

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi agli elementi finiti di una simulazione urto pedone con modello di corpo umano e confronto con impattore testa omologativo

Relatore

Prof.ssa Cristina Bignardi

Supervisore aziendale

Ing. Simone Cristofanelli



Candidata

Mariassunta Mecca

Marzo 2023

A mia nonna Maria e a mio nonno Giovanni

A mia nonna Assunta e a mio nonno Canio

Alla mia famiglia

A Luciano

Abstract

Ogni anno migliaia di pedoni vengono investiti da veicoli. Questo scenario è causa di una percentuale di morti elevata. I dati mostrano che il 70% circa degli incidenti automobilistici che coinvolgono pedoni avviene in aree urbane ad una velocità di collisione di 40 km/h. Le lesioni più severe si riscontrano a livello della regione corporea della testa.

In questo lavoro di tesi è stato simulato un urto pedone agli Elementi Finiti (FEM) tramite il solutore Ansys LS-DYNA con riferimento al protocollo Euro NCAP. Lo scopo del lavoro è di analizzare e confrontare i criteri di lesione su testa ottenuti utilizzando un modello completo di corpo umano e l'impattore testa omologativo.

Per eseguire l'urto sono stati utilizzati due modelli di veicolo completo presenti in letteratura dotati di una velocità iniziale di 40 km/h ed un modello di corpo umano completo di organi interni, tessuti ed ossa chiamato Total HUMAN Model for Safety (THUMS) sviluppato dalla Toyota Motor Corporation, estremamente più dettagliato rispetto ai manichini tradizionali.

Le simulazioni sono state eseguite utilizzando le risorse computazionali dell'azienda AMET e, una volta terminate, sono stati ottenuti i risultati da cui ricavare il valore degli indici utilizzati per il confronto.

Indice

1.	Introduzione	12
1.1	La sicurezza stradale	12
1.1.1	La sicurezza attiva e preventiva	13
1.1.2	La sicurezza passiva	14
1.2	L'urto pedone	16
1.2.1	La commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE)	16
1.2.1.1	Il regolamento tecnico globale UN-R127.....	16
1.2.2	Euro NCAP.....	19
1.2.2.1	Protezione degli utenti vulnerabili della strada	21
1.2.2.2	Protocollo di test sui pedoni (pedestrian testing protocol)	25
1.2.2.3	Criteri di lesione su testa	26
1.2.2.4	Il bollettino tecnico 024 (TB024).....	30
2.	Calcolo numerico	33
2.1	L'analisi numerica	33
2.2	Computer Aided Engineering (CAE)	34
2.2.1	Vantaggi e svantaggi del CAE	34
2.3	I diversi metodi numerici	36
2.4	Analisi del metodo agli elementi finiti	37
2.4.1	Classificazione degli elementi	37
2.4.2	Dalla geometria alla mesh	41
2.4.3	La matrice di rigidezza e le funzioni di forma.....	41
2.4.4	I metodi di integrazione diretta.....	43
2.4.5	I metodi espliciti ed i metodi impliciti	44
2.4.6	Il fenomeno dell'Hourglass	45
3.	I software utilizzati.....	46
3.1	Tipico processo di analisi agli elementi finiti.....	46
3.2	Pre e Post-Processing	47
3.2.1	Pre-Processing: Altair HyperMesh.....	47
3.2.2	Post-Processing: Altair HyperView e Altair HyperGraph 2D.....	48
3.3	Solving: Ansys LS-DYNA	49
4.	I modelli FEM utilizzati	50
4.1	Modelli delle vetture	50
4.2	Total HUMAN Model for Safety (THUMS).....	52
4.2.1	THUMS versione 4	53

4.3	Modello dell'impattore testa adulto.....	59
5.	Fase preliminare	61
5.1	Verifica del veicolo generico.....	61
5.2	Verifica del modello di corpo umano THUMS.....	64
5.3	Impostazioni di simulazione.....	71
6.	Analisi dei risultati	79
7.	Conclusioni.....	104
	Bibliografia.....	106

Indice delle figure

FIGURA 1. SICUREZZA STRADALE [2]	12
FIGURA 2. ATTIVAZIONE DEL SISTEMA AIRBAG [4]	14
FIGURA 3. URTO CON OCCUPANTE NON CINTURATO [4]	15
FIGURA 4. URTO CON OCCUPANTE CINTURATO [4]	15
FIGURA 5. SCHEMA ZONE DI IMPATTO NELL'URTO PEDONE [7]	17
FIGURA 6. IMPATTORE DELLA TESTA DI UN ADULTO (SINISTRA) E DI UN BAMBINO (DESTRA) [6]	18
FIGURA 7. PROGRAMMA DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA AUTOMOBILISTICA (NCAP) NEL MONDO [8]	19
FIGURA 8. LA SICUREZZA RAPPRESENTATA DALLE STELLE [9]	20
FIGURA 9. IMPATTO DELLA TESTA [12]	21
FIGURA 10. IMPATTO SULLA PARTE SUPERIORE DELLA GAMBA [13]	22
FIGURA 11. IMPATTO SULLA PARTE INFERIORE DELLA GAMBA [14]	22
FIGURA 12. AEB PEDONE [15]	23
FIGURA 13. AEB CICLISTA [16]	24
FIGURA 14. TRACCIATURA DEI PUNTI DELLA WRAP AROUND DISTANCE (A) E DELLA BONNET SIDE REFERENCE LINE (B) [17]	25
FIGURA 15. TRACCIATURA DEI PUNTI DELLE AREE DI IMPATTO TESTA (A) E GAMBA (B) [17]	25
FIGURA 16. SCHEMA DI RIFERIMENTO DELL'INTERNAL BUMPER REFERENCE LINE [17]	26
FIGURA 17. PROBABILITÀ DI LESIONE CEREBRALE ASSOCIATA AL VALORE DI BRIC. SONO PRESENTI DIVERSI LIVELLI DI AIS [33]	28
FIGURA 18. SISTEMA DI COORDINATE GLOBALI [19]	31
FIGURA 19. COMPONENTI DEL MODELLO DEL GENERICO VEICOLO [19]	32
FIGURA 20. ALGORITMO UTILIZZATO DALL'ANALISI NUMERICA [22]	33
FIGURA 21. ESEMPIO GENERICO DI DISCRETIZZAZIONE DI UN MODELLO [26]	37
FIGURA 22. SCHEMA DI CONFRONTO TRA DOMINIO CONTINUO E DISCRETO [24]	38
FIGURA 23. ELEMENTI 1D [24]	38
FIGURA 24. ELEMENTI 2D [24]	39
FIGURA 25. ELEMENTI 3D [24]	40
FIGURA 26. ELEMENTI PER REALIZZARE UNA MESH [24]	40
FIGURA 27. SCHEMA DEL PROCESSO DI ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI [26]	46
FIGURA 28. MODELLO ATTUALE E RAPPRESENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DI UNA TOYOTA YARIS DEL 2010	50
FIGURA 29. MODELLO ATTUALE E RAPPRESENTAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DI UNA HONDA ACCORD DEL 2017	51
FIGURA 30. FAMIGLIA INTERA THUMS VERSIONE 4 [32]	52
FIGURA 31. DATI DIGITALIZZATI DEL CORPO UMANO [32]	53
FIGURA 32. MODELLO DELLA TESTA [32]	54
FIGURA 33. PARTI SCHELETRICHE NEL MODELLO DEL TORSO (CON MODELLO DEL COLLO) [32]	55
FIGURA 34. PARTI DI TESSUTI MOLLI NEL MODELLO DEL TORSO [32]	56
FIGURA 35. MODELLI DELLE ESTREMITÀ [32]	56
FIGURA 36. MODELLI DELLE ARTICOLAZIONI [32]	57
FIGURA 37. MODELLO COMPLETO DEL CORPO [32]	58
FIGURA 38. MODELLO COMPLETO DEL CORPO (SCHELETRO) [32]	58
FIGURA 39. MODELLO DESCRITTIVO DI IMPATTORE TESTA	59
FIGURA 40. POSIZIONAMENTO DELL'IMPATTORE CILINDRICO NELLA ZONA DELLO SPOILER (A), DEL BUMPER (B), DEL BONNET LEADING EDGE (C) E DEL BONNET (D)	62
FIGURA 41. GRAFICI FORZA-SPOSTAMENTO DELL'IMPATTORE CILINDRICO	62
FIGURA 42. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA PER LO SPOILER	63
FIGURA 43. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA PER IL BUMPER	63
FIGURA 44. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA PER IL BONNET LEADING EDGE	63

