagiscono ruota anteriore e telaio del mezzo, come si comporta la forcella a seguito dell'impatto e come si deforma globalmente la parte anteriore del veicolo. Verrà posta attenzione anche al comportamento del motoveicolo a livello globale e, pertanto, sarà studiata attentamente la componente inerziale dell'impatto.

Da questa prima sequenza di fermo-immagini (Figura 4.3), si evince come, a seguito delle forze inerziali che agiscono per via dell'impatto, lo spostamento del peso del motoveicolo verso la superficie di impatto ed il contatto tra la ruota ed il muro modificano l'angolazione iniziale della forcella facendola ruotare attorno al perno della ruota anteriore. Si nota che l'inclinazione della forcella è quasi perpendicolare al terreno. La gomma interagisce con il telaio del mezzo modificando la sua forma circolare. Il cerchio non subisce deformazioni e la parte inferiore della pedana si rompe a seguito delle due forze che subisce: quella inerente alla componente inerziale del motoveicolo e quella vincolare trasmessa dal muro alla ruota ed al cerchio.



*Figura 4.4: Fase finale impatto scooter*

Quando non c'è più interazione con il muro avviene il recupero elastico della gomma. Inoltre, si può notare il sollevamento da terra dello scooter. L'elemento che subisce più danneggiamento è la forcella con relativa sospensione; infatti, essa effettua una rotazione di circa 10 gradi attorno al perno anteriore della ruota. La parte che riveste un ruolo fondamentale nell'impatto frontale è quella anteriore, in particolar modo la gomma e la forcella. Tuttavia, questa è una reazione derivante dai fenomeni di inerzia che interessano gli elementi posteriori i quali, avendo una massa rilevante, spostano il peso verso la direzione di impatto causando fenomeni distruttivi sulle parti anteriori.

Da questa analisi si evince che la componente relativa alla massa del veicolo riveste un ruolo fondamentale per quanto riguarda le conseguenze dell'impatto. Le relative forze inerziali causano le deformazioni che

modificano la struttura globale del motoveicolo. Un confronto tra le dimensioni e le masse dei modelli studiati in questo elaborato è utile per il dimensionamento del veicolo e per una coerente correlazione numerico-sperimentale.

mm	<b>Ingombri</b>	<b>Altezze</b>	<b>Interasse</b>
<b>Numerico</b>	2011x675x1097	752/140	1386
<b>Reale</b>	2035x705x1125	765/120	1395

*Tabella 4.1: Dimensioni principali modello numerico e reale*

	Kilogrammi
Massa Reale	179
Massa numerica	187

*Tabella 4.2: Confronto masse*

#### 4.2.2 Modifiche strutturali

Una volta effettuata una prima analisi sulle conseguenze dell'impatto dello scooter, è possibile estrapolare informazioni riguardanti gli urti in generale ed applicare le conoscenze acquisite ai crash di un qualsivoglia motociclo. Nel nostro caso verrà posta particolare enfasi sulla parte anteriore del modello di motocicletta, andando a modificare alcuni parametri e cercando di attenersi al valore delle masse dei due modelli di moto.

Innanzitutto, al modello numerico è stato applicato un carico gravitazionale tramite il comando LOAD. Analizzando solo la gravità, la moto subisce uno spostamento in direzione opposta all'asse Z positivo. Quindi, considerato il modello di moto originale ed attribuita una velocità iniziale di 50 km/h (13888 mm/s) tramite il comando INITIAL VELOCITY, si è passati alla verifica del comportamento dinamico strutturale a seguito di un impatto frontale contro una superficie rigida.

Prima di effettuare i test sono stati controllati tutti i contatti tra le parti per evitare compenetrazioni; inoltre, sono stati creati dei contatti tra motocicletta e muro, ponendo particolare attenzione alle parti direttamente interessate dall'impatto così da dedicare una scheda CONTACTS per garantire il corretto funzionamento e la fisicità del problema.

Confrontando i fotogrammi relativi al crash tra il motociclo Liberty ed il modello numerico, si è visto come tra i comportamenti meno rappresentativi della realtà vi è una deformazione irregolare della gomma anteriore e della

forcella che subisce una oscillazione rispetto al perno della ruota di circa 75 gradi, come rappresentato in Figura 3.6.

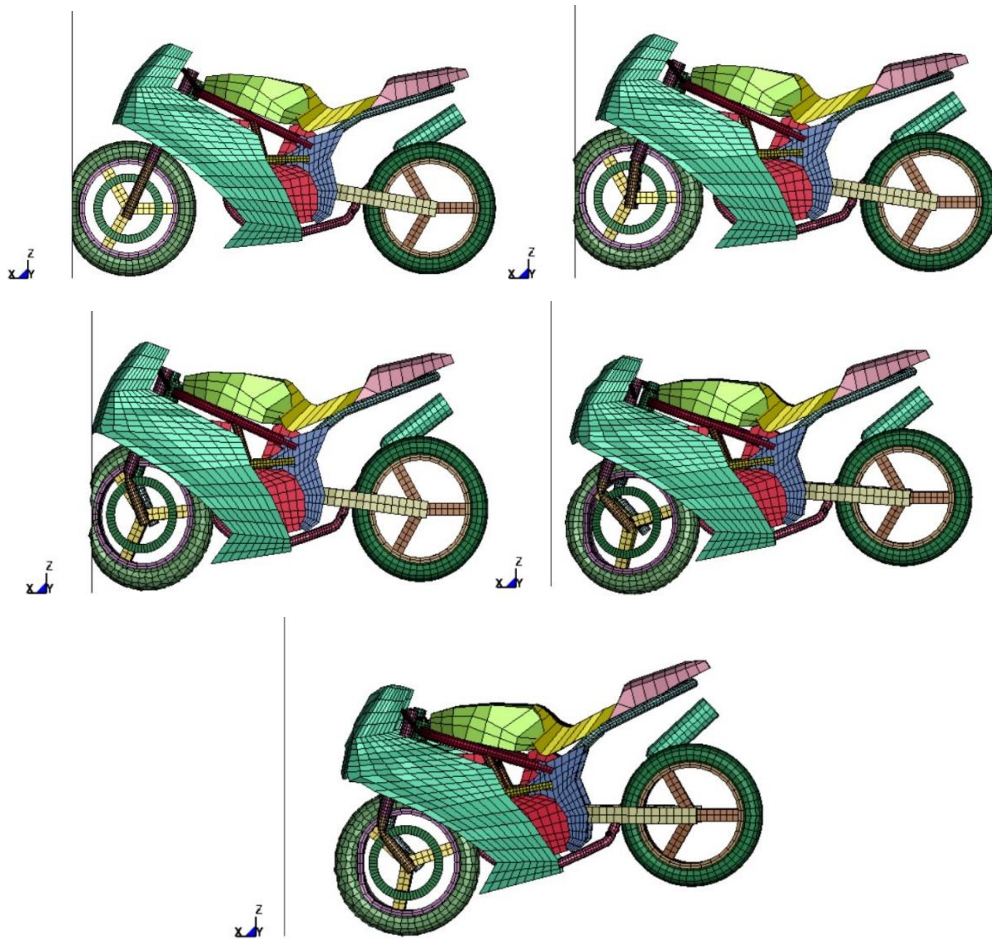


Figura 4.5: Primo impatto modello iniziale e rotazione della forcella

Il materiale usato per caratterizzare le gomme nel primo modello (anteriori e posteriori) è un **PIECEWISE LINEAR PLASTICITY** con le seguenti caratteristiche meccaniche:

	Ro	E	PR	SIGY
Gomma	4.06e-9 Ton/mm <sup>3</sup>	2461 MPa	0.323	250 MPa

Tabella 4.2: caratteristiche meccaniche materiale gomma

Queste proprietà rispecchiano quelle tipiche degli pneumatici e si riferiscono ad un materiale composito fatto di polimeri (sintetici) rinforzati con silice ed altri elementi chimici quali oli e resine [10]. Un aspetto fondamentale è che la parte interessata all'impatto deve essere molto dettagliata. E' stata quindi realizzata una nuova griglia sulla gomma anteriore e sul rivestimento della moto, denominato part \*CARENA, così da rendere l'impatto più realistico ed

evitare anche fenomeni come l'HOURLASS. Questi sono modi non fisici, aventi energia nulla di deformazione che producono deformazioni e stress nulli. Di seguito una immagine che evidenzia l'andamento della curva dell'Hourglass e della curva dell'energia interna. Si nota come il valore dell'Hourglass sia superiore al 10% dell'energia interna, il che, per normativa, non è accettabile per le simulazioni numeriche.

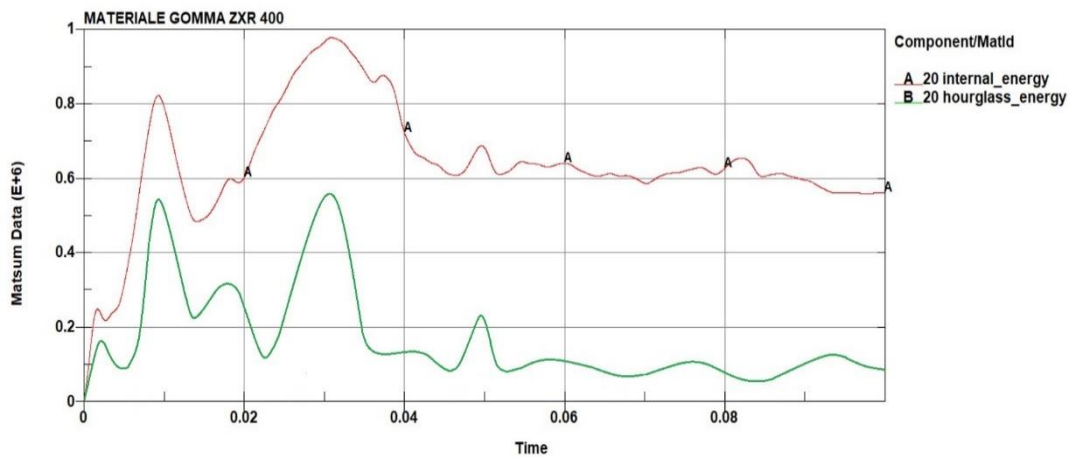


Figura 4.6: Hourglass vs Energia Interna

Si è poi passati all'analisi della forcella. L' ampia oscillazione è dovuta ad una rappresentazione dell'avantreno tramite due tubi che scorrono l'uno dentro l'altro il cui spessore non rispecchia le caratteristiche reali della moto. Inoltre, il materiale usato per modellare questo elemento non soddisfa le funzioni tipiche di una forcella, quali possono essere la rigidità in direzione di scorrimento e la robustezza, oltre che la capacità di assorbire ed attutire le decelerazioni a seguito di incidenti o brusche frenate. Aumentando lo spessore dei tubi e cambiando il materiale con un PIECEWISE LINEAR PLASTICITY che meglio approssima l'alluminio AL6082 (di seguito le caratteristiche), la forcella oppone una ottima resistenza ai carichi inerziali dovuti alla parte posteriore della moto.

	Ro	E	PR	SIGY
Al6082	2.71e-9 Ton/mm <sup>3</sup>	7.1e+4 MPa	0.33	280 MPa

Tabella 4.3: caratteristiche meccaniche materiale AL6082

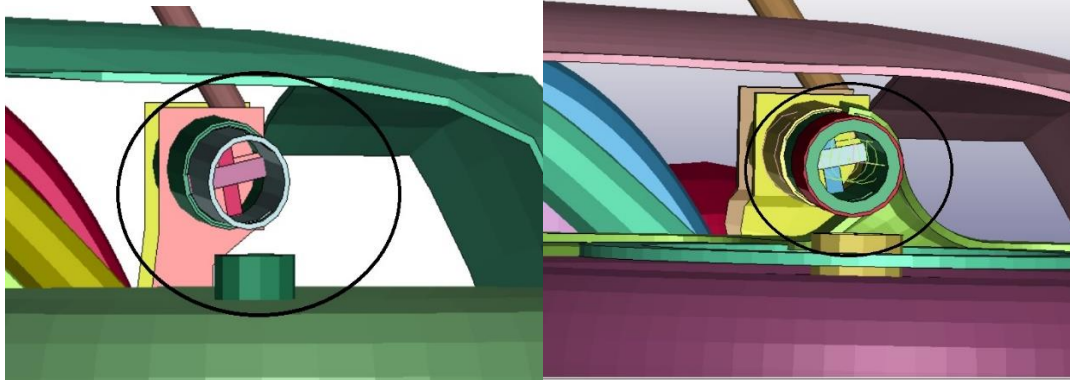


Figura 4.7: Spessore tubi forcella del modello preliminare prima e dopo la modifica

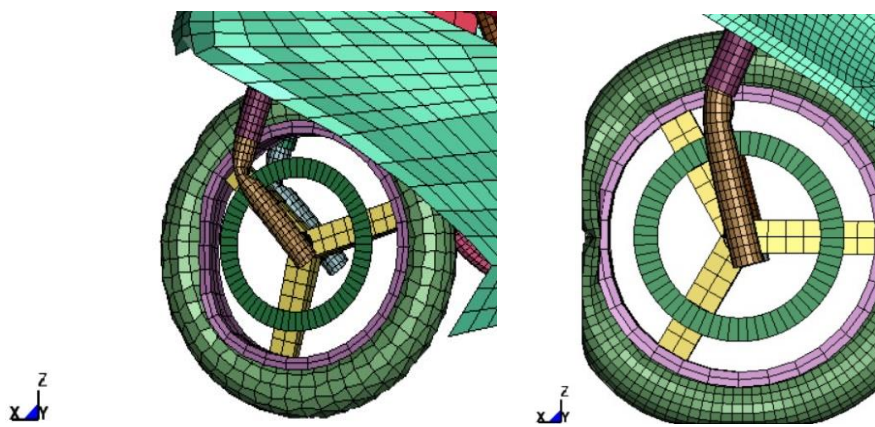


Figura 4.8: Oscillazione forcella preliminare e forcella modificata.

Dall'immagine si nota come le migliorie apportate alla forcella influiscano anche sull'angolo di rotazione della gomma attorno all'asse Z. Dopo aver effettuato la modifica ai materiali ed alle dimensioni dei componenti dell'avantreno, al modello di moto mancano alcune componenti che fanno parte della dinamica dell'impatto. Si è quindi proceduto all'aggiunta di un secondo freno a disco, di un parafango e di un fodero per una rappresentazione geometrica più affidabile; inoltre, essi sono elementi importanti in qualunque motociclo per affinare i dettagli della parte anteriore (Figura 4.9).