FIGURA 45. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA PER IL BONNET	63
FIGURA 46. SOVRAPPOSIZIONE SCHELETRO THUMS (BLU) E SCHELETRO EURO NCAP (ROSSO)	65
FIGURA 47. CINEMATICA DEL THUMS	66
FIGURA 48. TRAIETTORIA DELLE COORDINATE X E Z DEI PUNTI DI TRACCIAMENTO HC, AC, T12: 30 KM/H (A), 40 KM/H (B) E 50 KM/H (C)	69
FIGURA 49. ANDAMENTO DELLA FORZA DI CONTATTO TOTALE: 30 KM/H (A), 40 KM/H (B) E 50 KM/H (C)	70
FIGURA 50. VISTA ISOMETRICA DEL VEICOLO E DEL THUMS SUL TERRENO	73
FIGURA 51. POSIZIONAMENTO RECIPROCO TRA THUMS E TOYOTA YARIS	74
FIGURA 52. POSIZIONAMENTO RECIPROCO TRA THUMS E HONDA ACCORD	75
FIGURA 53. POSIZIONAMENTO RECIPROCO TRA IMPATTORE TESTA E TOYOTA YARIS	77
FIGURA 54. POSIZIONAMENTO RECIPROCO TRA IMPATTORE TESTA E HONDA ACCORD	78
FIGURA 55. CINEMATICA DEL THUMS CASO 1, URTO CON VEICOLO TOYOTA YARIS	79
FIGURA 56. CINEMATICA DEL THUMS CASO 2, URTO CON VEICOLO TOYOTA YARIS	80
FIGURA 57. CINEMATICA DEL THUMS CASO 3, URTO CON VEICOLO TOYOTA YARIS	81
FIGURA 58. CINEMATICA DEL THUMS CASO 1, URTO CON VEICOLO HONDA ACCORD	82
FIGURA 59. CINEMATICA DEL THUMS CASO 2, URTO CON VEICOLO HONDA ACCORD	83
FIGURA 60. CINEMATICA DEL THUMS CASO 3, URTO CON VEICOLO HONDA ACCORD	84
FIGURA 61. ANDAMENTO BILANCIO ENERGETICO, URTO THUMS E TOYOTA YARIS	86
FIGURA 62. ANDAMENTO BILANCIO ENERGETICO, URTO THUMS E HONDA ACCORD	87
FIGURA 63. ANDAMENTO BILANCIO ENERGETICO, URTO IMPATTORE TESTA E TOYOTA YARIS	87
FIGURA 64. ANDAMENTO BILANCIO ENERGETICO, URTO IMPATTORE TESTA E HONDA ACCORD	88
FIGURA 65. ANDAMENTO RAPPORTO ENERGETICO, URTO THUMS E TOYOTA YARIS	89
FIGURA 66. ANDAMENTO RAPPORTO ENERGETICO, URTO THUMS E HONDA ACCORD	89
FIGURA 67. ANDAMENTO RAPPORTO ENERGETICO, URTO IMPATTORE TESTA E TOYOTA YARIS	90
FIGURA 68. ANDAMENTO RAPPORTO ENERGETICO, URTO IMPATTORE TESTA E HONDA ACCORD	90
FIGURA 69. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA, URTO THUMS E TOYOTA YARIS	91
FIGURA 70. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA, URTO THUMS E HONDA ACCORD	91
FIGURA 71. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA, URTO IMPATTORE TESTA E TOYOTA YARIS	92
FIGURA 72. ANDAMENTO MASSA AGGIUNTA, URTO IMPATTORE TESTA E HONDA ACCORD	92
FIGURA 73. CONFRONTO THUMS (SINISTRA) VS IMPATTORE (DESTRA), CASO 1 HONDA ACCORD	93
FIGURA 74. CONFRONTO THUMS CONTRO TOYOTA YARIS (SINISTRA) E HONDA ACCORD (DESTRA), CASO 2	93
FIGURA 75. ANDAMENTO ACCELERAZIONI RISULTANTI, TOYOTA YARIS	94
FIGURA 76. ANDAMENTO VELOCITÀ ANGOLARI, TOYOTA YARIS	94
FIGURA 77. ANDAMENTO ACCELERAZIONI RISULTANTI, TOYOTA YARIS	95
FIGURA 78. ANDAMENTO VELOCITÀ ANGOLARI, TOYOTA YARIS	95
FIGURA 79. ANDAMENTO ACCELERAZIONI RISULTANTI, TOYOTA YARIS	96
FIGURA 80. ANDAMENTO VELOCITÀ ANGOLARI, TOYOTA YARIS	96
FIGURA 81. ANDAMENTO ACCELERAZIONI RISULTANTI, HONDA ACCORD	97
FIGURA 82. ANDAMENTO VELOCITÀ ANGOLARI, HONDA ACCORD	97
FIGURA 83. ANDAMENTO ACCELERAZIONI RISULTANTI, HONDA ACCORD	98
FIGURA 84. ANDAMENTO VELOCITÀ ANGOLARI, HONDA ACCORD	98
FIGURA 85. ANDAMENTO ACCELERAZIONI RISULTANTI, HONDA ACCORD	99
FIGURA 86. ANDAMENTO VELOCITÀ ANGOLARI, HONDA ACCORD	99
FIGURA 87. CONFRONTO DEI VALORI DI HIC, VEICOLO TOYOTA YARIS	100
FIGURA 88. CONFRONTO DEI VALORI DI HIC, VEICOLO HONDA ACCORD	100
FIGURA 89. CONFRONTO DEI VALORI DI BRIC, VEICOLO TOYOTA YARIS	102
FIGURA 90. CONFRONTO DEI VALORI DI BRIC, VEICOLO HONDA ACCORD	103

Indice delle tabelle

TABELLA 1. CARATTERISTICHE DEGLI IMPATTORI TESTA ADULTO E BAMBINO [6]	18
TABELLA 2. DESCRIZIONE DEI LIVELLI AIS [34]	29
TABELLA 3. CONVENZIONE DI UNITÀ DI MISURA IMPIEGATE NEL MODELLO DI IMPATTORE TESTA	59
TABELLA 4. COMPOSIZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI IMPATTORE TESTA	60
TABELLA 5. POSIZIONE INIZIALE AM50 RIPORTATA NEL TB024 [19]	64
TABELLA 6. POSTURA INIZIALE THUMS	65
TABELLA 7. NODI DI TRACCIAMENTO THUMS	67
TABELLA 8. VELOCITÀ INIZIALE IMPATTORE TESTA IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE PER L'URTO CON TOYOTA YARIS	76
TABELLA 9. VELOCITÀ INIZIALE IMPATTORE TESTA IN FUNZIONE DELLA POSIZIONE PER L'URTO CON HONDA ACCORD	76

1. Introduzione

1.1 La sicurezza stradale

Dopo gli anni in cui la pandemia ha visto la sua fase più acuta, il primo semestre del 2022 è stato caratterizzato da una ripresa della mobilità e, come conseguenza, un aumento di incidenti stradali. Nel semestre gennaio-giugno 2022 si registra, rispetto allo stesso periodo del 2021, un aumento del +24,7% del numero di incidenti stradali con lesioni a persone, del +25,7% dei feriti e del +15,3% delle vittime entro il trentesimo giorno. Per il decennio 2021-2030, l'Unione Europea si è posta come obiettivo sulla sicurezza stradale il dimezzamento del numero di vittime e di feriti gravi [1].

Le vittime stradali comportano un costo sia a livello umano che a livello economico. Per questi motivi, le istituzioni nazionali ed internazionali hanno introdotto norme al fine di motivare i produttori a rendere sempre più sicuri i loro prodotti.

Le norme stradali introdotte hanno lo scopo di limitare i danni derivanti da un incidente per l'occupante dell'autovettura e per tutti gli utenti vulnerabili della strada. Inoltre, un ulteriore obiettivo è anche quello di impedire che l'evento traumatico stesso si verifichi.

Le principali cause di un incidente stradale sono riconducibili a:

- *Ambiente*: incide per il 7-10% ed include il livello di illuminazione delle strade ed il loro stato.
- *Veicolo*: concorre per il 3-5% ed è riferito alla mancata manutenzione, molti incidenti sono causati da un insufficiente impianto frenante o imputabili agli pneumatici.
- *Fattore umano*: incide per l'85-90% ed è la causa principale degli incidenti. Questi sono riconducibili ad una guida distratta, ad un andamento indeciso, velocità non adeguata alle caratteristiche della strada e mancato rispetto della distanza di sicurezza [2].

Come schematizzato in figura 1, nell'ambito della sicurezza stradale relativa al veicolo vi sono tre sottocategorie:

- *Sicurezza preventiva*: riduce, in condizioni di guida normale, il rischio e la severità dell'incidente.
- *Sicurezza attiva*: riduce, in situazioni d'emergenza, il rischio e la severità dell'urto.
- *Sicurezza passiva*: riduce, a parità di severità d'urto, il rischio e la gravità delle lesioni.

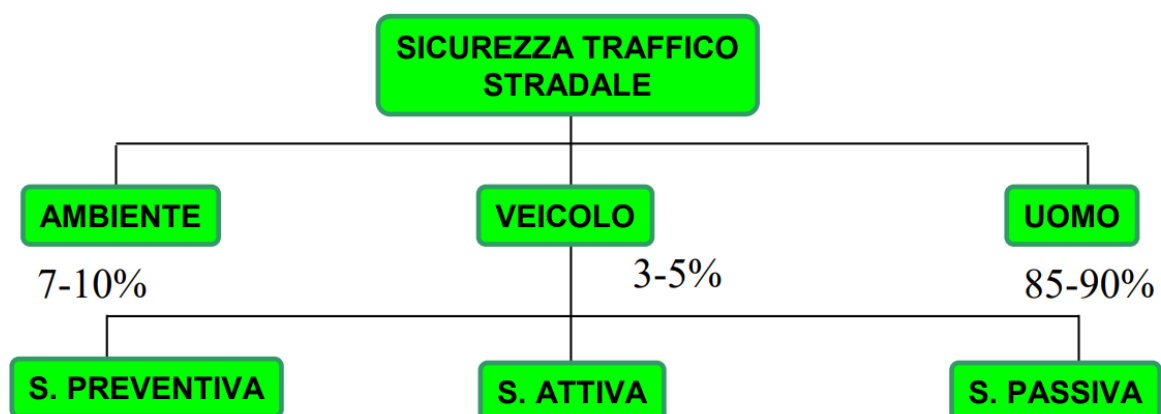


Figura 1. Sicurezza stradale [2]

1.1.1 La sicurezza attiva e preventiva

Con il termine sicurezza preventiva si intende un insieme di dispositivi che svolgono una determinata funzione ma il cui buono stato può essere fonte di prevenzione del rischio di incidente.

Rientrano in questa categoria:

- *I freni.*
- *Le luci.*
- *Lo sterzo.*
- *I pneumatici e gli ammortizzatori.*
- *Il tergicristallo.*

La sicurezza attiva comprende tutti quei sistemi che hanno la funzione di evitare che un incidente si verifichi. Questi sistemi vengono raggruppati sotto il nome di Advanced Driver Assistance System (ADAS) e tra questi vi sono:

- *ABS (sistema antibloccaggio delle ruote):* è un sistema che, in frenata, impedisce il bloccaggio di una ruota mentre le altre ancora girano. Sulle ruote sterzanti, il bloccaggio di una o di entrambe fa sì che esse perdano la capacità di dirigere il veicolo, il quale continua a muoversi nella direzione che aveva in quel momento, non permettendo più la possibilità di poter evitare un ostacolo. L'introduzione dell'ABS consente al veicolo di poter effettuare tali manovre, il sistema provvede a far diminuire la pressione sulla pinza del freno di quella ruota in modo da farle riprendere la rotazione così da consentire, tramite lo sterzo, di cambiare direzione al veicolo.
- *Sistemi anti-collisione:* sono sistemi utilizzati per la rilevazione di ostacoli o di altri veicoli in avvicinamento.
- *Sistemi per la rilevazione delle condizioni psico-fisiche del conducente:* sono sistemi di assistenza alla guida con l'obiettivo di monitorare le condizioni del conducente, attivando un segnale di allarme a bordo del veicolo quando risulta che esse hanno raggiunto un determinato livello di anomalia.
- *Il cofano attivo:* in caso di urto pedone il cofano si alza aumentando lo spazio di collasso tra il punto d'impatto e le strutture rigide sottostanti e assorbendo parte dell'energia.
- *Sistemi per la correzione automatica degli errori di guida:* controllano la potenza sulle ruote motrici impedendo il loro slittamento e quindi la perdita di controllo in curva, impediscono lo sbandamento laterale nelle curve strette affrontate ad alta velocità, altri sensori controllano la posizione del veicolo sulla corsia e rispetto alle altre autovetture provvedendo a diminuire la potenza del motore ed effettuano una sterzata di correzione [3].

1.1.2 La sicurezza passiva

La sicurezza passiva è stata introdotta con l'obiettivo di gestire l'energia cinetica posseduta dal veicolo e dai suoi occupanti al momento dell'urto. Il fine è quello di assorbire l'energia cinetica in modo tale che i corpi non urtino, o urtino a velocità inferiori, contro le strutture del veicolo o contro il suolo. I dispositivi introdotti hanno lo scopo di ridurre le lesioni durante un incidente. In questa categoria rientrano:

- *Gli airbag*: hanno la funzione di impedire il contatto della testa e del volto degli occupanti con il volante o il cruscotto. Gli airbag frontali sono contenuti in un apposito vano dotato di coperchio sia nello sterzo che nel cruscotto. Appositi sensori rilevano la decelerazione brusca dovuta ad un impatto, il segnale viene ricevuto, elaborato e inviato dalla centralina al detonatore, il quale fa sì che la capsula esplosiva rilascia le sostanze contenute al suo interno e gonfia il “sacco” proprio mentre testa e torace si stanno avvicinando.

Il meccanismo è illustrato nella seguente figura:

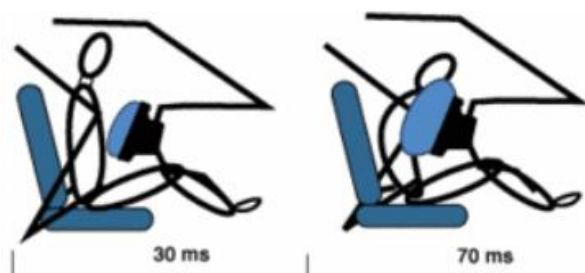


Figura 2. Attivazione del sistema airbag [4]

- *Le cinture di sicurezza*: sono, in caso di incidente, uno dei più importanti meccanismi di protezione per gli occupanti di un'autovettura. Esse riducono il rischio che guidatore e passeggeri urtino l'interno del veicolo o vengano catapultati fuori al momento dell'impatto.

Questo sistema, se dotato di pretensionatore ed accompagnato con l'airbag, riduce del 50% la probabilità di morte in caso di un incidente. Il pretensionatore è azionato da una molla o da un piccolo detonatore e, nel momento dell'urto, “tira” la cintura verso il corpo in modo da eliminare il lasco della cintura e far sì che sia efficace immediatamente.

La figura 3 descrive la situazione in cui, in caso di urto frontale con conducente non cinturato, quest'ultimo dapprima impatta con le gambe la parte inferiore del cruscotto, in seguito il torace entra in contatto con il volante ed infine il corpo si solleva provocando l'impatto della testa contro il parabrezza o la cornice che lo contiene.

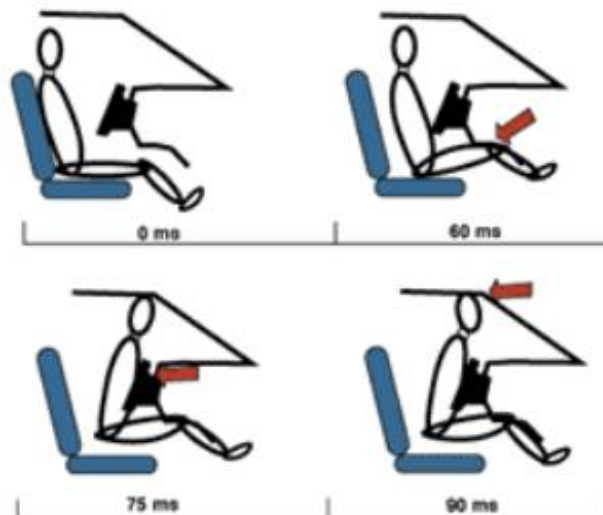


Figura 3. Urto con occupante non cinturato [4]

In caso di conducente cinturato questa situazione viene notevolmente migliorata (figura 4), rimane la probabilità di urto della testa o del volto contro il volante ma questo problema viene gestito dall'airbag.



Figura 4. Urto con occupante cinturato [4]

- *I poggiatesta*: i danni al collo costituiscono circa il 70% delle richieste di risarcimento. I poggiatesta sono stati introdotti per impedire la flessione all'indietro della testa nel momento dell'impatto in caso di urto posteriore, causa di lesioni ai tessuti muscolari ed alle vertebre cervicali.
- *I dispositivi di ritenuta per bambini*: a causa della loro scarsa resistenza muscolare e la maggiore delicatezza dei loro organi, i bambini sono i soggetti più esposti a lesioni per questo, in auto, devono viaggiare con gli appositi sistemi di ritenuta.
- *Parte anteriore e posteriore del veicolo*: il design di paraurti, cofano e parabrezza è studiato in modo da ottimizzare l'assorbimento di energia e, dunque, minimizzare le lesioni derivanti da un urto pedone [4].

1.2 L'urto pedone

Ogni anno migliaia di pedoni e ciclisti vengono investiti da veicoli. I dati riportano che, annualmente nell'Unione Europea circa 8000 pedoni e ciclisti muoiono e circa 300 000 sono i feriti. La maggior parte di questi incidenti si verifica in aree urbane dove si possono subire lesioni gravi o mortali a velocità relativamente basse, in particolare nel caso di bambini.

Le statistiche mostrano che la più alta frequenza di incidenti è per i bambini dai cinque ai nove anni, e per gli adulti di età superiore ai sessanta anni. La frequenza di lesioni gravi e mortali (scala di lesioni abbreviate: AIS 2-6) è più alta per le regioni del corpo della testa, sia per i bambini che per gli adulti, e per la gamba dell'adulto.

La principale fonte di lesioni alla testa dei bambini è la superficie superiore del cofano/parafango, mentre le lesioni alla testa degli adulti derivano da impatti sia sulla superficie superiore del cofano/parafango che sull'area del parabrezza. Per le lesioni alle gambe degli adulti, la fonte principale è il paraurti anteriore dei veicoli.

I dati mostrano che una velocità di collisione fino a 40 km/h può coprire oltre il 75% delle lesioni totali dei pedoni in tutte le regioni [6].

1.2.1 La commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE)

La commissione economica europea (ECE) mira a creare all'interno del nostro continente un sistema uniforme di regolamenti utilizzati per la progettazione dei veicoli. I veicoli conformi alle normative ECE ricevono un marchio di omologazione, requisito obbligatorio per determinati componenti utilizzati nell'industria automobilistica e per i veicoli venduti all'interno dell'Unione Europea (UE).

Con l'omologazione ECE di prodotto, i distributori e i produttori del settore automotive possono scambiare liberamente i loro prodotti all'interno dell'Unione. In tutti gli stati che hanno aderito all'UN agreement del 1958, per poter commercializzare i componenti/sistemi installati sui veicoli e presenti nella lista di regolamenti UNECE, occorre ottenere l'omologazione rilasciata da uno dei Ministeri dei Trasporti che hanno sottoscritto il suddetto accordo internazionale [5].

1.2.1.1 Il regolamento tecnico globale UN-R127

Il regolamento tecnico globale UN-R127 [6] è stato emanato con il fine di ridurre significativamente la gravità delle lesioni subite dai pedoni coinvolti in impatti con i veicoli. Il documento si basa su dati provenienti da una serie di fonti, tra cui l'International Harmonized Research Activities (IHRA) ed il gruppo di lavoro per la sicurezza dei pedoni (PS).

I temi affrontati riguardano la protezione delle regioni del corpo della testa, sia per i bambini che per gli adulti, e per la gamba dell'adulto.

I test proposti in questo documento tecnico sono stati sviluppati sulla base degli attuali veicoli leggeri, tenendo conto della cinematica dei pedoni quando vengono colpiti da tali veicoli. Per questo motivo, l'ambito di applicazione è limitato alle autovetture, ai veicoli sportivi (SUV) ed agli autocarri leggeri.

Durante l'incidente tra pedone e auto, il pedone si trova nella normale postura di camminata, il che significa che il pedone è in piedi di lato rispetto al veicolo e viene colpito lateralmente. Il primo impatto avviene generalmente tra la regione del ginocchio ed il paraurti anteriore del veicolo. Poiché questo contatto iniziale è solitamente al di sotto del baricentro del pedone, la parte superiore del corpo inizia a ruotare verso il veicolo. Il secondo contatto avviene solitamente tra il bordo anteriore del cofano e la zona pelvica del pedone. Le gambe e il bacino del pedone hanno raggiunto a questo punto la velocità lineare del veicolo e la parte superiore del corpo (testa e torace) sta ancora ruotando verso il veicolo. La fase finale della collisione coinvolge la testa e il torace che colpiscono il veicolo con una velocità lineare prossima a quella della velocità iniziale di impatto del veicolo.

Il paraurti, la parte superiore del cofano e l'area del parabrezza, compresi i montanti anteriori, sono le zone del veicolo soggette ai requisiti della normativa in oggetto.

La normativa ha lo scopo di simulare un impatto pedonale e incoraggiare contromisure che miglioreranno la protezione dei pedoni. Tra queste misure, si richiede che i cofani e i paraurti dei veicoli assorbano l'energia in modo più efficiente se colpiti da un impatto tra veicolo e pedone a 40 km/h.

Il documento è costituito da due serie di criteri di prestazione che si applicano alla parte superiore del cofano ed ai parafranghi ed al paraurti anteriore.

Sono state sviluppate procedure di prova per ciascuna regione utilizzando sottosistemi di impatto per la protezione della testa di adulti e bambini e per la protezione delle gambe degli adulti.

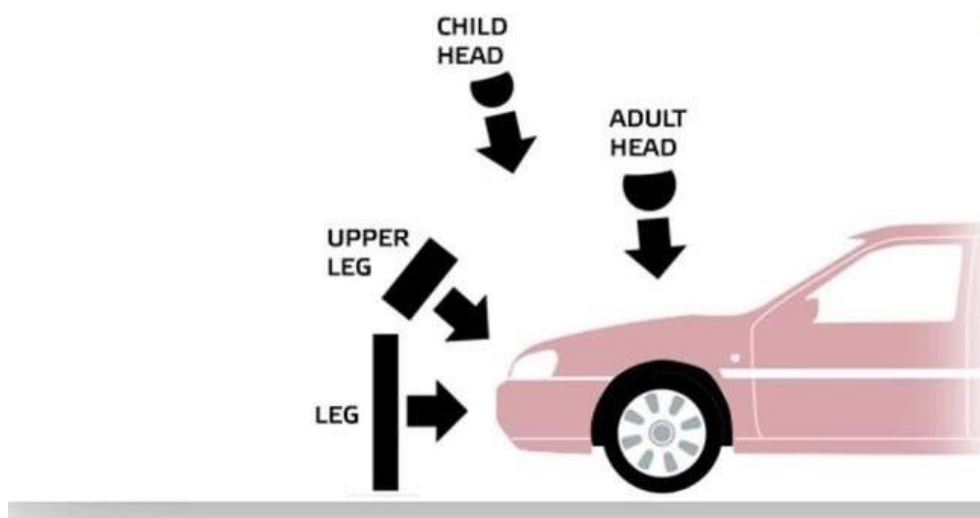


Figura 5. Schema zone di impatto nell'urto pedone [7]

La normativa prevede due dispositivi di simulazione della testa: per adulto e per bambino. In tabella 1 sono riportate le caratteristiche dei due impattori (figura 6).