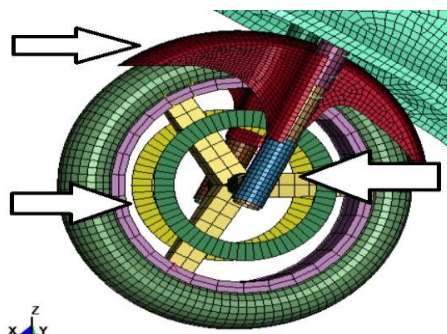
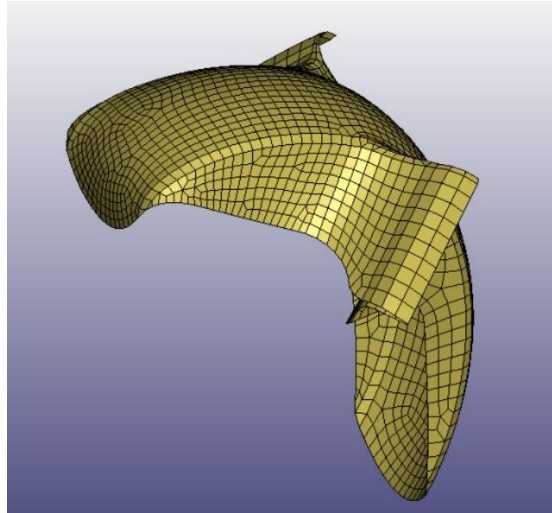


Figura 4.9: Doppio disco e parafango



Il parafango è stato modellato e descritto correttamente dal punto di vista delle proprietà meccaniche del materiale. Esso è stato realizzato partendo da un modello di CAD costruito con il programma CATIA e successivamente è stata realizzata una mesh con il programma HYPERMESH. Il tutto è stato importato su LS-DYNA per sfruttare le potenzialità inerenti alle card dei materiali. All'inizio è stata data la stessa caratteristica materiale della part Carena del modello.



*Figura 4.10: Test parafango con materiale carena*

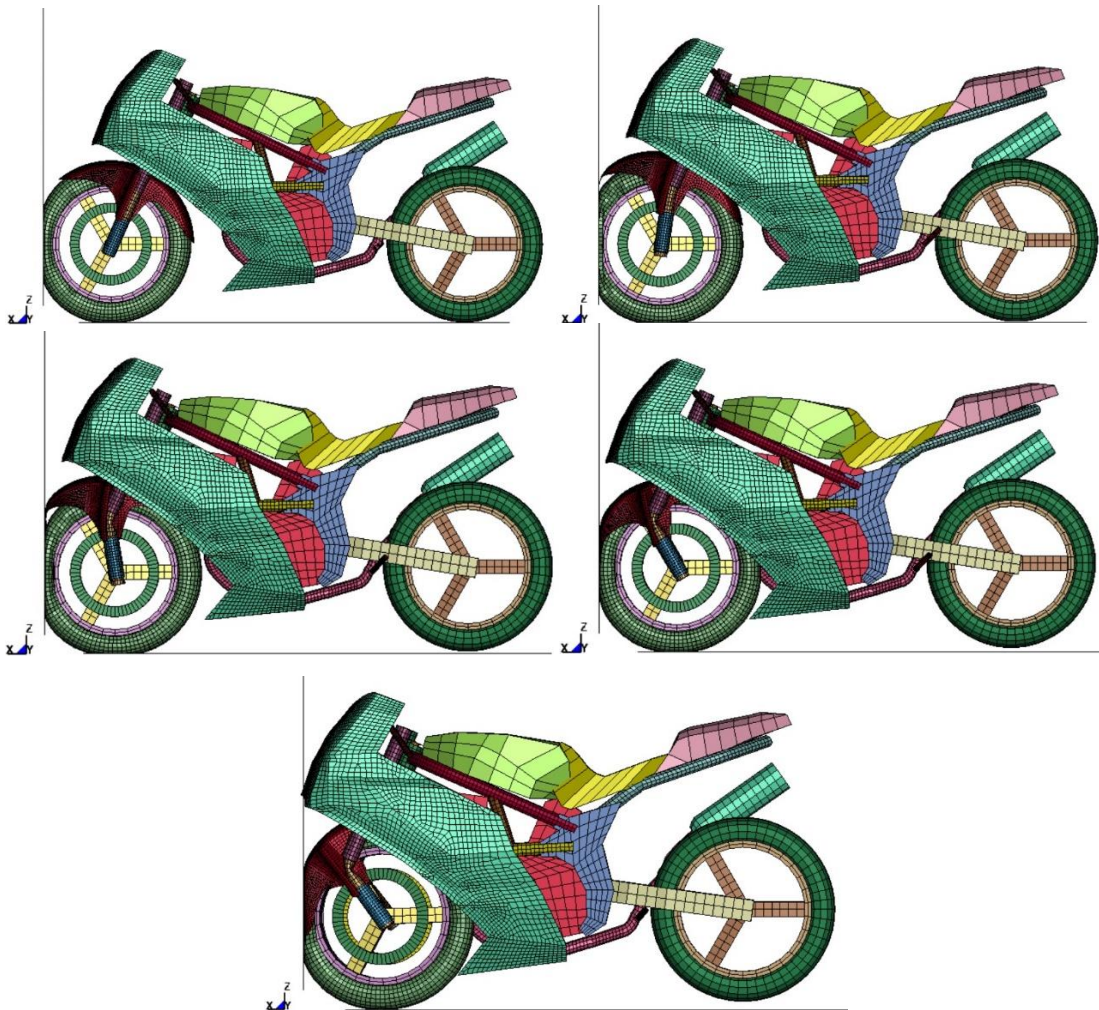
Usando gli stessi parametri ed effettuando un lancio contro un muro rigido, il parafango e la carena mostrano un comportamento elastico, molto simile ad una gomma, il che non rispecchia assolutamente i test sperimentali. Quindi, il materiale del parafango e della carena viene ora rappresentato attraverso la card `PIECEWISE LINEAR PLASTICITY`, che permette di descrivere le proprietà della plastica dura [11]. Si verifica un comportamento più accettabile, come verrà mostrato nel test finale.

	RO	E	PR	SIGY
ABS	1.16e-9 Ton/mm <sup>3</sup>	1640 MPa	0.35	48.26 MPa

*Tabella 4.4: Caratteristiche meccaniche materiale ABS*

Dalla descrizione precedente, si attesta che parafango e carena possiedono lo stesso materiale corrispondente all'ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene). Al parafango sono stati aggiunti i foderi, parti fisse dove scorrono le forcelle fissate con dei RIVET sul perno della ruota anteriore.

Il passo successivo è quello di compiere una prima verifica sul modello completo di parafango e disco, oltre che sulla nuova forcella. Effettuando un primo test sulla motocicletta lanciata ad una velocità di 50km/h, il risultato è il seguente:



*Figura 4.11: Impatto contro un muro del modello*

Come si evince dai fermoimmagini la moto rispetta il comportamento globale in accordo con quanto atteso, sollevando la parte posteriore e danneggiando strutturalmente solo quella anteriore; ma il comportamento della forcella non è ancora adeguato a descrivere quello della controparte reale. Questo perché nella realtà, la parte dedicata al controllo del movimento del telaio rispetto allo pneumatico ed all'assorbimento dei carichi di frenata è costituita da una struttura telescopica dove la parte fondamentale è una molla interna in un bagno d'olio, non presente nel modello in esame. Quindi una possibile rappresentazione vede l'utilizzo di un elemento DISCRETE modellato con un MAT\_SPRING\_ELASTIC, privo di massa, che funge da ammortizzatore interno, a cui è possibile attribuire una costante elastica. Questa molla assorbe i carichi agenti in direzione assiale sulla forcella, migliorandone il comportamento a flessione. Effettuando una ricerca bibliografica [12] è

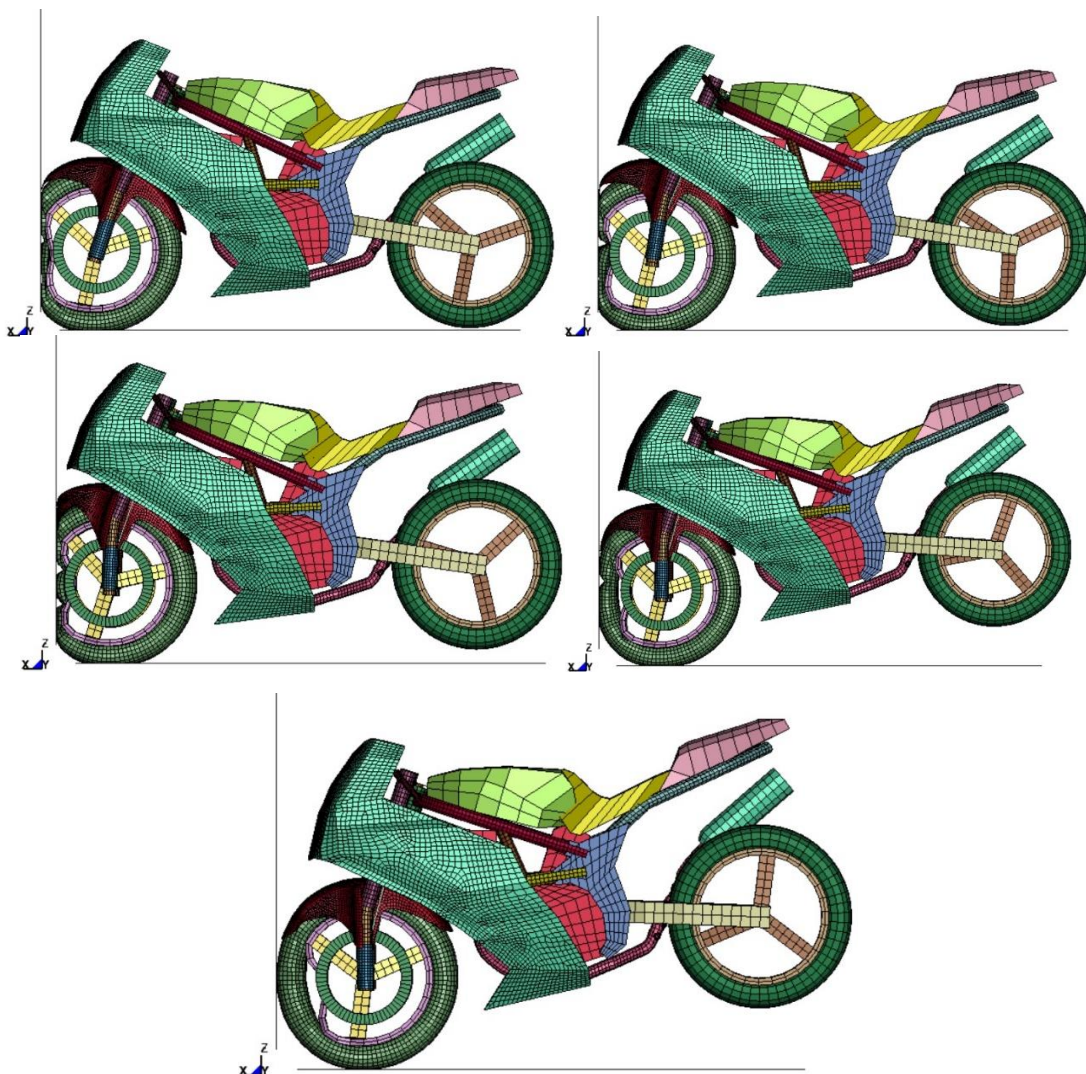
possibile scoprire che la costante elastica sviluppata dal sistema ammortizzatore è pari a

$$K=30.50 \text{ N/mm}$$

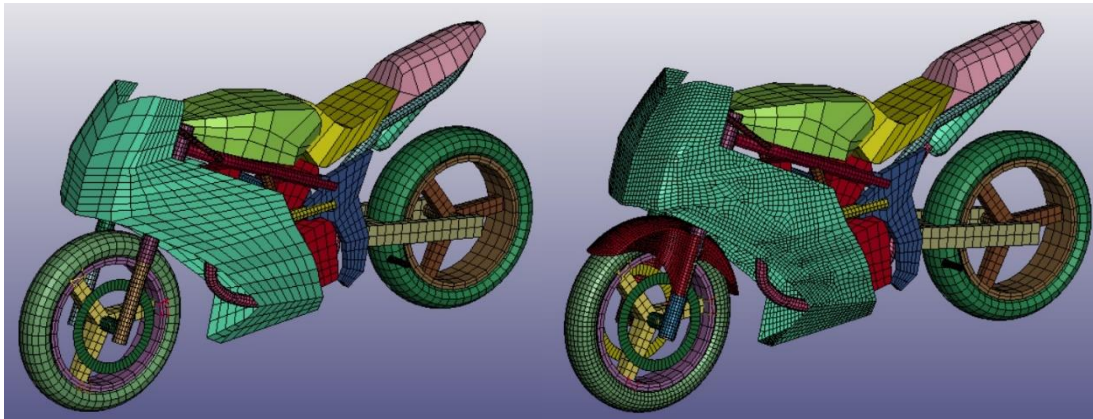
La parte più complicata è la rappresentazione del bagno d'olio tramite il software ad elementi finiti. Vista la difficoltà di approssimazione, si è pensato di aggiungere un altro elemento DISCRETE che approssimasse gli effetti dell'olio, attribuendo al coefficiente K un valore che si basasse su delle interpolazioni dei dati sperimentali disponibili in rete (FONTE). Alla fine, il valore ottenuto che meglio approssima il bagno d'olio è

$$K=10.50 \text{ N/mm}$$

Di seguito il comportamento della moto dopo un ulteriore test:



*Figura 4.12: Impatto con nuove sospensioni. Si può notare la deformazione del parafango a seguito dell'impatto contro il muro*



*Figura 4.13: Confronto modello originale/modificato*

Aggiungendo le parti descritte e modificando alcuni parametri delle MAT CARDS, si è ritenuto accettabile il delta con il veicolo reale assunto come riferimento sul valore della massa.

	Kilogrammi
Massa Reale	179
Massa num. modificata	189

*Tabella 4.5: Nuovo confronto masse*

### 4.3 Risultati

Il modello modificato è in grado di riprodurre con migliore accuratezza il comportamento di una moto reale in caso di impatto. Innanzitutto, la modifica del materiale della gomma ed il successivo rimodellamento della mesh hanno permesso il recupero elastico nella fase post urto. Inoltre, la gomma, come nei test con lo scooter, entra in contatto con la parte di rivestimento del vano motore, in corrispondenza del radiatore. A seguito dell'impatto la gomma non presenta più il fenomeno dell'HOURLASS grazie al settaggio di alcuni parametri per il controllo dello stesso e all'utilizzo di una mesh più fitta sulle parti interessate.

Analizzando la fase post impatto della forcella si può evidenziare come la contemporanea presenza dell'elemento DISCRETE, l'aumento dello spessore dei tubi con conseguente aumento di peso ed il fissaggio dei foderi che vincolano le forcelle possano aver reso il comportamento di questa parte di motociclo più affidabile e corretta. I tubi della forcella, dopo l'impatto, effettuano una oscillazione attorno all'asse della gomma di circa 10 gradi, mostrando un comportamento simile a quello posseduto dal motociclo durante

i test sperimentali. Inoltre, la motocicletta mostra un corretto comportamento globale, sollevandosi da terra a seguito dell'impatto.