Tabella 1. Caratteristiche degli impattori testa adulto e bambino [6]

	Adulto	Bambino
Materiale	Alluminio	
Forma	Sferica	
Diametro	165 ± 1 mm	
Massa	$4,5 \pm 0,1$ kg	$3,5 \pm 0,07$ kg
Sensori	1 accelerometro triassiale/ 3 accelerometri uniassiali	

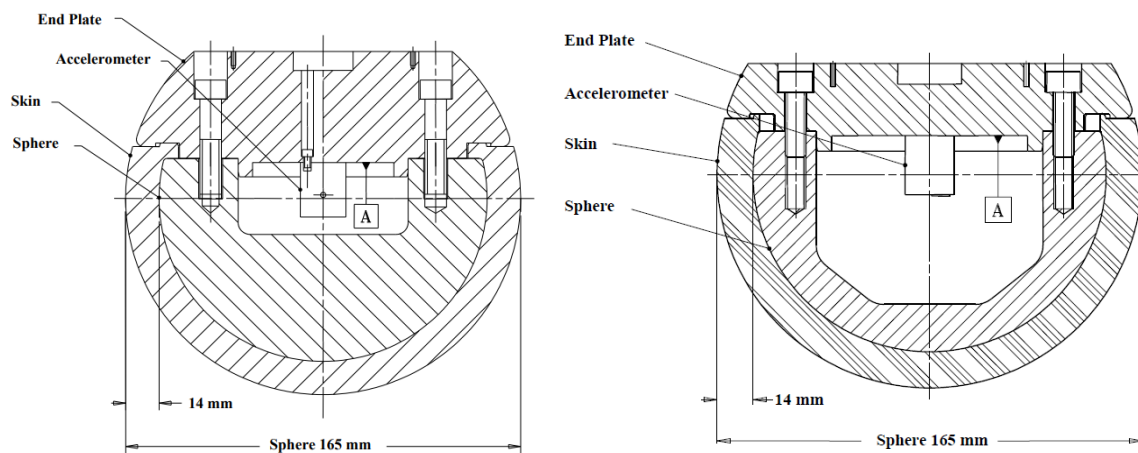


Figura 6. Impattore della testa di un adulto (sinistra) e di un bambino (destra) [6]

Per poter eseguire il test di omologazione bisogna che i dispositivi di simulazione della testa si trovino in una posizione reciproca ben definita rispetto all'oggetto impattante, ossia in "volo libero", aventi una velocità richiesta di $9,7 \text{ m/s} \pm 0,2 \text{ m/s}$. La direzione dell'urto deve trovarsi nel piano verticale longitudinale del veicolo da sottoporre a prova con un angolo di $65^\circ \pm 2^\circ$ rispetto all'orizzontale. La direzione dell'impatto delle prove sulla struttura anteriore deve essere verso il basso e all'indietro. La velocità misurata deve essere regolata tenendo conto di tutti i fattori che possono influenzare il dispositivo di simulazione tra il punto di misurazione e il punto di impatto, al fine di determinare la velocità del dispositivo di simulazione al momento dell'impatto. L'angolo del vettore velocità al momento dell'impatto deve essere calcolato o misurato.

1.2.2 Euro NCAP

Un'automobile, per poter essere commercializzabile, deve necessariamente superare i test di omologazione. Oltre a questi, a partire dal 1978 negli Stati Uniti è stato fondato il primo programma NCAP (New Car Assessment Program) dalla National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) con lo scopo di promuovere la costruzione di automobili sempre più sicure nei confronti degli occupanti. In questo programma le vetture vengono sottoposte ad ulteriori test più severi per valutarne la sicurezza in modo da minimizzare gli incidenti stradali ed il numero di decessi. I test di rating sono differenti e dipendono dal mercato a cui si fa riferimento, in quanto negli anni si sono sviluppati diversi programmi in diverse parti del mondo, come raffigurati in figura 7 [8].

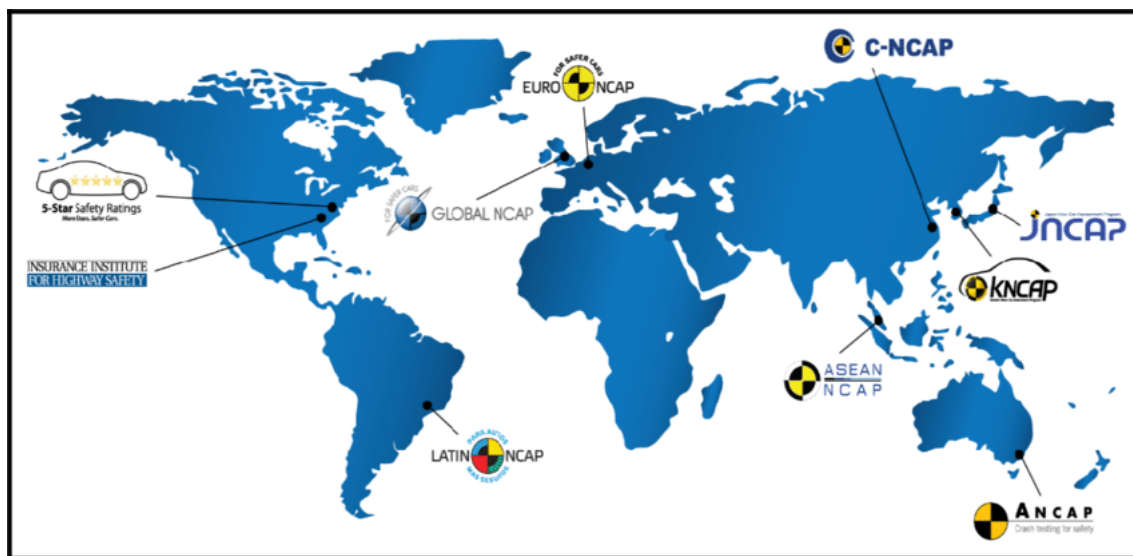


Figura 7. Programma di valutazione della sicurezza automobilistica (NCAP) nel mondo [8]

In questo lavoro si fa riferimento al programma vigente in Europa, Euro NCAP, fondato nel 1997 e sostenuto dall'Unione Europea.

L'Euro NCAP utilizza un criterio di valutazione della sicurezza basato su un punteggio in stelle, da 0 a 5, per aiutare famiglie ed aziende a confrontare i veicoli e scegliere quello migliore in base alle proprie esigenze. I veicoli sono sottoposti ad una serie di test rappresentanti gli scenari di collisione più pericolosi, si assegna un numero elevato di stelle al veicolo che dimostra non solo un buon risultato al test, ma anche che i dispositivi di sicurezza sul modello testato sono disponibili per tutti i consumatori in Europa.

Con l'introduzione di ulteriori innovazioni tecnologiche, il sistema di valutazione in stelle si evolve. L'ultima valutazione è la più rilevante e bisogna comparare i risultati di anni differenti solo se i cambiamenti dello schema di valutazione sono minimi. Tenendo conto di questi cambiamenti, le valutazioni delle auto scadono al superamento del sesto anno dalla data di valutazione.

A partire dal 2016, ad alcuni veicoli si è data la possibilità di una doppia valutazione in stelle. La prima è riferita ad un equipaggiamento di sicurezza che è di serie su tutte le versioni disponibili sul mercato auto europeo (EU28). La seconda valutazione è riferita ad un servizio aggiuntivo, il Safety Pack, un pacchetto di sicurezza avanzato opzionale che può essere aggiunto su richiesta del consumatore [9].

Di seguito viene spiegato a cosa si riferiscono le stelle nel sistema attuale:

	Sicurezza 5 stelle: Eccellente protezione complessiva in caso di impatto e veicolo ben equipaggiato con una tecnologia anticollisione completa e robusta
	Sicurezza 4 stelle: Buona protezione di tutti gli occupanti in caso di impatto; si incoraggiano miglioramenti della tecnologia anticollisione
	Sicurezza 3 stelle: Almeno una protezione media degli occupanti, ma il veicolo non sempre è dotato delle più recenti funzionalità anticollisione
	Sicurezza 2 stelle: Protezione nominale in caso di impatto, ma mancanza di una tecnologia anticollisione
	Sicurezza 1 stella: Protezione da impatto scarsa e insufficiente in termini di tecnologia anticollisione
	Sicurezza 0 stelle: il veicolo soddisfa gli standard di omologazione per poter essere legalmente venduto ma è privo della moderna tecnologia di sicurezza essenziale

Figura 8. La sicurezza rappresentata dalle stelle [9]

Euro NCAP ha introdotto la valutazione complessiva della sicurezza basandosi sui risultati ottenuti in quattro aree di valutazione [10]:

- *Protezione dell'occupante adulto* (per il conducente ed i passeggeri).
- *Protezione dei bambini.*
- *Protezione degli utenti vulnerabili della strada* (ciclisti e pedoni).
- *Safety assist* (valuta le tecnologie di assistenza alla guida e di prevenzione degli incidenti).

1.2.2.1 Protezione degli utenti vulnerabili della strada

Euro NCAP esegue dei test per valutare le probabili lesioni alla testa, al bacino, alla parte superiore e inferiore della gamba che possono essere provocate quando un utente vulnerabile della strada (pedone e ciclista) viene impattato da un'automobile.

Le auto che dispongono di un sistema di frenata di emergenza autonoma (AEB) che riconosce pedoni e ciclisti, possono guadagnare punti aggiuntivi [11].

Di seguito, verranno illustrati brevemente i diversi test eseguiti.

Impatto della testa

Per stimare il rischio potenziale di trauma cranico nel caso in cui un veicolo colpisca un adulto o un bambino, vengono eseguiti dei test di impatto a 40 km/h, utilizzando un dispositivo di simulazione della testa di un adulto o di un bambino. I siti di impatto vengono valutati sulla base della protezione offerta che viene classificata come buona, adeguata, marginale, debole o scarsa [12].



Figura 9. Impatto della testa [12]

Impatto sulla parte superiore della gamba

Per valutare le lesioni al bacino e al femore del pedone nell'impatto con il bordo anteriore del cofano, vengono eseguiti una serie di test a 40 km/h utilizzando un dispositivo di simulazione della parte superiore della gamba di un adulto. I risultati ottenuti vengono classificati in base alla protezione offerta come: buona, adeguata, marginale, debole o scarsa [13].



Figura 10. Impatto sulla parte superiore della gamba [13]

Impatto sulla parte inferiore della gamba

Per verificare le lesioni alla gamba, al ginocchio ed ai legamenti, provocate dall'impatto tra gamba e paraurti, anche in questo caso, viene eseguita una serie di test di impatto a 40 km/h utilizzando un dispositivo di simulazione della gamba di un adulto. I risultati ottenuti vengono classificati in base alla protezione offerta come: buona, adeguata, marginale, debole o scarsa [14].



Figura 11. Impatto sulla parte inferiore della gamba [14]

AEB pedone

AEB (Autonomous Emergency Braking) è un sistema di sicurezza attiva con frenata di emergenza autonomo in grado di arrestare l'auto in sicurezza prima che un pedone o un ciclista venga colpito, o almeno ridurre la velocità della collisione. Gli scenari analizzati sono quelli che potrebbero provocare lesioni mortali al pedone. Tra questi:

- *Tre scenari di incidente in cui il pedone attraversa direttamente la traiettoria del veicolo di prova:* un adulto che corre dal lato del conducente del veicolo; un adulto che cammina dal lato del passeggero (per questo scenario vengono eseguiti due test); e un bambino che correva tra le auto parcheggiate sul lato del passeggero dell'auto.
- *Uno in cui il pedone cammina nella stessa direzione del veicolo:* i due test eseguiti sono uno con il pedone allineato al centro del veicolo, l'altro con il pedone spostato lateralmente.
Questo scenario e uno degli scenari di attraversamento si ripetono in condizioni di scarsa illuminazione, poiché questa è una situazione in cui si verificano molti incidenti pedonali.
- *Uno in cui il pedone attraversa una strada in cui sta svoltando l'auto di prova:* sono eseguiti due test, uno in cui l'auto sta svoltando in una strada verso il lato vicino; l'altro dove la strada è verso il lato più lontano.
- *Uno in cui un pedone si trova dietro l'auto in retromarcia:* il test di Euro NCAP replica una situazione del genere per diverse velocità del veicolo e del bersaglio.

Viene utilizzato un bersaglio pedonale appositamente progettato che possiede le articolazioni utili a replicare il movimento di camminata di un essere umano. Ci si può aspettare che le auto che si comportano bene in questi test abbiano un rischio significativamente ridotto di incidenti con i pedoni nella guida nel mondo reale. In alcuni casi, la tecnologia AEB Pedestrian potrebbe non essere in grado di evitare completamente la collisione. Per questo motivo, Euro NCAP premia la tecnologia solo se i test di impatto con i pedoni dimostrano che l'auto ha un design del frontale tollerante [15].



Figura 12. AEB pedone [15]

AEB ciclista

Per il test AEB ciclisti la prova prevede due scenari:

- *Ciclista che attraversa la strada.*
- *Ciclista che si muove nella stessa direzione dell'auto.*

Queste situazioni potrebbero rivelarsi mortali, per questo motivo oltre al sistema AEB sono stati introdotti:

- *Lo sterzo di emergenza autonomo (AES), in grado di applicare un piccolo ma rapido input di sterzata.*
- *Il supporto alla sterzata di emergenza (ESS) che incrementa l'azione di sterzata intrapresa dal conducente in caso di emergenza.*

Il setup utilizzato per i ciclisti comprende una bicicletta montata su una piattaforma mobile ed il manichino ciclista articolato per ricreare l'azione di pedalata di un essere umano. La rilevazione di un ciclista è più complicata rispetto ai pedoni poiché possiedono velocità più elevate: per questo motivo si utilizzano sensori con campi visivi più ampi ed il tempo di elaborazione per decidere se frenare oppure no è minore [16].



Figura 13. AEB ciclista [16]

1.2.2.2 Protocollo di test sui pedoni (pedestrian testing protocol)

All'interno dei protocolli dell'Euro NCAP vi sono quelli relativi alla protezione degli utenti vulnerabili della strada e, tra questi, vi è il protocollo di test sui pedoni.

Il test, descritto dal protocollo, prevede una prima fase di preparazione del veicolo relativa al controllo dei liquidi e della massa del mezzo.

Secondo la normativa, per la valutazione degli urti di testa, bacino e gamba sul cofano e sul paraurti bisogna tracciare i punti in modo da definire le aree di impatto [17].

Per definire le aree si utilizzano:

- *Wrap Around Distance (WAD)* (figura 14a).
- *Bonnet Side Reference Line (BSRL)* (figura 14b).
- *Bonnet Leading Edge Reference Line (BLERL)* (figura 15b).
- *Corner Reference Point (CRP)* (figura 15b).
- *Internal Bumper Reference Line (IBRL)* (figura 16).

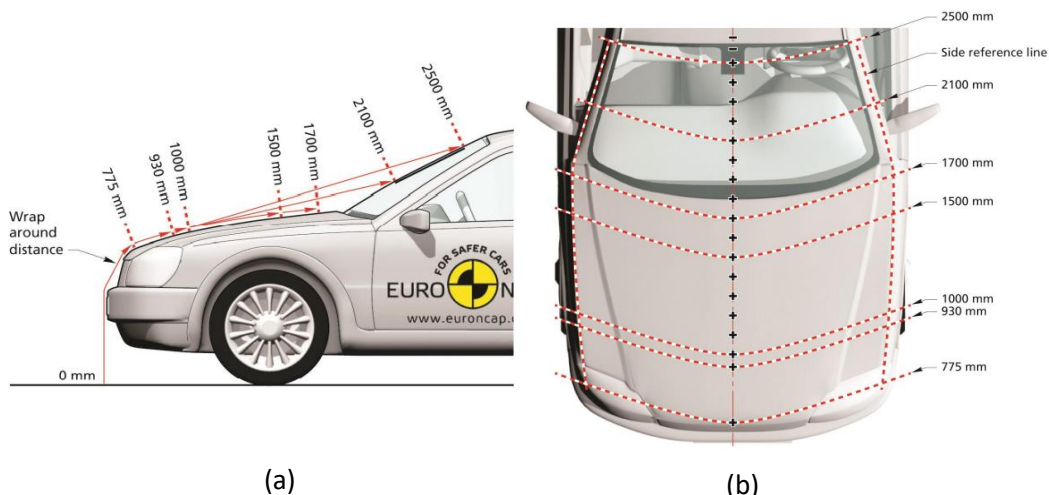


Figura 14. Tracciatura dei punti della *Wrap Around Distance* (a) e della *Bonnet Side Reference Line* (b) [17]

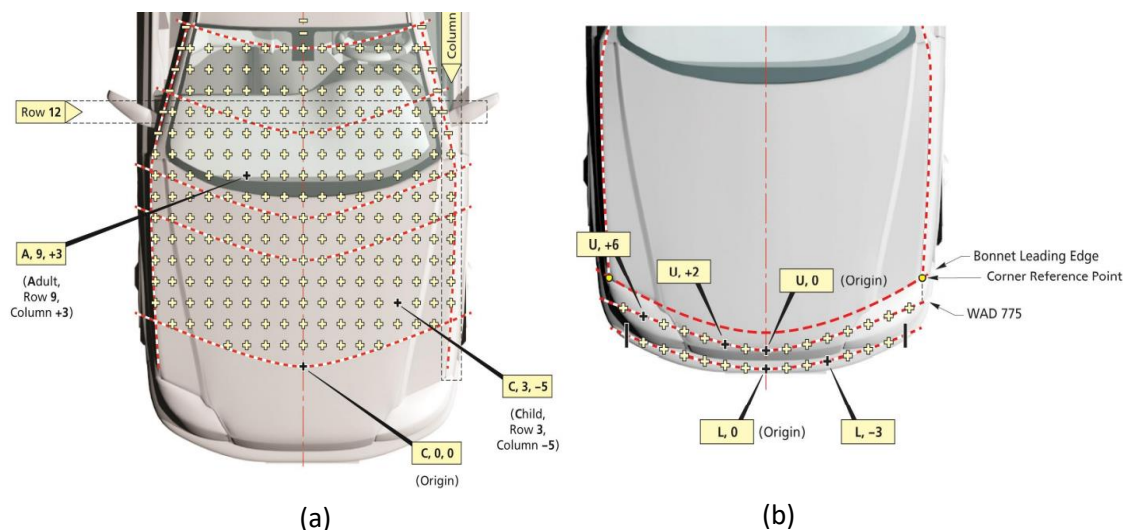


Figura 15. Tracciatura dei punti delle aree di impatto testa (a) e gamba (b) [17]

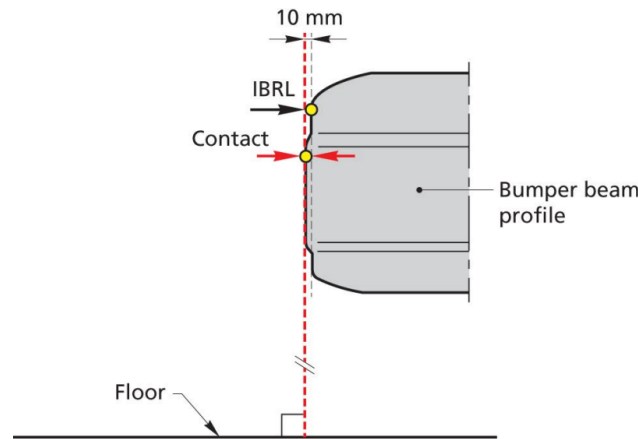


Figura 16. Schema di riferimento dell'Internal Bumper Reference Line [17]

Nella figura 15a è rappresentata una griglia in cui vi sono i punti caratteristici di impatto della testa di un bambino, contrassegnati con la lettera C (child), ed i punti caratteristici di impatto della testa di un adulto, contrassegnati con la lettera A (adult). La prima coordinata indica la riga mentre la seconda la colonna. Le righe si contano a partire dalla Wrap Around Distance (WAD) 1000, le colonne dalla centerline, dove a destra, assumono valore negativo ed a sinistra positivo. Nella figura 15b sono riportate le aree di impatto del bacino, i cui punti sono indicati con la lettera U (upper legform impact area), e le aree di impatto della gamba, contrassegnate con la lettera L (lower legform impact area).

Per ognuno dei tre segmenti corporei oggetti di studio, esistono diversi criteri di valutazione delle aree di impatto. In seguito, ad ogni area si assegna un punteggio che concorre a quello totale dell'urto pedone, parametro contribuente alla valutazione espressa dal numero di "stelle" Euro NCAP.

1.2.2.3 Criteri di lesione su testa

I parametri utilizzati per valutare le lesioni alla testa sono l'Head Injury Criterion (HIC) ed il Brain Injury Criterion (BrIC).

Nel 1972, il National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) propose l'Head Injury Criterion (HIC), criterio di lesione utile a valutare la gravità di un trauma cranico risultante da un incidente stradale. L'HIC si basa sull'effetto delle accelerazioni lineari della testa e la loro durata durante l'urto ed è definito come:

$$HIC_{15} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_r dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Dove:

- a_r rappresenta l'accelerazione risultante misurata dagli accelerometri, utilizzando l'unità di gravità come unità di misura ($1g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

- t_1 e t_2 indicano gli estremi dell'intervallo di tempo, espresso in secondi, durante il quale l'HIC assume valore massimo. L'ampiezza di questo intervallo non deve superare i 15 ms.

In base all'intervallo in cui è compreso il valore di HIC calcolato in un punto della precedente griglia illustrata, si assegnano un valore ed un colore [18]:

- $HIC < 650$ = verde = 1 punto.
- $650 \leq HIC < 1000$ = giallo = 0,75 punti.
- $1000 \leq HIC < 1350$ = arancione = 0,50 punti.
- $1350 \leq HIC < 1700$ = marrone = 0,25 punti.
- $1700 \leq HIC$ = rosso = 0 punti.

Alcuni punti della griglia, appartenenti a due aree specifiche, possiedono colore preassegnato [17]:

- I montanti "A" a cui viene assegnato colore rosso.
- Alcune zone del parabrezza identificate con il colore verde.

Su alcuni punti selezionati in maniera randomica vengono eseguiti dei test di verifica. Si assegna un fattore di correzione al punteggio totale, dichiarato dal costruttore, se questo differisce da quello ottenuto in via sperimentale. Il fattore di correzione viene calcolato [18]:

$$\text{Fattore di correzione} = \frac{\text{Punteggio reale testato}}{\text{Punteggio previsto}} \quad (2)$$

Il fattore di correzione viene moltiplicato per tutti i punti della griglia (fatta eccezione per quelli appartenenti alle aree di default). Il punteggio così corretto è diviso per il numero effettivo di punti presenti nella griglia e moltiplicato per 18, massimo punteggio ottenibile fissato dalla norma per l'area di impatto della testa.