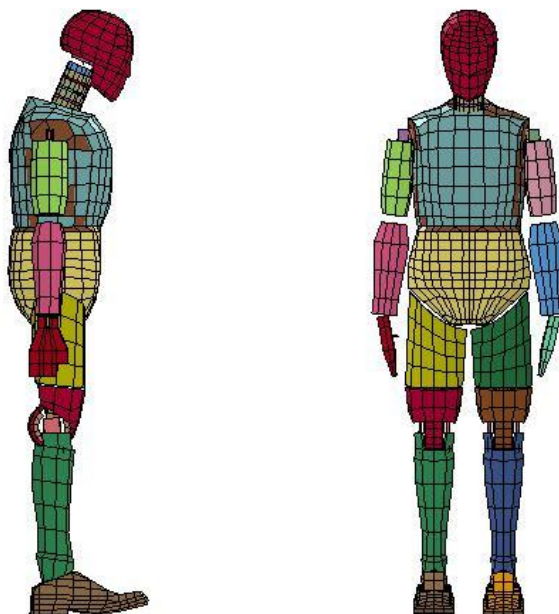
Il parafrangente invece, a seguito dell'urto, non mostra rottura ma solo deformazione. Ciò è dovuto alla caratterizzazione del materiale usato per questo elemento.

# Capitolo 5

## Manichino Antropomorfo

Il capitolo seguente descrive il modello di manichino adoperato in questo elaborato, ponendo l'attenzione sulle modalità con cui esso viene vincolato al modello di moto e su com e viene adattato alla posizione corretta sulla moto.

Come già detto nei precedenti paragrafi, il manichino utilizzato per realizzare il modello di motociclista è un Hybrid III 50th percentile RIGID. Esso è stato modellato sulla base dell'Hybrid III ADULT.



*Figura 5.1: Manichino in posizione eretta*

## 5.1 Caratterizzazione Hybrid III

Questo modello numerico ha le seguenti dimensioni:

- Altezza:  $h=180$  cm
- Massa:  $m=78$  kg

Il manichino viene definito rigido perché confrontandolo con un modello simile ma deformabile si notano alcune differenze a livello di forma e materiale:

1. La parte superiore della colonna vertebrale è rigida per entrambi i modelli, ma nel manichino rigido essa possiede una forma maggiormente estesa, che garantisce una maggior rigidità alla parte superiore del torso;
2. La parte lombare della colonna vertebrale è costituita da un materiale rigido nel manichino rigido, mentre nel modello deformabile è realizzata con un materiale viscoelastico;
3. Lo sterno è definito con un materiale rigido nel manichino rigido, mentre viene lasciato elastico nel manichino deformabile;
4. Le due ossa iliache risultano essere congiunte nel manichino deformabile, mentre non lo sono in quello rigido;
5. Le parti costituenti le ossa delle parti superiori delle gambe presentano forme leggermente diverse nei due modelli.

Di seguito vengono riportate le differenze messe in evidenza in Figura 4.2 tramite i riferimenti numerici usati nell'elenco precedente.

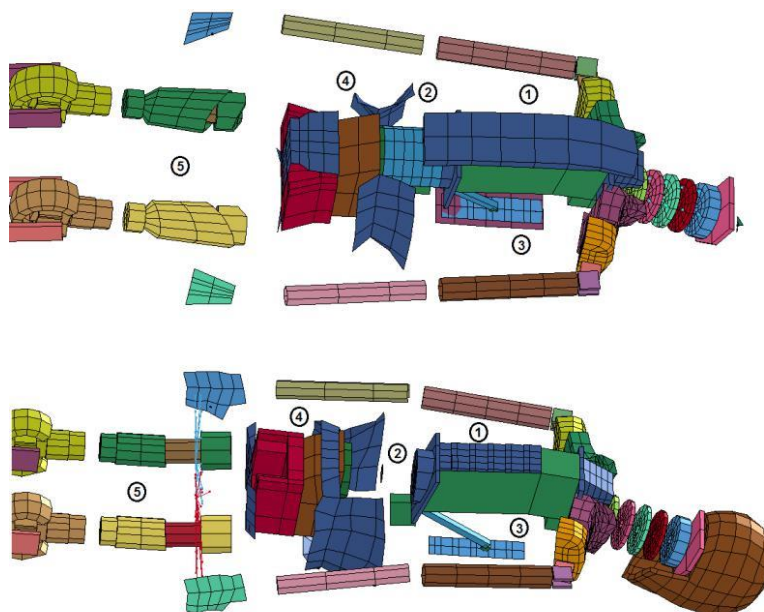


Figura 5.2: Differenze tra i due modelli

Nonostante il modello deformabile presenti una biofedeltà più accurata, si è proceduto ad utilizzare il modello meno dettagliato in quanto esso comporta un minor costo computazione ed in quanto non viene analizzato in dettaglio il comportamento biomeccanico a seguito dell'impatto.

## 5.2 Configurazione manichino

La fase successiva è quella di modificare la posizione del manichino in modo tale che esso assuma una posizione tipica da motociclista. Secondo alcune ricerche sulla postura biomeccanica [13], il motociclista dovrebbe avere un'inclinazione del busto parallela all'asse della tibia, in modo tale da poter ripartire il peso tra seduta, pedivelle e appoggio del piede, mani e braccia sul manubrio. Le braccia sono distese e in pressione sulle manopole caricando l'avantreno e mantenendo un controllo attivo del mezzo. Questa fase del lavoro è resa possibile dal fatto che ci sono numerosi giunti e collegamenti nel modello che consentono di muovere e ruotare gli arti del manichino rispetto al resto del corpo. Tutto ciò è possibile grazie alla presenza dell'INGRID ".tree" file, che si trova all'interno del modello e rende possibile il posizionamento tramite il Pre-Processor, poiché lega tre componenti fondamentali: giunto; arto genitore ed arto figlio.

Questo file ".tree" definisce una vera e propria catena; partendo dal torso, il quale è definito l'elemento d'origine dato che viene mosso e ruotato tramite coordinate globali, esso permette di posizionare correttamente il manichino agendo su tutte le articolazioni presenti nella corretta posizione secondo i gradi di libertà garantiti dai collegamenti.

### 5.2.1 Unità di misura ed Offset

Quando si va a modellare un qualunque oggetto in Ls-Dyna, le unità di misura non sono presenti. Bisogna quindi essere coerenti col sistema che deve essere utilizzato, per non ricadere in errori di scala e di misura.

I modelli che vengono usati in questo lavoro di tesi prevedono l'utilizzo del modello di moto e del modello di manichino, i quali devono essere inglobati in un unico file. Essi adottano due sistemi di unità di misura differenti:

- Il modello di moto prevede l'utilizzo di un sistema di unità di misura "mm s Ton N";
- Il modello di manichino prevede l'utilizzo di un sistema di unità di misura "m s kg kN".



Quindi è stato necessario uniformare i due modelli, utilizzando il sistema di unità di misura della motocicletta. Per questa operazione è stato utilizzato un particolare file creato da LSTC che trasforma le unità di misura di un modello da un sistema all'altro.

Dopo avere effettuato la trasformazione, il file della motocicletta è stato importato nel file del manichino. Per evitare possibili conflitti con gli ID dei nodi, degli elementi e delle parti, è stato imposto un offset al modello di manichino. La stessa procedura verrà ripetuta al momento dell'aggiunta del file automobile.

## 5.2.2 Posizionamento globale del manichino

Seguendo le indicazioni suggerite dallo studio biomeccanico riguardante la corretta posa del motociclista, sono stati modificati diversi parametri per permettere al modello di assumere una posa simile a quella di un motociclista. L'origine del sistema di riferimento globale del punto "H" del manichino si trova in prossimità della zona pelvica:

- $X_h = -103.25$  mm
- $Y_h = 1043.27$  mm
- $Z_h = 0$  mm

Partendo da questa posizione, esso è stato spostato sulla moto, facendo sì che fosse più vicino possibile ai punti di contatto (sella, pedivelle e manubri). Risulta che il punto "H" ha coordinate:

- $X'_h = 1168.75$  mm
- $Y'_h = 7.99$  mm
- $Z'_h = 922.99$  mm

Una volta che il manichino è stato spostato nel sistema di riferimento globale tramite il punto "H", è iniziata la fase di rotazione globale, dove il punto "H" è il centro di rotazione. Questa fase permette al manichino di assumere la classica posa chinata tipica dei motociclisti. Di seguito, vengono riportate le inclinazioni degli assi del sistema di riferimento del manichino rispetto alla posizione eretta:

- 0 deg attorno all'asse x
- 29.88 deg attorno all'asse y
- 0 deg attorno all'asse z

Di seguito, viene mostrato il punto H lungo il piano orizzontale, laterale e verticale e le rispettive viste in pianta, prospetto e profilo:

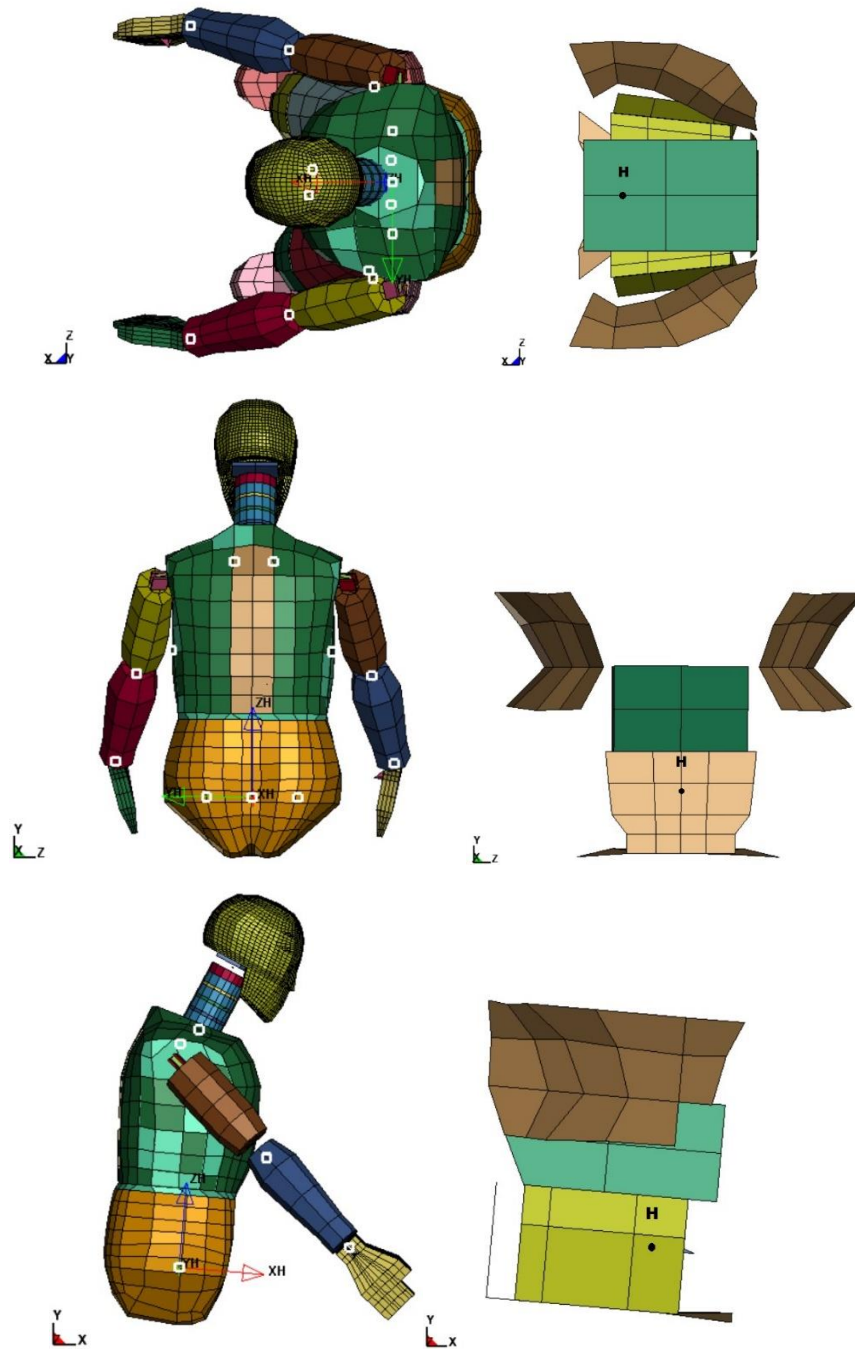


Figura 5.3: Vista in pianta, prospettivo e profilo del punto H

### 5.2.3 Posizionamento arti del manichino

L'Hybrid III possiede 15 giunti tramite i quali è possibile posizionare gli arti in base ai loro gradi di libertà. Un aspetto importante è quello di evitare che alcuni elementi di estremità del manichino compenetrino nel modello di moto.

Ciascun giunto possiede un sistema di riferimento locale attorno al quale è possibile eseguire operazioni di rotazione conformi ai movimenti che un essere umano è in grado di fare.