In caso il veicolo abbia il sistema di dispiegamento di cofano attivo, si conducono dei test relativi al suo tempo di dispiegamento ed alla protezione effettiva offerta al pedone.

Il cofano attivo è un sistema dedicato alla sicurezza passiva dei pedoni e degli altri utenti "deboli" della strada. In caso di impatto, si solleva in pochi millisecondi per assorbire l'energia d'urto ed evitare il contatto con le zone rigide sottostanti.

Il costruttore tramite appositi setup di calcoli numerici, dettagliati all'interno del bollettino tecnico 024, fornisce evidenza dei tempi di dispiegamento in funzione della WAD, per valutare i punti della griglia su cui il cofano va testato in posizione di dispiegamento. Inoltre, fornisce evidenza del fatto che non vi sia contatto con le strutture rigide sottostanti al cofano valutando le traiettorie di human body model (HBM) impattati.

Nel 2013 è stato sviluppato il criterio di lesione Brain Injury Criterion (BrIC) che prende in considerazione i valori di velocità angolare della testa, utili nella valutazione delle lesioni riportate [33].

Il BrIC è calcolato come:

$$BrIC = \sqrt{\left(\frac{|\omega_x|}{\omega_{xc}}\right)^2 + \left(\frac{|\omega_y|}{\omega_{yc}}\right)^2 + \left(\frac{|\omega_z|}{\omega_{zc}}\right)^2} \quad (3)$$

Dove:

- $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ rappresentano la massima velocità angolare rispetto agli assi di riferimento locali X, Y, Z della testa, misurata in radianti al secondo e filtrata CFC60.
- $\omega_{xc}, \omega_{yc}, \omega_{zc}$ sono le velocità angolari critiche nelle rispettive direzioni pari a 66,25 rad/s, 56,45 rad/s e 42,87 rad/s, questi valori rappresentano una probabilità del 50% che il cervello subisca una lesione grave (AIS4+) e sono stati ottenuti da studi sperimentali condotti su un uomo adulto.

Il BrIC è un complemento all'HIC e, utilizzando entrambi, si è in grado di fornire una migliore valutazione riguardo le lesioni cerebrali che si verificano in seguito ad una collisione.

Una volta ottenuto il valore del parametro, la gravità della lesione riportata si verifica tramite l'ausilio di grafici come quello mostrato in figura 17.

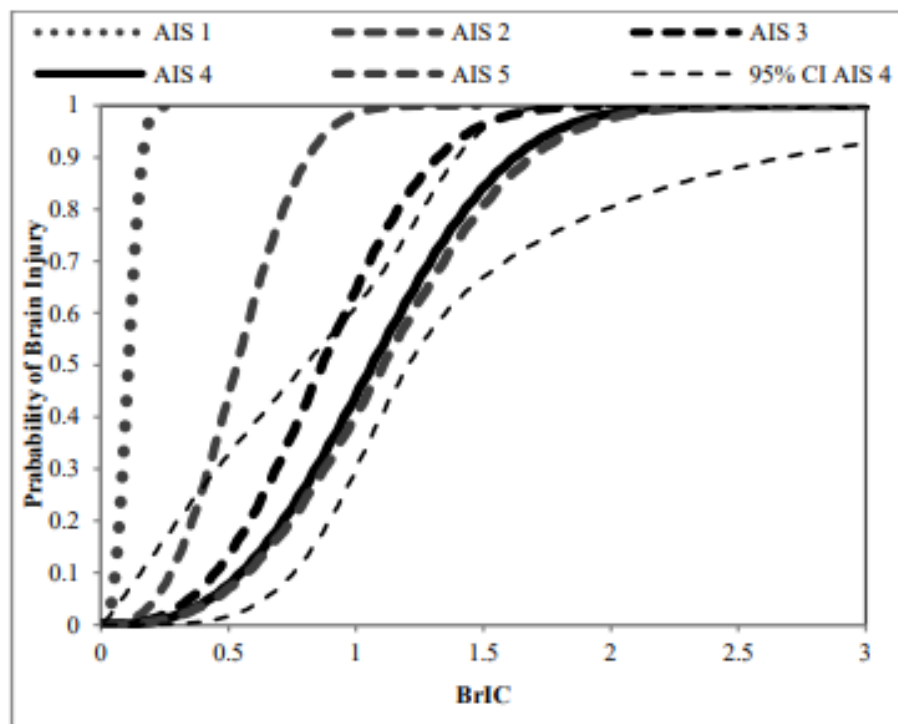


Figura 17. Probabilità di lesione cerebrale associata al valore di BrIC. Sono presenti diversi livelli di AIS [33]

La scala di infortuni abbreviata (Abbreviated Injury Scale, AIS), a cui si fa riferimento in figura 17, descrive la gravità delle lesioni alla testa che possono verificarsi in seguito ad una collisione e sono suddivise su sei livelli come descritto in tabella 2 [34].

Tabella 2. Descrizione dei livelli AIS [34]

AIS	Livello	Descrizione
1	Minore	Lesioni cerebrali leggere con mal di testa, vertigini, nessuna perdita di coscienza, lesioni cervicali leggere, colpo di frusta, abrasione, contusione.
2	Moderato	Commozione cerebrale con o senza frattura del cranio, meno di 15 minuti di incoscienza, piccole crepe corneali, distacco della retina, frattura del viso o del naso senza spostamento.
3	Serio	Commozione cerebrale con o senza frattura del cranio, perdita di coscienza superiore a 15 minuti senza gravi danni neurologici, frattura del cranio chiusa e spostata o impressa senza perdita di coscienza o altre indicazioni di lesioni al cranio, perdita della vista, frattura ossea del viso spostata e/o aperta con implicazioni antrali o orbitali, frattura cervicale senza danno del midollo spinale.
4	Severo	Frattura del cranio chiusa e spostata o impressa con gravi lesioni neurologiche.
5	Critico	Commozione cerebrale con o senza frattura cranica con perdita di coscienza superiore a 12 ore con emorragia cranica e/o indicazioni neurologiche critiche.
6	Mortale	Morte, danno parziale o totale del tronco encefalico o della parte superiore della cervice dovuto a pressione o rottura, frattura e/o strappo della parte superiore della cervice con lesioni del midollo spinale.

1.2.2.4 Il bollettino tecnico 024 (TB024)

La procedura per certificare i modelli di human body model (HBM) con relativa impostazione della simulazione di impatto è dettagliata nel bollettino tecnico TB 024 prodotto da Euro NCAP [19].

La simulazione di impatto è una simulazione al computer che fornisce la prova che il modello specifico del corpo umano è confrontabile con altri modelli e mostra risultati coerenti, in particolare con riferimento alla cinematica del corpo e al tempo di impatto con la testa. Il modello di corpo umano (human body model, HBM) è inteso come una rappresentazione geometrica e meccanica virtuale del corpo umano. La geometria deve considerare la complessa anatomia umana e consistere in uno scheletro completo composto da tutte le ossa (ad eccezione dei piedi, delle mani, del viso e delle orecchie dove sono consentite semplificazioni) e dei tessuti molli. Tutte le ossa dovrebbero essere articolate in modo realistico consentendo una gamma di movimento biofidelica per tutte le articolazioni. Il modello di veicolo contro cui avviene l'impatto è una replica generica dei frontali delle auto attuali e sono forniti in tutti i codici agli elementi finiti. I frontali delle auto sono stati sviluppati solo per confronti cinematici e non devono essere utilizzati per valutazioni di metriche sugli infortuni in quanto non soddisfano l'UN-R127.

Affinché si ottenga la certificazione del modello di corpo umano pedone ed in seguito si esegua un urto pedone con un veicolo completo, bisogna che si mantengano costanti:

- *La versione del modello di corpo umano.*
- *La posizione di ogni singolo nodo del modello.*
- *Le card per i contatti, i controlli, i materiali, i vincoli.*
- *La versione e la piattaforma del solutore.*
- *Numero di CPU/nodi usati (su cluster/computer).*

La procedura di certificazione del modello di corpo umano pedone è stata sviluppata nell'ambito del progetto CoHerent (Metodologia per il confronto dei modelli del corpo umano per le simulazioni pedonali) presso il Politecnico di Graz (Klug et al. 2017, Klug et al. 2019). La procedura di certificazione dovrebbe garantire che i modelli del corpo umano abbiano risultati comparabili e riproducibili. Per questo motivo, la procedura si propone di essere:

- *Indipendente dal solutore agli elementi finiti utilizzato (procedura applicabile in tutti i codici agli elementi finiti definiti).*
- *Indipendente dal modello di corpo umano (punti di riferimento applicabili a tutti gli HBM).*
- *Riproducibile (condizioni al contorno accuratamente definite).*
- *In conformità con le condizioni al contorno del protocollo di prova sui pedoni.*

Prima della certificazione del modello di corpo umano, viene effettuato un controllo generico della robustezza del veicolo, dove la cinematica del modello viene confrontata con la risposta di modelli allo stato dell'arte noti, convalidati e coerenti negli impatti pedonali rispetto a modelli di veicoli generici a velocità comprese tra 30 km/h e 50 km/h (corridoi). I veicoli generici rappresentano le superfici medie di tutti gli involucri dei veicoli suddivisi secondo le seguenti categorie:

- *Auto familiari (FC).*
- *Veicoli multiuso e supermini (MPV).*
- *Roadster (RDS).*
- *Veicoli utilitari sportivi (SUV).*

Le simulazioni rispetto al modello monovolume generico (MPV) non sono più richieste dal 2022 in poi. La forma del modello MPV si colloca tra FCR e SUV ed è quindi già coperta.

I modelli di veicolo possiedono una forma rappresentativa e aggiornata per le categorie selezionate, la risposta strutturale sulla linea di mezzzeria all'impatto dei pedoni in termini di caratteristiche di forza - deflessione e sono modellati per essere robusti e trasferibili a tutti i codici espliciti considerati. Questi ultimi, richiesti per certificare i modelli del corpo umano, sono offerti nei quattro solutori agli elementi finiti espliciti più rilevanti sul mercato, tra questi vi è il solutore LS-DYNA.

Il sistema di coordinate globali è definito come mostrato nella figura 18, dove:

- La direzione X è la direzione di marcia del veicolo (asse longitudinale) e $X=0$ presente nel punto più avanzato del veicolo a $t=0$.
- La direzione Y è l'asse laterale del veicolo con $Y=0$ sulla mezzzeria del veicolo.
- La direzione Z è parallela all'asse dell'altezza del veicolo rivolto verso l'alto. $Z=0$ è al livello del suolo.