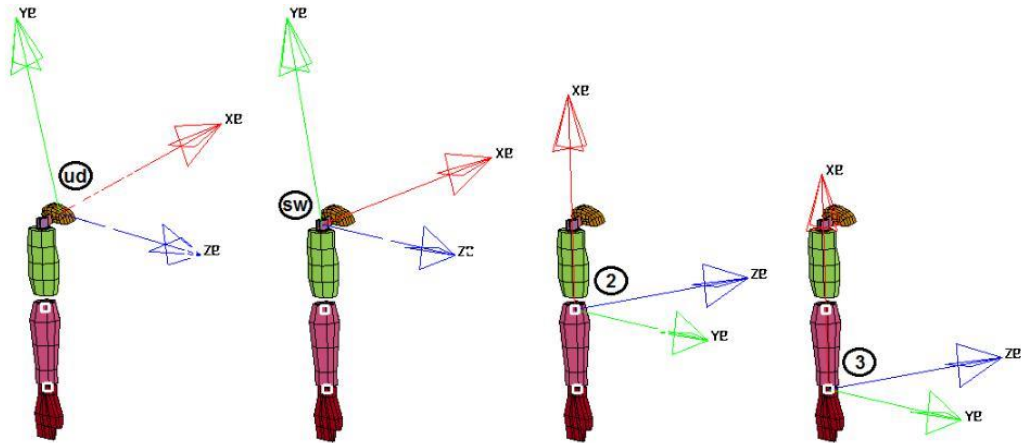


Figura 5.4.1: Sistemi di riferimento locali della gamba destra

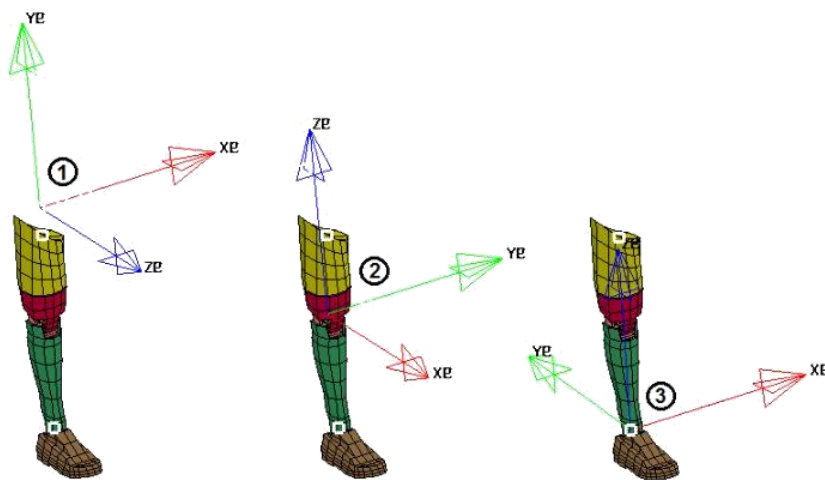
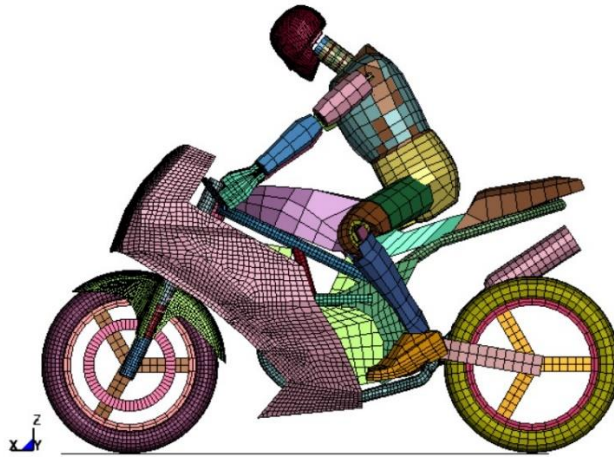


Figura 5.4.2: Sistemi di riferimento locali del braccio destro

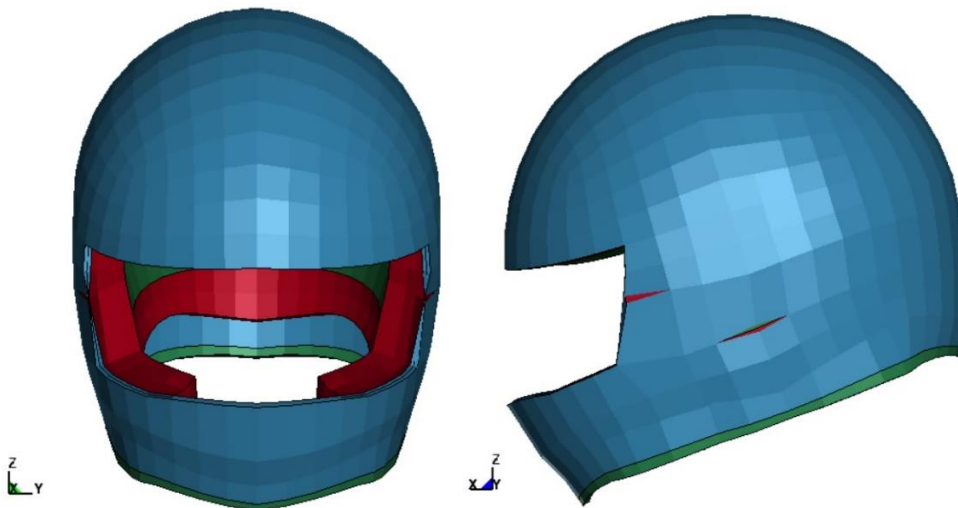
I giunti più usati per il posizionamento del manichino sono stati quelli corrispondenti all'articolazione femorale, al polso, alla caviglia, alla scapola ed al ginocchio. La figura seguente mostra la configurazione finale del manichino sulla motocicletta, una volta apportate le modifiche tramite il comando "limb operation":



*Figura 5.5: Posizionamento manichino*

### 5.3 Casco

La prova di impatto motociclista prevede che il manichino sia equipaggiato con un casco integrale, copricapo protettivo facente parte dell'equipaggiamento protettivo individuale per motociclisti.



*Figura 5.6: Vista frontale e laterale del casco*

Il modello utilizzato per questo lavoro è diviso in tre componenti principali: una calotta esterna modellata tramite elementi shell, una parte interna modellata a solidi che rappresenta l'imbottitura del casco e il laccio di chiusura realizzato tramite elementi di trave. La calotta esterna è realizzata in un particolare polimero termoplastico chiamato ABS; questo materiale possiede

un buon rapporto tra resistenza all'impatto e densità ed è quindi particolarmente adatto per questa applicazione. La parte interna del casco è formata da due differenti tipi di schiume a bassa densità che permettono di replicare il comportamento del casco reale. Il laccio di chiusura è stato modellato utilizzando un particolare tipo di elemento di trave che non presenta alcuna rigidità a compressione e il materiale scelto, chiamato *seatbelt*, è sviluppato appositamente per questo tipo di applicazioni.

Il modello numerico di casco visualizzato in Figura 4.7 ha una massa di 6,10 kg.

Di seguito, il modello finale pronto per essere analizzato:

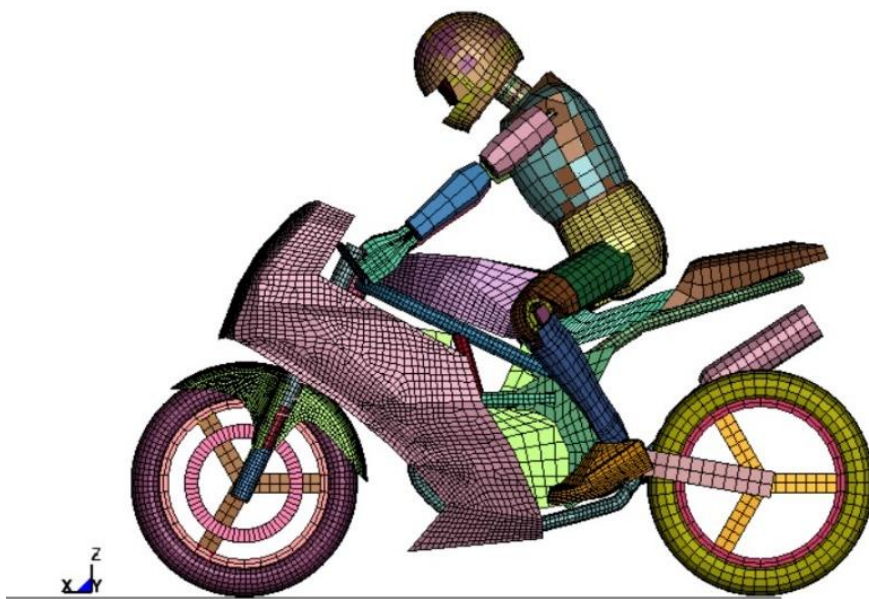


Figura 5.7: Sistema moto/manichino completo

Effettuate le dovute modifiche per far assumere al manichino la posa da motociclista, verranno analizzate nel seguente paragrafo i contatti usati per vincolare il manichino al modello di moto.

## 5.4 Definizione contatti

Per conseguire gli obiettivi della tesi, il manichino deve essere vincolato al modello di moto. Questo processo è reso possibile grazie alla scheda CONTACT presente nel solutore.

### 5.4.1 Contatti tra manichino e motocicletta

I collegamenti per vincolare il manichino alla moto non possono essere rigidi. Devono, invece, cedere per permettere al manichino di staccarsi dalla moto riproducendo una condizione corrispondente a quella reale, in quanto il motociclista non è agganciato alla moto. Tramite un `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` vengono evitate eventuali compenetrazioni. Infatti, tutte le parti che entrano in contatto non rimangono vincolate le une con le altre. La scheda precedente permette di scegliere un set di parti definito *master* (in questo caso la motocicletta) ed un set di parti definito *slave* (il manichino). Questa particolare decisione è dovuta al fatto che la mesh del manichino è più fitta rispetto a quella della motocicletta: i nodi *slave* non possono compenetrare i segmenti definiti dai nodi *master*, ma il viceversa non vale:

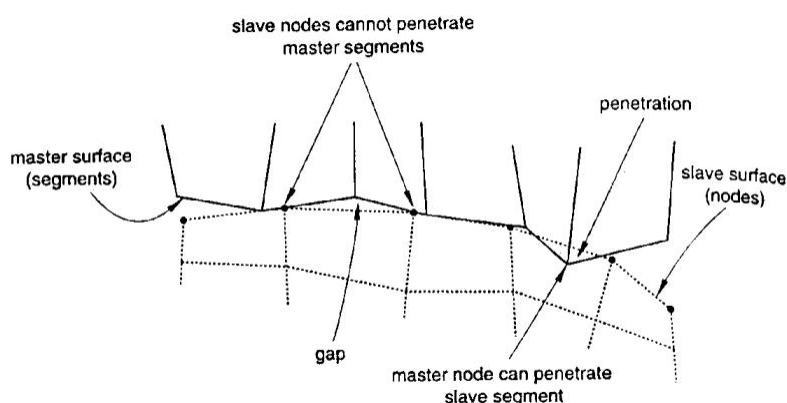


Figura 5.8: Funzionamento contatti Ls-Dyna

Quindi è più conveniente indicare come *slave* la mesh più fitta tra le due coinvolte nella definizione del contatto.

### 5.4.2 Spotweld

Per simulare la forza esercitata dalla mano nel momento in cui il motociclista si tiene saldo alla moto, vengono utilizzati dei vincoli nodali chiamati *Spotweld*. Uno studio effettuato sulla misurazione della forza di presa della mano ha

evidenziato come, analizzando un campione di 100 giovani adulti, per un maschio adulto la forza di presa della mano si aggira intorno a 44 kg [14].

	ADOLESCENTI					GIOVANI ADULTI				
	Genere femminile (n.50)		Genere maschile (n.50)		*p	Genere femminile (n.50)		Genere maschile (n.50)		*p
	M	DS	M	DS		M	DS	M	DS	
Emilato dominante (D)	kg 24,7	4,1	38,3	6,0	0,001	27,8	4,0	44,1	8,3	0,001
Emilato non dominante (ND)	kg 23,9	4,1	36,5	6,5	0,001	26,1	4,2	42,5	8,8	0,001
Differenza fra emilati (D-ND)	kg +0,8	1,9	+1,7	3,1	0,067	+1,6	2,2	+1,6	4,1	0,995
	% +2,8	8,1	+4,5	7,8	0,300	+5,8	8,1	+3,6	10,4	0,239

Tabella 5.1: Analisi forza di presa della mano

Esso può andare incontro a rottura in due diversi modi:

- Quando viene soddisfatta la seguente condizione:

$$\left( \frac{|f_n|}{S_n} + \frac{|f_s|}{S_s} \right) \geq 1$$

dove  $f_n$  ed  $f_s$  sono le forze assiali e di taglio all'interfaccia, mentre  $S_n$  ed  $S_s$  sono i valori di forza limite che indicano la resistenza del collegamento.

- Nel momento in cui viene raggiunto il tempo di rottura TF imposto durante la definizione del collegamento

Quando una di queste due situazioni viene raggiunta si ha il cedimento del giunto, il quale prima di andare incontro a rottura si comporta come un elemento rigido. Dal momento che durante un urto non è noto l'istante in cui il motociclista subisce un impatto, nel modello è stato utilizzato il primo criterio di cedimento. Per quanto riguarda i valori da attribuire ad ogni variabile, bisogna fare una considerazione: verranno studiati urti frontali quindi per inerzia il manichino andrà in avanti; il movimento relativo tra i due sistemi sarà di slittamento, quindi il vincolo verrà sollecitato prevalentemente a taglio.

Sulla base della Tabella 5.1, sono stati inseriti i seguenti valori:

- $S_n = 1.0e21$  N
- $S_s = 400$  N

Con questi valori, il criterio di rottura si riduce ad una verifica sul solo taglio; infatti il carico assiale non rientra più nell'equazione. Il valore scelto per la forza limite a taglio corrisponde ad un limite di circa 40 kg. Esso è in linea con gli studi sulla forza di presa di mano e soprattutto garantisce la sua efficacia anche durante l'assestamento del manichino durante le prove di *dynamic relaxation*.

## 5.5 Precarico del modello

Per far sì che le prove risultino realistiche, deve essere introdotta nel modello l'accelerazione di gravità. Essa viene inserita nel modello tramite una curva ed in maniera istantanea.

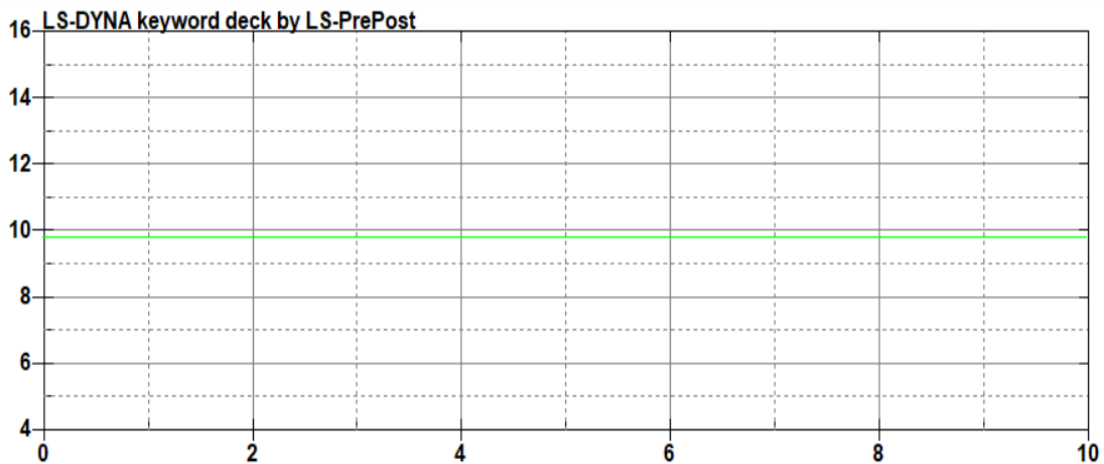


Figura 5.9: Andamento qualitativo curva di gravità

Introducendo direttamente nell'analisi la curva di gravità con il manichino semplicemente posizionato sulla motocicletta, l'analisi risulta non veritiera. Infatti, durante il posizionamento del manichino, il PrePost permette la modellazione del manichino ma non prevede la possibilità di far combaciare le parti che sono coinvolte nell'appoggio del manichino. Una soluzione a questo problema è quella di considerare i carichi derivanti dall'accelerazione di gravità come precarichi, usando la *dynamic relaxation*. Questo strumento consente di effettuare una pre-analisi esplicita ma smorzata, in cui per ogni



passo di tempo le velocità nodali vengono moltiplicate per un fattore di scala denominato DRFCTR, avente un valore di default pari a 0.995.

### 5.5.1 Terminazione Dynamic Relaxation

Ls-Dyna offre la possibilità di terminare la fase di precarico ed iniziare l'analisi dinamica vera e propria in due modi differenti:

- Terminare la DR in un preciso istante temporale definito attraverso uno dei parametri di implementazione (DRTERM);
- Terminare la DR quando una certa quantità scende sotto una tolleranza di convergenza precedentemente impostata (DRTOL).

Nel primo caso, una volta che la *dynamic relaxation* raggiunge l'istante temporale finale preimpostato, l'analisi viene interrotta ed inizia l'analisi dinamica. Le problematiche relative a questo tipo di metodologia riguardano una interruzione "forzata" dell'analisi con la possibilità di avere all'istante finale delle oscillazioni indotte dall'introduzione del carico statico che potrebbero non essere state smorzate a sufficienza. Quindi la nuova configurazione stabile potrebbe non esser stata ancora raggiunta. Questo metodo è consigliato se si conosce il comportamento dinamico del modello.

Il secondo caso risulta essere molto più flessibile e permette di definire una tolleranza di convergenza che regola automaticamente l'arresto della *dynamic relaxation*. Il fattore di convergenza non è altro che il rapporto tra l'energia cinetica distorsionale attuale ed il massimo sull'intera storia temporale. Quando questo fattore scende sotto la tolleranza di convergenza, la *dynamic relaxation* si interrompe ed inizia l'analisi dinamica. L'energia cinetica distorsionale è definita come la differenza tra energia cinetica totale ed energia cinetica dovuta a moti rigidi.

### 5.5.2 Parametri richiesti per la Dynamic Relaxation

In Ls-Dyna, nella sezione CONTROL del file di input della simulazione, è presente la scheda di controllo della DR. I parametri richiesti sono i seguenti:

- DRTOL: tolleranza utilizzata per il controllo di convergenza della *dynamic relaxation*;

- DRTERM: tempo finale in cui viene interrotta l'analisi di *dynamic relaxation*;
- DRFCTR: fattore usato per ridurre le velocità nodali ad ogni timestep in modo da aggiungere smorzamento.

In questo lavoro, la curva di gravità viene imposta in maniera lineare fino al valore corretto, oltre il quale essa si mantiene costante, in modo tale da facilitare la convergenza della pre-analisi.



Figura 5.10: Andamento qualitativo curva di gravità nella fase di DR

## 5.6 Dynamic relaxation del modello

Una volta settati tutti i parametri, è stata avviata l'analisi tramite un solutore di tipo MPP (Massive Parallel Processing). Questa tipologia di calcolo usa diverse CPU separate che lavorano in parallelo ognuna con la propria memoria per eseguire la singola analisi.

L'esecuzione vede dapprima la pre-analisi riguardante l'accelerazione di gravità. Sono state effettuate diverse prove e l'obiettivo è l'assestamento del manichino sul modello di moto.

I risultati ottenuti vedono la motocicletta che si assesta oscillando lungo l'asse y e trovando l'equilibrio in un tempo di 0.062 secondi. Il manichino, invece, durante la fase iniziale della *dynamic relaxation* rimane quasi fermo, avendo solo qualche oscillazione sulla parte corrispondente alle cosce; dopo un intervallo di tempo pari a 0.08 secondi, il manichino inizia ad assestarsi sulla motocicletta, andando a toccare la sella e le pedivelle. Il processo di precarico dura circa 0,15 s, soglia durante la quale avviene il posizionamento del

manichino e durante cui la motocicletta non cade sul fianco. Dopo questo lasso di tempo inizia l'analisi vera e propria.

Le parti rappresentate nella figura seguente sono quelle maggiormente coinvolte nella fase di assestamento.

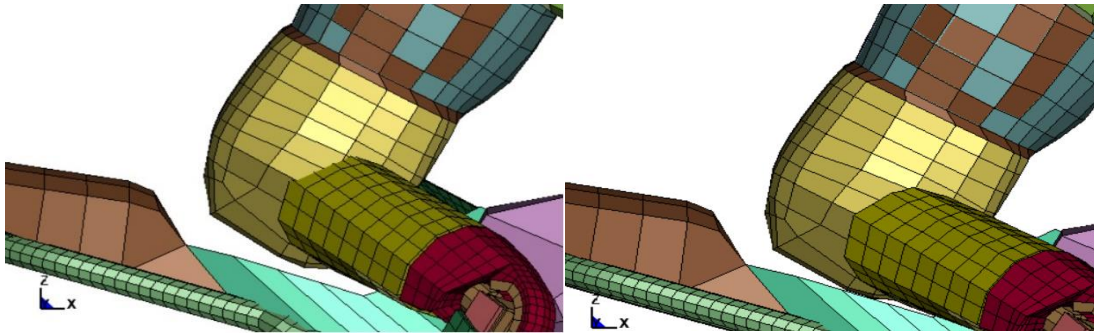


Figura 5.11.1: Confronto fase iniziale e fase finale DR della zona pelvica

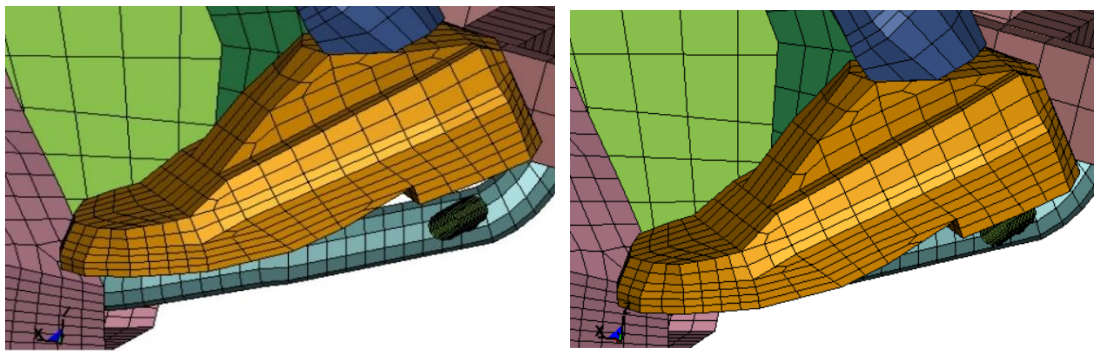


Figura 5.11.2: confronto fase iniziale e fase finale DR piede sinistro

Si nota come la zona pelvica, avente una certa quota rispetto alla sella, entra in contatto con quest'ultima, garantendo la solidità delle due parti e rappresentando fedelmente il comportamento reale. Anche la zona relativa ai piedi, dopo la fase di precarico, si assesta sulla pedivella, garantendo l'appoggio sulla moto del manichino. Questo comportamento si evidenzia anche nel cambio di angolazione delle gambe. Il manichino in circa 0.15s si assesta sulla moto.

Una attenta osservazione deve essere fatta sul collegamento moto-manichino effettuato tramite spotweld. Dopo la fase della *dynamic relaxation*, i vincoli usati per tenere saldo il manichino alla moto rimangono ancora intatti, segno che i valori adoperati per quanto concerne lo sforzo nominale e di taglio sono sufficienti per resistere alla fase di precarico.

# Capitolo 6

## Analisi FEM dei crash test

Nei capitoli precedenti sono state introdotte tutte le informazioni preliminari necessarie allo svolgimento delle prove. Prima di passare ai test veri e propri, bisogna fare qualche ulteriore considerazione sui criteri di lesione adoperati e sui tipi di impatto da analizzare.

### 6.1 $HIC_{36}$

L'*Head Injury Criterion* si calcola attraverso la seguente formula:

$$HIC = \max \left\{ (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}$$

dove:

- $a(t)$  è la risultante delle accelerazioni lineari del baricentro della testa;
- $t_2$  e  $t_1$  sono i due istanti di tempo presi in considerazione di volta in volta per l'integrazione;

La soglia del criterio cambia a seconda dell'intervallo di tempo scelto:

- $\Delta t = 36$  msec allora  $HIC_{36} = 1000$ ;

- $\Delta t = 15$  msec allora  $HIC_{15} = 700$ ;

In questo elaborato l'intervallo di tempo considerato sarà di 36 msec.

## 6.2 Configurazioni di impatto

Poiché uno dei due obiettivi dell'elaborato riguarda la valutazione di alcuni scenari tipici di impatto in ambito cittadino, è stata fatta una ricerca bibliografica sugli incidenti occorsi in alcune città rappresentative dell'Italia. Secondo i dati Istat del 2010 [15], gli scenari più comuni vedono principalmente uno scontro frontale-laterale tra i due veicoli. Esso rappresenta più della metà del totale degli incidenti avvenuti in città e la dinamica vede la svolta a sinistra di una autovettura, la cui traiettoria interseca quella di un motociclo che prosegue di moto rettilineo.

Nella classifica degli incidenti più comuni, al secondo posto vi è lo scontro laterale, il quale avviene tra la parte frontale del motociclo e la parte laterale dell'autovettura e viceversa. La dinamica rappresentativa è quindi l'impatto del motoveicolo contro la parte laterale dell'autovettura o, viceversa, l'impatto del frontale dell'autovettura contro la parte laterale del motociclo. Sulla base di queste considerazioni, verranno analizzati questi tre tipi di impatto.

PROSPETTO 6. INCIDENTI STRADALI PER INCIDENTI A VEICOLI A DUE RUOTE SECONDO LA NATURA DELL'INCIDENTE NEI GRANDI COMUNI. Anno 2010, valori assoluti

	Scontro frontale	Scontro frontale-laterale	Scontro-laterale	Tamponamento	Urto con veicolo in fermata o arresto	Investimento di pedone	Urto con veicolo in sosta o ostacolo accidentale	Fuoriuscita	Altri incidenti a veicoli isolati
	Incidenti tra veicoli				Incidenti tra veicoli isolati				
Torino	31	359	150	61	17	27	21	69	26
Milano	126	1.874	876	372	368	315	415	944	73
Verona	43	379	122	66	11	34	21	24	19
Venezia	16	83	36	20	5	10	13	23	18
Trieste	290	31	24	49	19	22	10	22	30
Genova	118	820	675	373	175	272	186	311	274
Bologna	162	357	207	105	27	88	23	22	29
Firenze	82	745	344	159	99	150	32	74	86
Roma	493	3.138	2.284	1.089	362	633	644	269	363
Napoli	88	451	198	205	65	149	70	195	157
Bari	34	398	184	86	34	60	28	95	9
Palermo	62	749	182	188	33	79	41	88	26
Messina	170	174	137	39	12	28	6	34	17
Catania	35	445	110	102	21	46	16	72	9
<b>Totale</b>	<b>1.750</b>	<b>10.003</b>	<b>5.529</b>	<b>2.914</b>	<b>1.248</b>	<b>1.913</b>	<b>1.526</b>	<b>2.242</b>	<b>1.136</b>

Figura 6.1: Casistica incidenti stradali anno 2010

## 6.2.1 Modellazione della prova a 135°

Come già descritto nell'introduzione, una delle prove che verranno analizzate sarà quella che prevede un impatto tra MC (Motor Cycle) ed OV (Other Vehicle) con angolo tra i due assi di 135°. La condizione simulata è quella riguardante un autoveicolo che improvvisamente effettua una svolta ed interseca la traiettoria di una motocicletta che prosegue di moto rettilineo ad una velocità di 50 km/h, pari al limite che un qualunque veicolo deve rispettare in ambito cittadino. Questa rappresenta la configurazione 2 della normativa sugli impatti. Per esigenze di calcolo e di obiettivi il modello di auto viene rappresentato tramite una *shell* che raffigura la parte anteriore dell'automobile: cofano, paraurti, parabrezza e lamierato anteriore parziale. Questa modellazione semplificata deriva da attività antecedenti il lavoro di tesi ed è stata ritenuta adeguata al raggiungimento degli obiettivi. Questa shell verrà vincolata attraverso un comando (BOUNDARY\_SPC\_SET) che permette di bloccare la traslazione e la rotazione di un set di nodi scelti, appartenenti alla parte OV. I vincoli utilizzati non influenzano il comportamento della zona impattata. La figura seguente mostra i nodi utilizzati per vincolare la shell dell'autovettura:

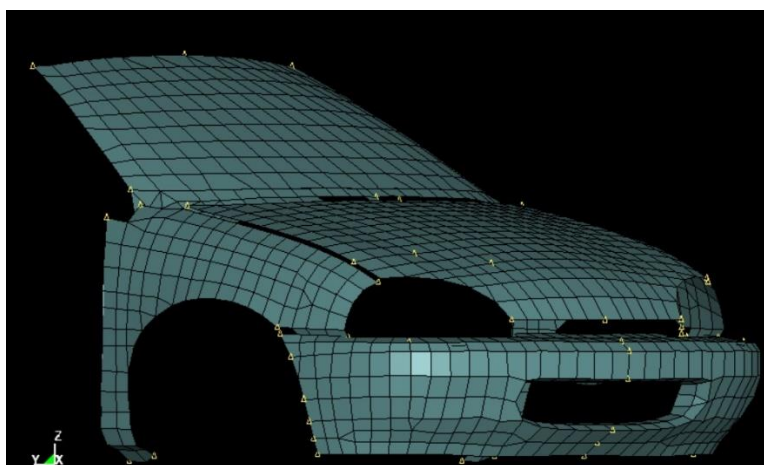


Figura 6.2: SPC parte autovettura

Settate le condizioni al contorno dell'OV del modello, si procede con l'assegnazione della velocità alla parte MC.

Come da normativa, il sistema moto-manichino deve possedere una velocità pari a 50 km/h. Per rendere l'impatto maggiormente realistico il moto viene imposto già all'inizio della simulazione. Quindi nell'istante iniziale la moto ed il manichino avranno già una velocità pari a quella impostata. Questo è possibile perché è stato dato il comando INITIAL\_VELOCITY al set di parti riguardanti manichino e moto ad eccezione delle ruote. Queste ultime, avendo

una velocità rotazionale, verranno trattate separatamente. Essendo un moto rettilineo, la ruota avrà una  $\omega$  che viene calcolata semplicemente usando la formula cinematica del moto circolare uniforme:

$$V = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{V}{r}$$

Da cui:  $\omega = 45.53 \left[ \frac{rad}{s} \right]$ .