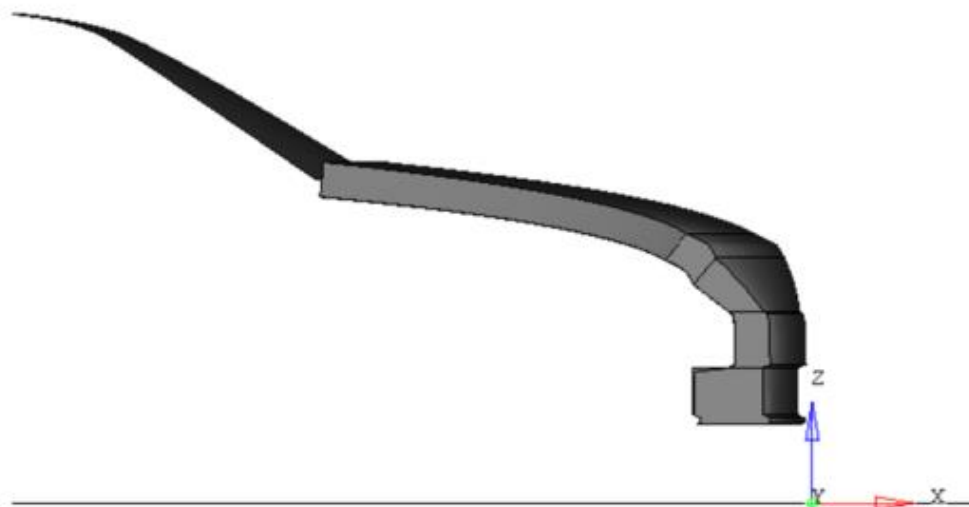


Figura 18. Sistema di coordinate globali [19]

Il veicolo ha un solo grado di libertà, che è la direzione X nel sistema di coordinate globali ed è composto dai seguenti strati:

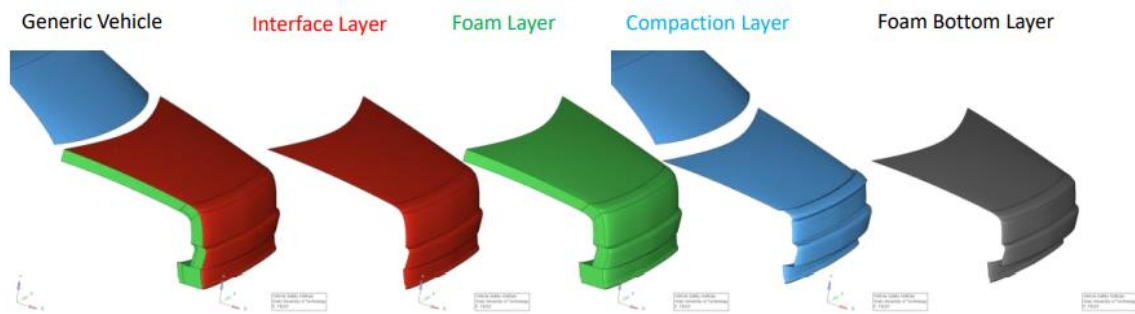


Figura 19. Componenti del modello del generico veicolo [19]

2. Calcolo numerico

2.1 L'analisi numerica

La matematica con i suoi modelli ha la capacità di descrivere ed analizzare i problemi del mondo reale in modo efficace. I modelli matematici vengono comunemente utilizzati in molti campi del mondo scientifico, industriale e tecnologico. È importante dimostrare che il modello è coerente e che la sua soluzione esiste ed è possibile calcolarla o esplicitamente o poterla approssimare con sufficiente precisione. Occorre quindi disporre di efficienti metodi di calcolo e di strumenti per la loro analisi.

La branca che si occupa degli aspetti computazionali e del calcolo effettivo della soluzione di problemi è la matematica computazionale, che possiede un ruolo preminente nelle applicazioni ed è intersecata ampiamente dall'analisi numerica [21].

L'analisi numerica applica l'algoritmo riportato in figura 20 per la risoluzione di problemi di analisi matematica che generalmente hanno natura continua la quale spesso non permette di determinare analiticamente la soluzione. Dunque, è necessario effettuare un'approssimazione del modello continuo con un modello discreto. Per ottenere la soluzione di un problema numerico bisogna utilizzare librerie di software che implementano i metodi numerici. A causa delle diverse approssimazioni che bisogna fare durante il procedimento, l'analisi numerica comporta anche uno studio dell'errore che si commette il quale diventa un fattore fondamentale nella pratica [22].

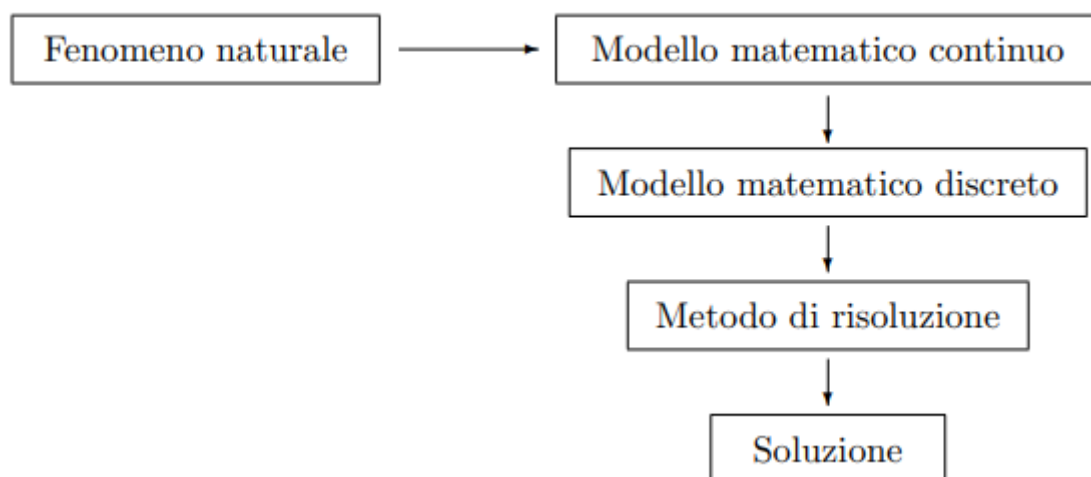


Figura 20. Algoritmo utilizzato dall'analisi numerica [22]

2.2 Computer Aided Engineering (CAE)

Il computer aided engineering (CAE) consiste nell'applicazione di tecniche di analisi e simulazioni matematiche assistite da computer al processo di sviluppo del prodotto. Il CAE combina quindi la progettazione assistita da computer (computer aided design, CAD) con discipline quali l'analisi agli elementi finiti (FEA), il calcolo della dinamica dei fluidi (CFD), la multifisica e il calcolo ingegneristico [23].

Le categorie di problemi più frequentemente risolti tramite software CAE sono i seguenti:

- *Simulazioni analogiche e simulazioni digitali di circuiti elettronici.*
- *Calcolo di campi elettromagnetici* (sia quelli desiderati, nel caso di progettazione di antenne, che quelli indesiderabili, nel caso di studio dell'interferenza elettromagnetica).
- *Calcolo statico o dinamico di strutture* (in ingegneria civile o meccanica).

In generale l'utilizzo di un programma CAE si compone di tre fasi:

- *Inserimento nel computer di un modello matematico del sistema fisico da studiare* (anche detto pre-processing o data-entry).
- *Calcolo numerico sul modello* (solving).
- *Visualizzazione ed analisi dei risultati* (post-processing o visualization).

2.2.1 Vantaggi e svantaggi del CAE

Tra i vantaggi relativi all'introduzione del CAE vi sono:

- *Prototipazione e collaudo*: il CAE non è sostitutivo del prototipo e del collaudo ma, anzi, offre una maggiore sicurezza riguardo al fatto che si stanno utilizzando i giusti test e che il prodotto finale potrà essere impiegato nelle condizioni tipiche del suo ambiente operativo.
- *Efficienza*: il CAE, incorporando la simulazione nel processo di progettazione, permette alle aziende di impiegare meno tempo nella progettazione e più nella ingegnerizzazione.
- *Ottimizzazione*: gli strumenti CAE permettono di simulare la risposta di un prodotto o di un componente alle condizioni di carico nell'ambiente operativo, consentendo all'ingegnere di validare il progetto. Si ottimizza il prodotto selezionando dei materiali alternativi, cambiando le dimensioni del modello e riducendo le quantità dei componenti.

Tutti questi vantaggi si traducono in minori costi di sviluppo [23].

D'altra parte, il CAE lavora con un modello matematico che, appunto, è una modellazione e non una fedele riproduzione della realtà, per cui è stato necessario introdurre delle ipotesi semplificative. Le ipotesi effettuate sono caratterizzate da differenti errori che accentuano le differenze tra la realtà ed il modello:

- *Errori numerici*: inadeguatezza o inaccuratezza dei metodi numerici utilizzati, limiti di precisione della macchina, limiti nell'accuratezza dell'approssimazione dei risultati.
- *Errori sistematici*: limitazioni nel modello o nel codice, errori sui dati, errori numerici.

- *Errori commessi dall'utente*: sia in fase di pre-processing che di post-processing e si tratta di errori di interpretazione dei dati di input, errori di modellazione o semplici sviste.

Per verificare la bontà dei risultati di un'analisi numerica bisognerebbe confrontarli con quelli ottenuti da un'analisi sperimentale ma questo non sempre è possibile. Per questo motivo, si ricorre ad altri metodi validativi tra cui: validazione parziale (si valida solo una parte del modello), validazione prototipale in scala, si fa il confronto con altre analisi numeriche di differente complessità [24].

2.3 I diversi metodi numerici

In base al metodo di risoluzione che viene applicato, ci sono diversi codici numerici. La scelta di utilizzare uno rispetto all'altro dipende dal risultato che si vuole raggiungere:

- Il metodo numerico comunemente utilizzato è il metodo agli elementi finiti (FEM). Questa è una tecnica numerica utilizzata per determinare la soluzione approssimata per un'equazione alle derivate parziali su un dominio definito. Per risolvere un'equazione alle derivate parziali, è necessario creare una funzione base in grado di approssimare la soluzione. Il metodo degli elementi finiti ha ottime prestazioni per risolvere equazioni alle derivate parziali su domini complessi che possono variare nel tempo e, per questo, trova applicazione in diversi campi: analisi lineare, non lineare, di instabilità, termica, dinamica e di fatica. Spesso il “metodo agli elementi finiti” (FEM), utilizzato per lo più nelle università, viene chiamato “analisi degli elementi finiti” (FEA), più popolare nelle industrie. FEA/FEM è utilizzato solo dai reparti di progettazione o ricerca e sviluppo, mentre un termine analogo è “failure mode effect analysis” (FMEA), applicabile a tutti i settori.
- Il Boundary Element Method (BEM) è un metodo numerico utilizzato per risolvere equazioni alle derivate parziali lineari che sono state formulate come equazioni integrali. Questa è una tecnica molto potente ed efficace per risolvere problemi di acustica o NVH. Proprio come il metodo degli elementi finiti, richiede anche nodi ed elementi, ma come suggerisce il nome considera solo il confine esterno del dominio. Quindi, quando il problema è di volume, vengono considerate solo le superfici esterne. Se il dominio è di un'area, viene considerata solo la periferia esterna. In questo modo riduce la dimensionalità del problema di un grado e quindi risolve il problema più velocemente.
- Il metodo alle differenze finite (FDM) è descritto come un modo per risolvere equazioni differenziali e condivide molte cose con il metodo agli elementi finiti. Questo metodo usa la serie di Taylor per convertire un'equazione differenziale in un'equazione algebrica. Nel processo di conversione, i termini di ordine superiore vengono trascurati. Viene utilizzato in combinazione con il metodo degli elementi al contorno o il metodo ai volumi finiti per risolvere problemi accoppiati termici e di fluidodinamica computazionale (CFD).
- Il metodo ai volumi finiti (FVM) è un metodo per rappresentare e valutare equazioni alle derivate parziali come equazioni algebriche. È molto simile al metodo alle differenze finite, dove i valori sono calcolati a volumi discreti su una geometria generica. Nel metodo ai volumi finiti, gli integrali di volume in un'equazione alle derivate parziali che contengono un termine di divergenza vengono convertiti in integrali di superficie, utilizzando il teorema della divergenza. Questi termini vengono quindi valutati come flussi alle superfici di ciascun volume finito. Poiché il flusso che entra in un dato volume è identico a quello che esce dal volume adiacente, questi metodi sono conservativi. Un altro vantaggio del metodo ai volumi finiti è che è facilmente formulabile per consentire mesh non strutturate. Il metodo è utilizzato in molti pacchetti di fluidodinamica computazionale (CFD) [24].