Assegnate le velocità alle varie parti, si procede con la definizione dei contatti. Tra i vari contatti usati nel file di sviluppo del modello, i più rilevanti ed utili ai fini della prova sono i seguenti:

- Contatto manichino-shell autovettura: attraverso la sezione `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`, dove il master è la shell e lo slave è il manichino, si riesce ad evitare la compenetrazione dei due elementi e soprattutto è possibile risalire all'istante in cui le due parti vengono a contatto;
- Contatto moto-shell autovettura: seguendo la logica dell'assegnazione della parte slave e master al sistema che ha rispettivamente la mesh più e meno fitta, è stata assegnata alla moto la slave ed alla shell il master. Questo contatto, anch'esso tra superfici, permette l'urto tra i due sistemi, in modo tale da poter verificare la deformazione della motocicletta ed il tempo di volo del manichino.

## 6.2.2 Modellazione della prova a 90°

La seconda condizione simulata riguarda l'impatto del sistema moto-manichino che colpisce la parte corrispondente alle lamiere laterali di un'autovettura. Dal punto di vista numerico, gli assi di MC ed OV sono orientati di 90°. La velocità della motocicletta rimane invariata e le condizioni di assegnazione della velocità sono le stesse descritte nel paragrafo precedente. In questa condizione, la shell auto è stata vincolata scegliendo lo stesso comando usato in precedenza (`BOUNDARY_SPC_SET`).

## 6.2.3 Modellazione della prova a 90° con motocicletta ferma

La terza ed ultima simulazione riguarda uno scontro frontale tra l'autovettura che percorre una traiettoria rettilinea ad una velocità di 50 km/h che impatta

lateralmente contro il sistema motocicletta-manichino avente velocità nulla. Questo scenario è diverso rispetto ai primi due impatti in quanto è l'autovettura ad andare contro la motocicletta.

### 6.3 Fotogrammi simulazioni

La fase seguente è l'analisi vera e propria dell'impatto. La durata della simulazione è stata impostata a  $t=0.2s$ ; è un tempo sufficiente in quanto il fenomeno analizzato nei test numerici precedenti per la verifica del comportamento globale della motocicletta ha avuto una durata totale di 0.13s. Inoltre, bisogna verificare che il manichino non impatti qualunque parte esterna al sistema moto entro il lasso di tempo preimpostato utile all'apertura ed al completo funzionamento dell'airbag.

Prima di procedere alla descrizione dell'impatto, il modello ha subito alcune modifiche. In particolare, sono stati effettuati diversi test per verificare che il modello sviluppato risulti numericamente stabile. Nei test precedenti la parte relativa alle cosce, entrando in contatto con la parte serbatoio, subiva una deformazione non fisica ed era soggetta ad un forte *hourglass*, interrompendo la simulazione. Inoltre, il valore di *hourglass* era superiore al limite tollerabile per una simulazione numerica, arrivando fino al 70% del valore dell'energia interna.

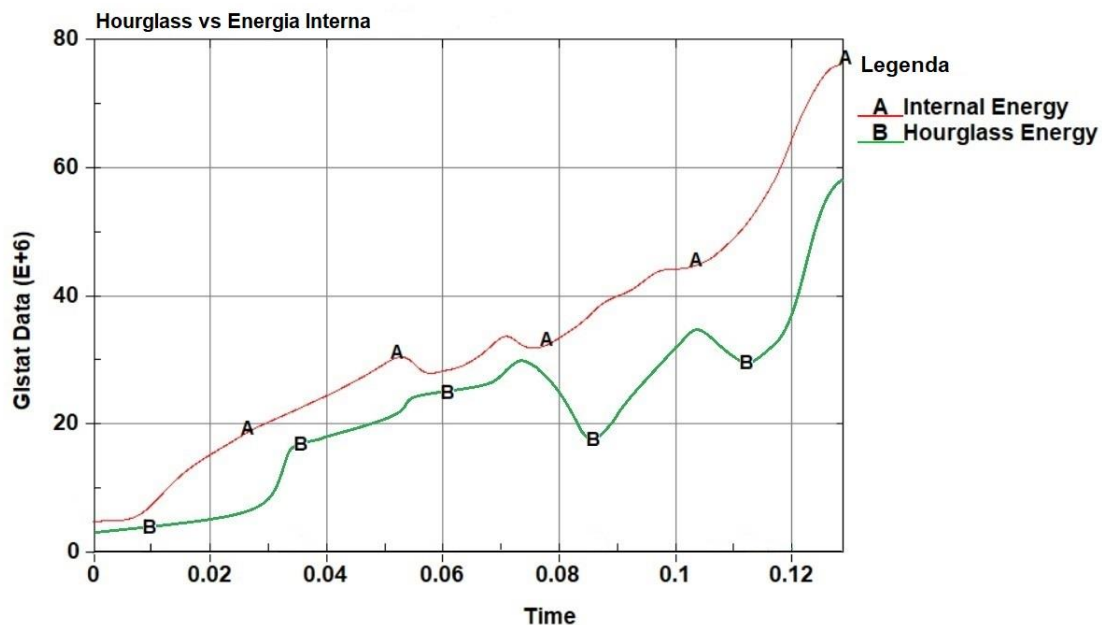


Figura 6.3: Energia di Hourglass dei test preliminari

Il problema è stato risolto rendendo la mesh delle cosce più fitta. Inoltre è stato introdotto in maniera specifica il contatto tra cosce e serbatoio. Il risultato



ottenuto vede un drastico calo dell'energia di Hourglass con valori notevolmente inferiori al 10% dell'energia interna, compatibili con le normative inerenti alle simulazioni numeriche. Le stesse condizioni si sono verificate per tutti gli impatti analizzati.

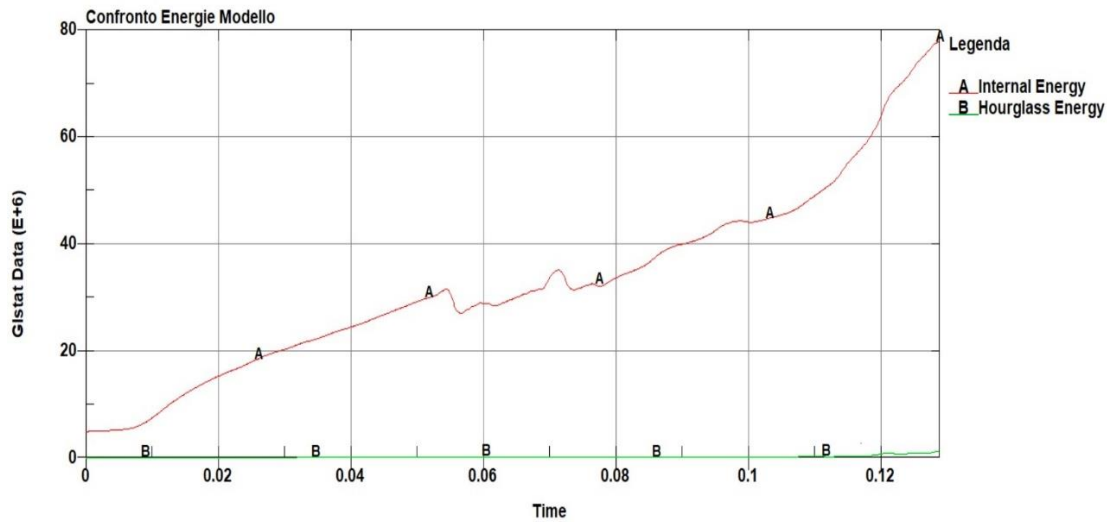


Figura 6.4: Energia di Hourglass dei test ufficiali

### 6.3.1 Impatto a 135°

Il sistema moto manichino parte con una velocità di 13888 mm/s (coerente con le unità di misura del software). All'istante  $t=0.007s$  avviene l'impatto, quindi questo tempo deve essere sottratto al tempo in cui avviene l'interazione manichino-ambiente esterno.

La simulazione procede con la deformazione strutturale della parte anteriore della motocicletta. Dopo un tempo di  $t=0.091s$ , la gomma anteriore si schiaccia e finisce parzialmente sotto la shell dell'automobile. L'oscillazione della forcella attorno al punto di giunzione con il cerchio anteriore è di circa 10 gradi, rispettando quindi la fisicità dei test sperimentali descritti nei capitoli precedenti. Il cerchio anteriore si deforma e l'inerzia dell'urto solleva la parte posteriore della moto.

Per quanto riguarda i vincoli *spotweld*, è stato notato come essi si rompono rispettivamente dopo  $t= 0.016s$  e dopo  $t=0.028s$ . La differenza nei tempi è dovuta ad un impatto non perfettamente simmetrico rispetto all'asse longitudinale del manichino che fa nascere due momenti differenti rispetto ai due arti.

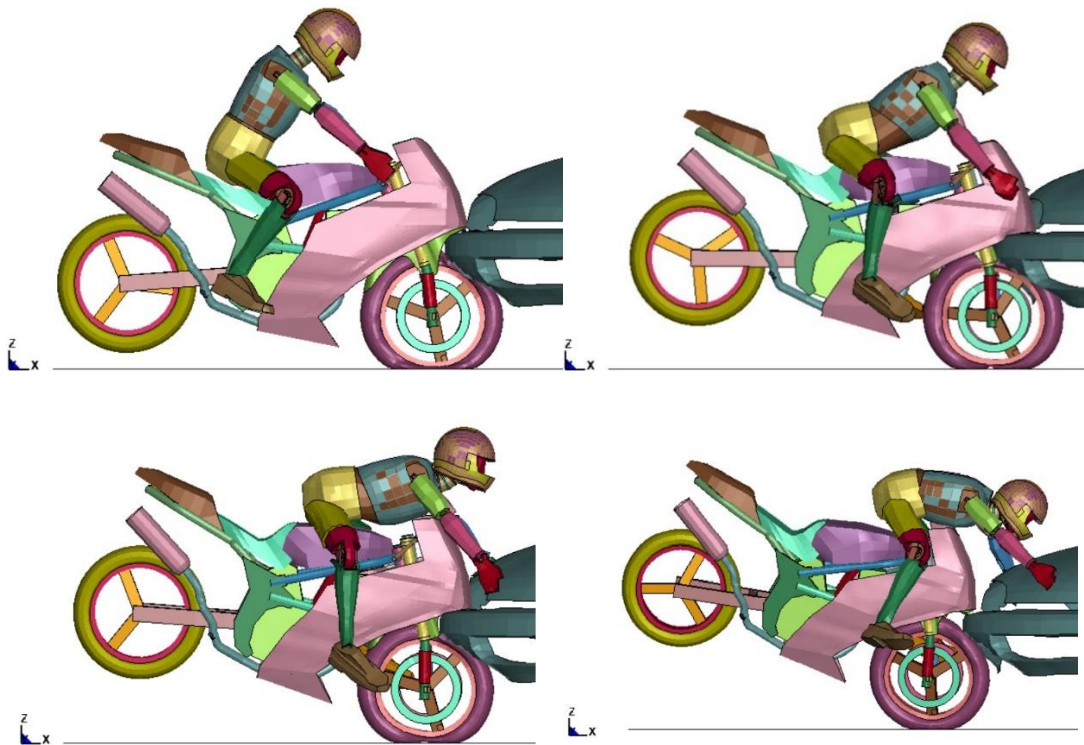


Figura 6.5: Impatto dopo  $t=0.091s$

Il tempo di rottura degli *spotweld* avviene dopo l'istante in cui la motocicletta impatta; quindi i vincoli adoperati garantiscono la stabilità e la solidità della presa della mano del manichino sulle manopole. Nell'istante considerato, l'inerzia del corpo fa sbattere la zona pelvica e la zona delle cosce contro il serbatoio risultando così significativa nella dinamica dell'evoluzione del manichino in volo. La prima parte del manichino che tocca il sistema esterno è la mano destra che interagisce con il veicolo dopo un tempo pari a  $t=0.082s$ . Sebbene la mano mostri una deformazione importante, questo impatto è influente agli obiettivi di questo elaborato in quanto l'airbag non prevede la protezione degli arti superiori.

La fase successiva riguarda l'analisi dell'evoluzione della posizione del manichino.

Per inerzia, dopo il contatto, il manichino oltrepassa la parte anteriore della motocicletta e si appresta ad impattare contro il veicolo. Effettuando diverse simulazioni e provando diversi solutori, si evince come il comportamento del manichino sia uniforme in tutti i test e che esso impatta il veicolo in un intervallo di tempo che varia tra  $t=0.11s$  e  $t=0.13s$ . In particolare, negli ultimi test, il manichino impatta esattamente la testa all'istante  $t=0.11525s$ .

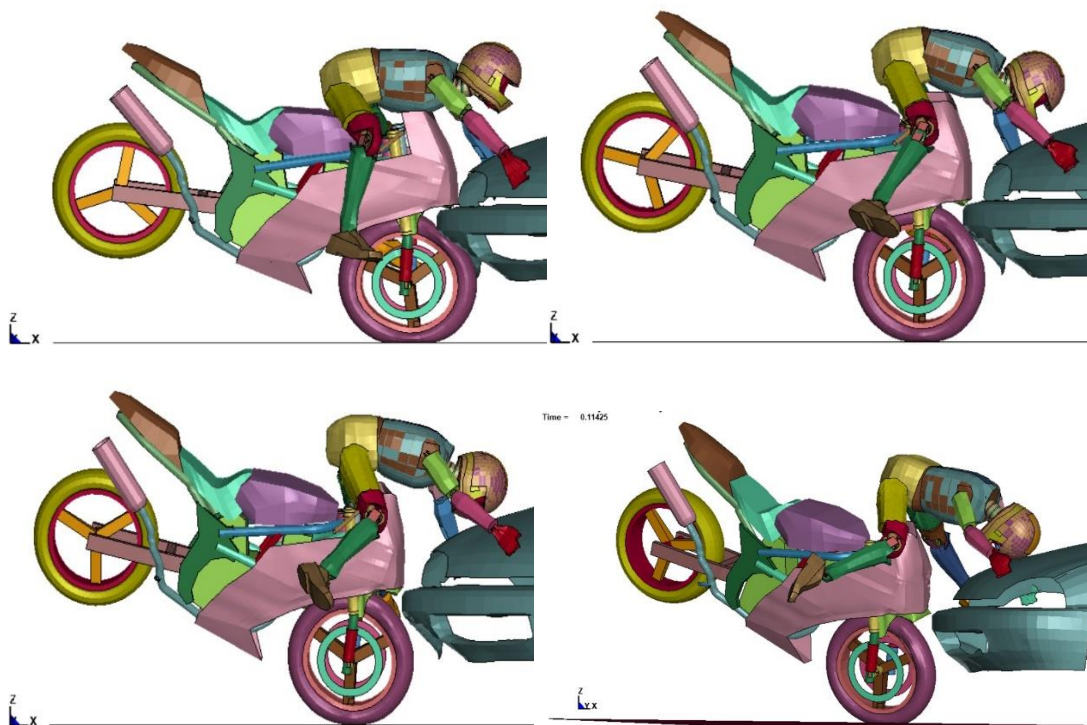


Figura 6.6: Interazione manichino autovettura impatto a 135°

Sottraendo il tempo necessario per il riconoscimento dell'incidente, il manichino impatta la testa in  $t=0.10825s$ .

Da questo impatto, si può ricavare l'HIC per verificare la severità dell'impatto:

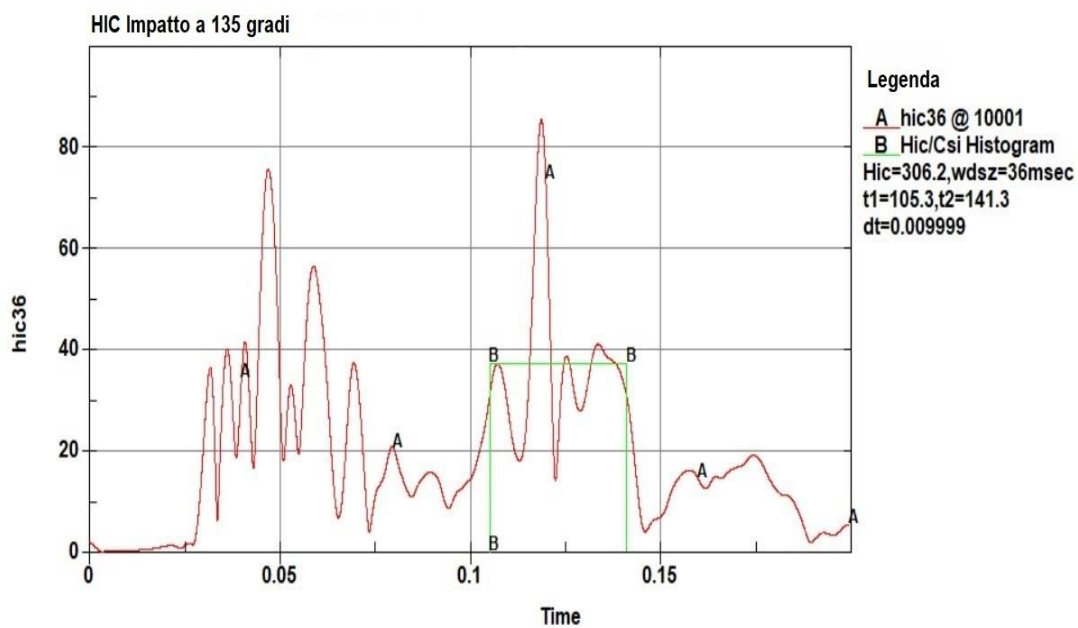


Figura 6.7: HIC Impatto a 135°

Dal grafico si evince come l'HIC sia calcolato nell'intervallo di tempo compreso tra  $t_1=0.1053s$  e  $t_2=0,1413s$ . Si ottiene un HIC di 306.2, corrispondente ad un AIS di 1. Quindi il manichino potrebbe mostrare lesioni cerebrali leggere con mal di testa e soprattutto lesioni cervicali leggere, colpo di frusta, vertigini, perdita di conoscenza, presenza di abrasioni e contusioni.

### 6.3.2 Impatto a 90° autovettura ferma

Le condizioni per l'analisi del seguente impatto rimangono invariate. Il sistema moto-manichino parte con una velocità di 13888 mm/s, con la differenza che l'inizio dell'impatto avviene all'istante  $t=0.004s$ . La differenza di tempi di inizio impatto sta semplicemente nel posizionamento della motocicletta in fase di PreProcessing. Anche questo valore deve essere sottratto dal tempo in cui avviene l'interazione manichino-ambiente esterno. La dinamica strutturale è quasi identica a quella analizzata in precedenza. Gomma anteriore, cerchio anteriore e forcella hanno lo stesso comportamento strutturale, salvo il fatto che questa volta lo schiacciamento della gomma avviene sotto la lamiera dell'autovettura. Il bordo della parte inferiore della lamiera dista circa 200 mm dal terreno mentre il paraurti (dove avviene l'impatto precedente) ne dista 260 mm. Quindi la gomma non finisce sotto l'autovettura ma impatta contro la lamiera e recupera la sua forma iniziale. Come nel precedente caso, in seguito all'urto, la parte posteriore della motocicletta si solleva.

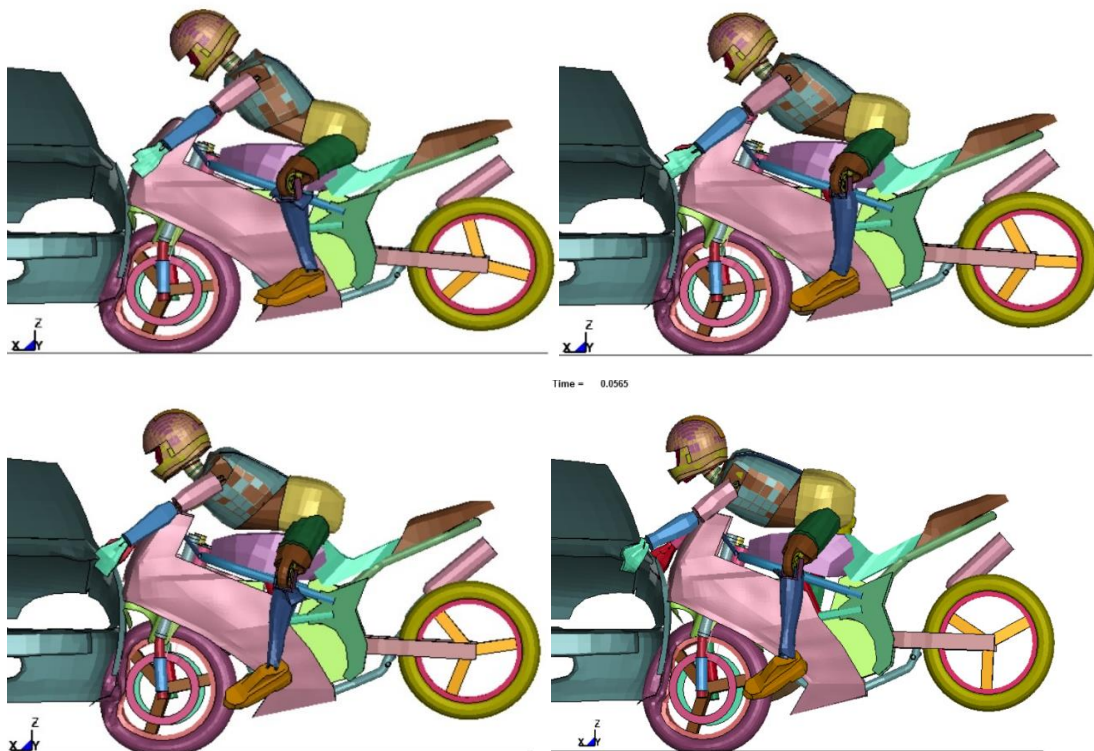


Figura 6.8: Impatto dopo  $t=0.0565 s$

La prima interazione manichino-auto avviene per  $t=0.0572s$ . Successivamente, il manichino sorvola la motocicletta ed impatta l'autovettura, sempre con la testa, in un tempo pari a  $t=0.092s$ . Sottraendo il tempo necessario al riconoscimento dell'impatto, il manichino impatta la testa dopo un  $t=0.088s$ .

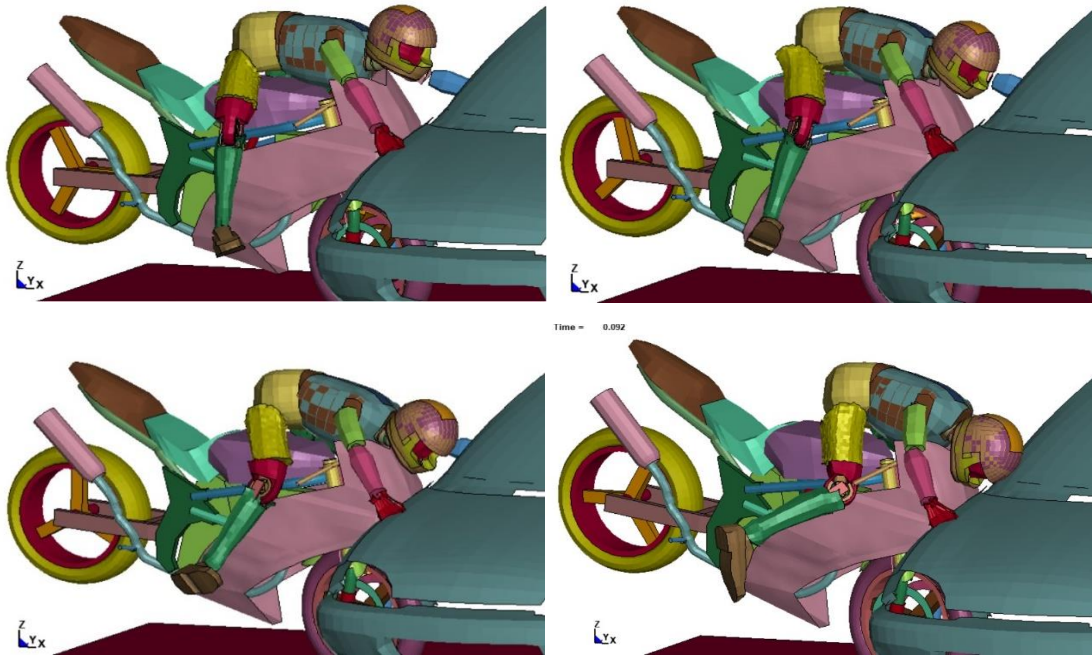


Figura 6.9: Interazione manichino autovettura impatto a  $90^\circ$  (autovettura ferma)

Viene calcolato l'HIC del seguente impatto:

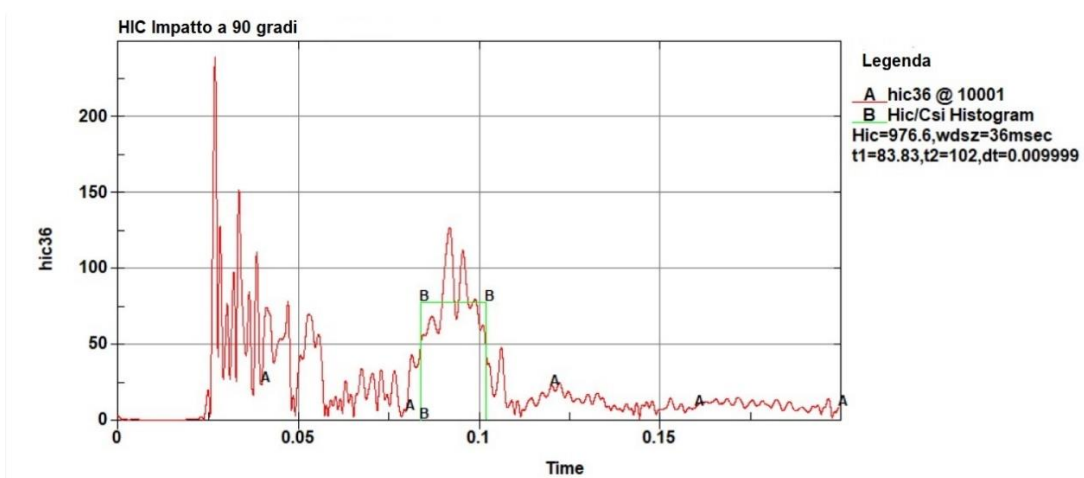


Figura 6.10: HIC Impatto a  $90^\circ$

Da questo grafico si nota come il valore dell'HIC è pari a 976.6. Questo valore corrisponde ad un AIS pari a 3, corrispondente ad una lesione seria. Il motociclista può essere soggetto ad una commozione cerebrale con o senza fratture craniche ma soprattutto ad una frattura cervicale senza danni al midollo spinale.

### 6.3.3 Impatto a 90° motocicletta ferma

Il terzo impatto analizzato prevede uno scenario diverso. In questo caso, la motocicletta subisce l'impatto dell'autovettura sul suo fianco destro. Secondo le statistiche, questo scenario è molto comune in ambito cittadino. All'autovettura è stata data una velocità di 50 km/h.

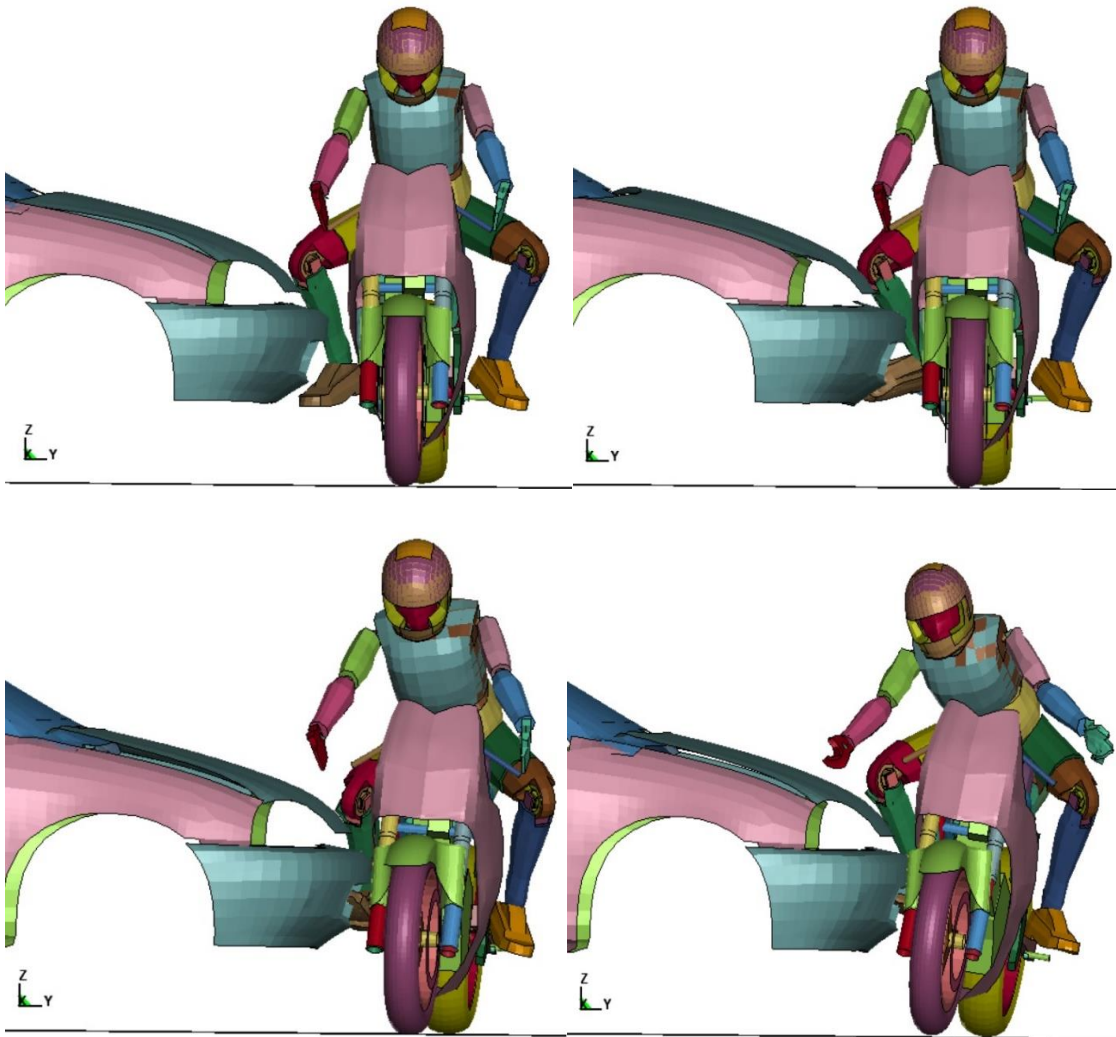


Figura 6.11: Impatto laterale motocicletta manichino

Durante il crash, dai fermoimmagine si nota che la parte inferiore della gamba destra del manichino subisce un danno notevole, mostrando una innaturale configurazione. Essendo una parte non protetta ed essendo la parte più esposta all'impatto, si trova sulla traiettoria che unisce il punto di impatto dell'autoveicolo con quello del motociclo, venendo pressata contro il telaio.

Per quanto riguarda i vincoli imposti per il collegamento moto-manichino, i valori di forza di taglio e forza assiale non sono più uguali agli impatti analizzati in precedenza. Questo aspetto deriva dal fatto che l'impatto avviene sul lato della motocicletta la quale, però, ha velocità nulla. Di conseguenza ci si aspetta che la traiettoria del manichino dopo l'impatto sia diversa, per ovvie ragioni, dai primi due tipi di impatti. Pertanto, sono stati modificati i valori di soglia di forza assiale e forza di taglio a 400 N per entrambe.

Vista la natura dell'impatto, alle ruote del motociclo sono stati impostati i coefficienti di attrito statico e dinamico per rendere realistica l'evoluzione dell'impatto. L'interazione moto-manichino avviene dopo un lasso di tempo di  $t=0.0015$  s. Di seguito vengono mostrati i fermo-immagini:

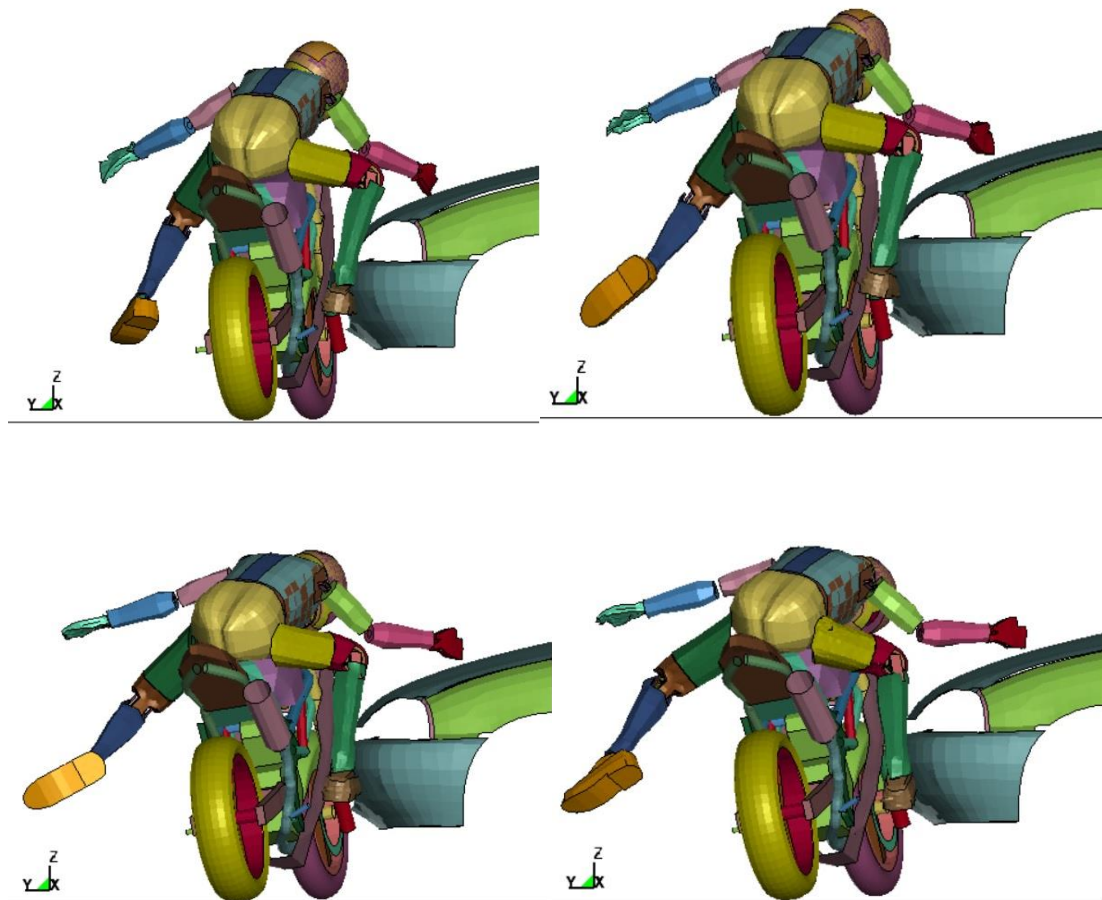


Figura 6.12: Interazione manichino autovettura impatto a 90° (motocicletta ferma)

L'impatto avviene all'altezza della pedivella destra e a sinistra dell'asse baricentrico Z facendo effettuare alla motocicletta una piccola rotazione attorno allo stesso asse. Inoltre, l'autovettura colpisce la motocicletta sopra l'asse baricentrico X quindi il motociclo tende a cadere verso l'asfalto e non verso il cofano dell'autovettura.

La parte posteriore è quella interessata all'impatto, quindi lo spostamento subito è maggiore. Invece il manichino tende a cadere verso l'autovettura senza impattare nessun sistema esterno. Gli *spotweld* utilizzati per il vincolo manichino-moto cedono all'istante  $t=0.0439s$  dopo che l'autovettura ha colpito la motocicletta, trasferendo su di essa parte dell'energia cinetica in seguito all'urto.

La Figura 6.12 illustra i frames della parte finale dell'impatto.

Le immagini mostrano l'evoluzione del crash test fino ad un tempo di  $t=0.2s$ . In questa tipologia d'impatto e fino alla fine della simulazione, il manichino tende verso il cofano ma non c'è nessuna interazione tra i due sistemi. Il modello di moto, con l'evoluzione del fenomeno, tende a cadere verso la pavimentazione a seguito dell'urto.



# Capitolo 7

## Risultati e conclusioni

Dalle analisi svolte si deduce che per gli impatti a 135° e 90° ( con autovettura ferma) il risultato non è conforme agli obblighi imposti dalle normative vigenti. Considerando che l'unico airbag a norma è quello meccanico, esso non riuscirebbe a proteggere la parte esposta all'incidente. Infatti, il tempo che impiega il manichino ad impattare l'ambiente esterno è notevolmente inferiore a quello previsto dalla normativa, considerando un campo nel quale anche i centesimi di secondo possono fare la differenza.

Nell'impatto a 135° il manichino impatta in circa 0.115 s. Questo lasso di tempo non è sufficiente ad innestare la bomboletta di gas e, quindi, il gonfiaggio dell'airbag. La differenza nei tempi è notevole se si considera l'ambiente in esame. Inoltre, la maggior parte degli airbag meccanici in commercio si attivano in un lasso di tempo pari a circa 0.13s. Nonostante sia un tempo inferiore alla normativa, esso non è comunque sufficiente a proteggere il motociclista da un impatto del genere. Considerando un limite di 0.13s, l'airbag sarebbe attivato ma non sufficientemente gonfio da garantire una protezione totale e completa del motociclista, risultando così non efficace. L'eventuale presenza di un airbag perfettamente funzionante in un lasso di tempo inferiore ai 0.13s potrebbe prevenire le lesioni cervicali che si riscontrerebbero in questo tipo di incidente (AIS=1) e potrebbe attutire l'energia di impatto, proteggendo così in modo adeguato il motociclista. Decorsi i 0.2s, l'airbag raggiunge la massima efficacia per la protezione del motociclista qualora la sua traiettoria di caduta dovesse incrociare un sistema esterno tipo un palo del semaforo o altri oggetti.

Per quanto concerne l'impatto a 90° (con autovettura ferma) c'è da premettere che l'impatto è più violento rispetto a quello analizzato precedentemente. Se nel primo caso la superficie coinvolta era il paraurti, questa volta la superficie interessata è il montante del parabrezza, parte rigida dell'autovettura. La situazione è, quindi, più problematica. Considerata la geometria del modello ed il punto dove avviene l'impatto, la superficie di interazione dei due sistemi ha una distanza minore rispetto alla configurazione precedente. Infatti, il manichino impatta la testa in un tempo pari a  $t=0.088s$ , valore minore rispetto al caso precedente. Inoltre, l'impatto avviene contro la parte laterale del parabrezza di un veicolo che rappresenta una utilitaria. Se invece analizzassimo il caso di impatto tra parte frontale del MC (codice 1 della normativa) e la zona laterale di un'altra tipologia di OV (codice 4 della normativa) - ad esempio un mezzo più robusto quale potrebbe essere un pick-up nel quale la superficie laterale è orientata di circa 90° rispetto al terreno - i tempi sarebbero sicuramente ridotti in quanto la distanza tra le superfici di contatto (montante e manichino) risulterebbe minore. A dimostrazione di ciò, l'HIC risultante da questa modellazione corrisponde ad un AIS pari a 3, il che comporta probabili lesioni serie al motociclista con fratture alla zona cervicale. Se l'airbag fosse operativo, potrebbe ridurre il danno subito dal motociclista, attutendo l'energia di impatto.

Diverso è il caso dell'autovettura che impatta contro la sezione laterale della motocicletta. Dai risultati è possibile notare come in un impatto del genere, il manichino non impatta contro nessuna superficie esterna al sistema motocicletta-manichino. Quindi, per quanto concerne questa tipologia di impatto, il giubbotto con airbag potrebbe essere utile per proteggere le zone vitali del corpo.

Considerando globalmente i risultati ottenuti si deduce che la normativa andrebbe rivalutata e rivista, analizzando in maniera approfondita le dinamiche che riguardano i tempi di attivazione dei sistemi di sicurezza. In alternativa, dati i valori dei tempi ottenuti, si potrebbe pensare di omologare i sistemi elettronici di airbag. Essi non solo sono dei sistemi di protezione obbligatori nelle corse professionistiche ma sono anche molto più veloci e reattivi dei sistemi di protezione meccanici. I loro tempi di attivazione estremamente ridotti (0.035s per il riconoscimento dell'incidente e 0.045s per il gonfiaggio ed il completo funzionamento del sistema stesso per un totale di 0.08s di *intervention time*) garantirebbero protezione completa degli organi vitali di un motociclista in qualunque tipo di impatto, offrendo ulteriore protezione rispetto ai sistemi di sicurezza che oggi sono obbligatori.

## 7.1 Sviluppi futuri

Dati i risultati ottenuti in questo elaborato, si potrebbe pensare di implementare ulteriormente il modello di moto utilizzato, cercando di effettuare una procedura di *reverse engineering* per i pezzi mancanti in modo tale che il modello numerico sia quanto più simile al modello reale.

Inoltre, un confronto sperimentale tra modello di moto numerico e controparte reale durante un fenomeno di impatto sarebbe di grande aiuto per lo sviluppo delle normative riguardanti gli airbag per motociclisti.

Infine, il lavoro sviluppato si è basato su alcuni degli impatti cittadini più frequenti. Una analisi approfondita della casistica degli impatti in ambito cittadino, in collaborazione con gli enti che si occupano di incidenti stradali, ed uno studio effettuato a diverse velocità, affineranno i risultati ottenuti, così da meglio analizzare le conseguenze sulle zone del corpo che vengono coinvolte maggiormente. Gli stessi sarebbero utili per la valutazione degli incidenti più probabili e, conseguentemente, per analizzare quali siano le parti più soggette a lesioni e come si deformino i veicoli.

# Bibliografia

- [1] [https://www.researchgate.net/figure/13-LSTC-dummies-a-Hybrid-III-rigid-version-10-5-th-female-and-50-th-and-95-th-male\\_fig7\\_264575](https://www.researchgate.net/figure/13-LSTC-dummies-a-Hybrid-III-rigid-version-10-5-th-female-and-50-th-and-95-th-male_fig7_264575)
  
- [2] Humanetics. Humanetics online documentation.  
<http://www.humaneticsatd.com/>.
  
- [3] <https://www.peta.org/wp-content/uploads/2019/10/PETAtoITMreanimaltesting.pdf>
  
- [4] Eiband, A. M. (1959). Human tolerance to rapidly applied accelerations: a summary of the literature.
  
- [5] (EN) *La storia di "Sierra Sam"*, su *ncl.ac.uk*. URL consultato il 16 aprile 2007 (archiviato dall'url originale il 27 aprile 2004).
  
- [6] Prasad, P. (1999, September). Biomechanical basis for injury criteria used in crashworthiness regulations. In *IRCOBI Conference*.
  
- [7] UNI EN ISO 21420:2020
  
- [8] <https://www.moto.it/accessori/gli-airbag-da-moto-indossabili-capitolo-1-storia-e-caratteristiche.html>

- [9] <https://www.moto.it/news/d-air-dainese-com-e-nato-e-come-funziona-l-airbag-per-motociclisti-secondo-chi-l-ha-inventato.html>
- [10] [https://www.guarnipol.it/wp-content/uploads/2017/03/38777 fascicolo riepilogativo classificazione elastomeri](https://www.guarnipol.it/wp-content/uploads/2017/03/38777_fascicolo_riepilogativo_classificazione_elastomeri)
- [11] <https://www.sicurauto.it/news/cera-una-volta-il-paraurti-levoluzione-di-un-componente-che-puo-costare-cara/>
- [12] 20161130\_Dinamica\_Del\_Veicolo\_i.pdf
- [13] <https://www.dottlucaruso.com/motocicletta-e-postura-della-schiena-consigli-pratici-per-il-massimo-piacere-di-viaggio/>
- [14] [http://fosan.it/system/files/Anno\\_39\\_3\\_1.pdf](http://fosan.it/system/files/Anno_39_3_1.pdf)
- [15] <https://www.istat.it/it/files/2012/04/StatisticaFocusIncidentiStradali.pdf>