2.4 Analisi del metodo agli elementi finiti

Il metodo agli elementi finiti si è ormai affermato quale uno degli strumenti maggiormente versatili per la soluzione di problemi di natura fisico-ingegneristica e basa il suo calcolo essenzialmente su due passaggi:

- *Modellazione*: consiste nell'andare a sostituire la realtà con un modello che introduce delle approssimazioni. Un esempio nella meccanica strutturale è la teoria di de Saint Venant. Il modello di trave di de Saint Venant è un'approssimazione che consente la risoluzione del problema elastico per un corpo solido (snello) avente un particolare materiale e soggetto ad un'opportuna distribuzione di carichi esterni. Anche se questa teoria è un'approssimazione di ciò che avviene nel mondo reale, nella realtà si usa la teoria delle travi, che può essere considerata come l'estensione naturale della teoria di de Saint Venant.
- *Discretizzazione*: vale a dire il passaggio da un problema continuo dotato di un numero infinito di gradi di libertà ad un problema discreto caratterizzato da un numero finito di gradi di libertà. Questo passaggio conduce ad una soluzione approssimata e non esatta del problema di partenza. Discretizzando il modello diviene un insieme di elementi, i cui vertici saranno un numero definito di punti che prendono il nome di punti nodali o nodi [25].

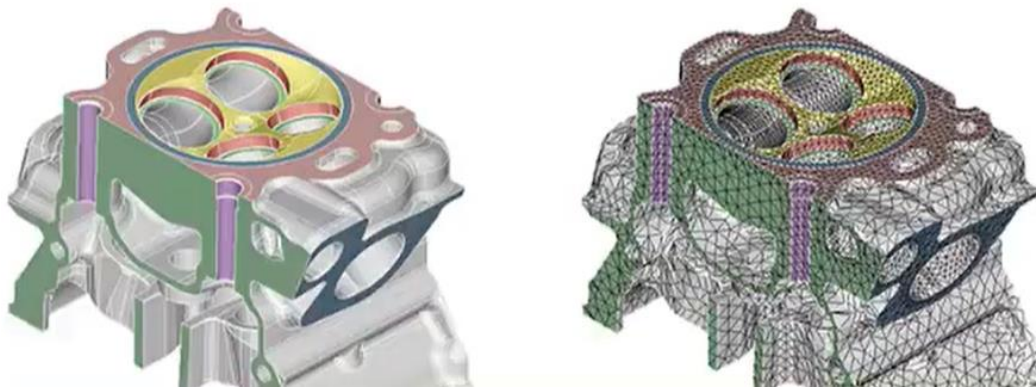


Figura 21. Esempio generico di discretizzazione di un modello [26]

2.4.1 Classificazione degli elementi

L'idea base dell'analisi agli elementi finiti è quella di effettuare calcoli solo in un numero finito di punti e poi interpolare i risultati per l'intero dominio (superficie o volume). Un elemento continuo possiede infiniti gradi di libertà per cui non è possibile risolvere il problema. Il metodo agli elementi finiti ha lo scopo di ridurre i gradi di libertà da infiniti a finiti con l'aiuto della discretizzazione (“meshing”) attraverso l'utilizzo di elementi e nodi [24].

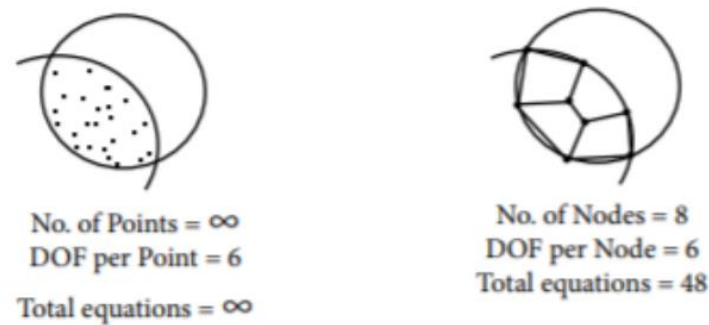


Figura 22. Schema di confronto tra dominio continuo e discreto [24]

Gli elementi frequentemente utilizzati per effettuare la mesh di una geometria si distinguono in:

- **Elementi monodimensionali (1D):** sono caratterizzati da una dimensione che predomina rispetto alle altre due. Trovano maggiore applicazione come elementi di collegamento tra componenti. Tra i principali vi sono:
 - *Asta* (rod): soggetta a carichi di trazione/compressione.
 - *Barra* (bar): utilizzato per sezioni simmetriche, presenta tutti e sei i gradi di libertà, quindi, trasmette forze assiali e di taglio, momenti flettenti e torcenti.
 - *Trave* (beam): è analogo alla barra ma viene utilizzato anche per sezioni simmetriche.
 - *Tubo* (pipe): analogo alla trave, si differenzia per il diametro interno diverso da zero. Utilizzato nelle analisi strutturali.
 - *Guscio asimmetrico* (Axisymmetric shell): consente spostamenti lungo l'asse X (asse radiale) e l'asse Z (asse di simmetria) ed una rotazione intorno all'asse Y. Usato per oggetti simmetrici rispetto all'asse di rotazione e soggetti a condizioni al contorno asimmetriche.

Types Of 1D Elements:

Rod	Bar	Beam	Pipe	Axisymmetric shell
Tension/ compression (and Torque for some software) U_x, R_x (1,4)	All 6 dofs $U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z$ (123456) Applicable for symmetric c/s	Same as bar but also support unsymmetric sections i.e. shear center and warping	Same as beam. Except it has internal non zero diameter	U_x, U_z, R_y (1,3,5) Z- axis of symmetry, X as radial axis. For objects symmetric about the axis of rotation and subjected to the axisymmetric boundary conditions.
Tension compression members (truss), Shafts subjected to Torque, Connection elements	Shaft subjected to multiaxial loading, bolted, welded joints, connection elements	Same as bar + for unsymmetric c/s	Piping systems, Structural analysis	Thin shell pressure vessels, cylindrical, conical objects etc.

Figura 23. Elementi 1D [24]

- *Elementi bidimensionali (2D)*: presentano due dimensioni preponderanti rispetto alla terza. Gli elementi possono assumere due tipi di forma: quad (quadrati), lineari a quattro nodi o parabolici a otto nodi, tria (triangolari), lineari a tre nodi o parabolici a sei nodi. Tra gli elementi bidimensionali vi sono:

- *Lastra* (plane stress): elemento piano a 3 o 4 nodi per stati di sforzo piano, ogni nodo possiede due gradi di libertà corrispondenti alle traslazioni nel suo piano.
- *Piastra*: elemento piano a 3 o 4 nodi ognuno con tre gradi di libertà corrispondenti alla traslazione perpendicolare al suo piano e alle rotazioni rispetto ai due assi giacenti nel piano. L'elemento è in grado di trasmettere sforzo di taglio e i due momenti flettenti.
- *Gusci o membrane* (thin shell): piastre curve caratterizzate da uno spessore così piccolo che gli unici sforzi rilevanti sono quelli membranali [27].

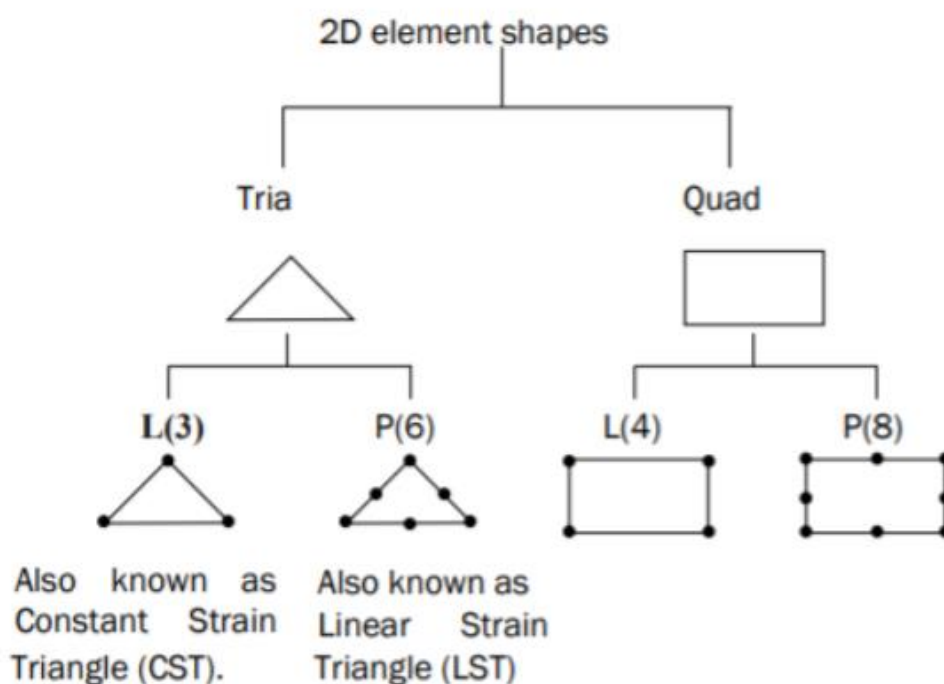


Figura 24. Elementi 2D [24]

- *Elementi tridimensionali (3D)*: sono caratterizzati dall'avere tutte e tre le dimensioni comparabili. Sono elementi solidi che prevalentemente presentano forma:
 - *Tetra*: sono dei tetraedrici che sono stati estratti da elementi tria 2D.
 - *Penta*: elementi ottenuti dai tria 2D.
 - *Brick*: elementi esaedrici derivanti da elementi quad 2D. Ogni nodo che possiedono presenta tre gradi di libertà che corrispondono alle tre traslazioni. Questi sono in grado di rappresentare uno stato tensionale tridimensionale.
 - *Pyramid*: elementi piramidali ottenuti utilizzando elementi triangolari come base.

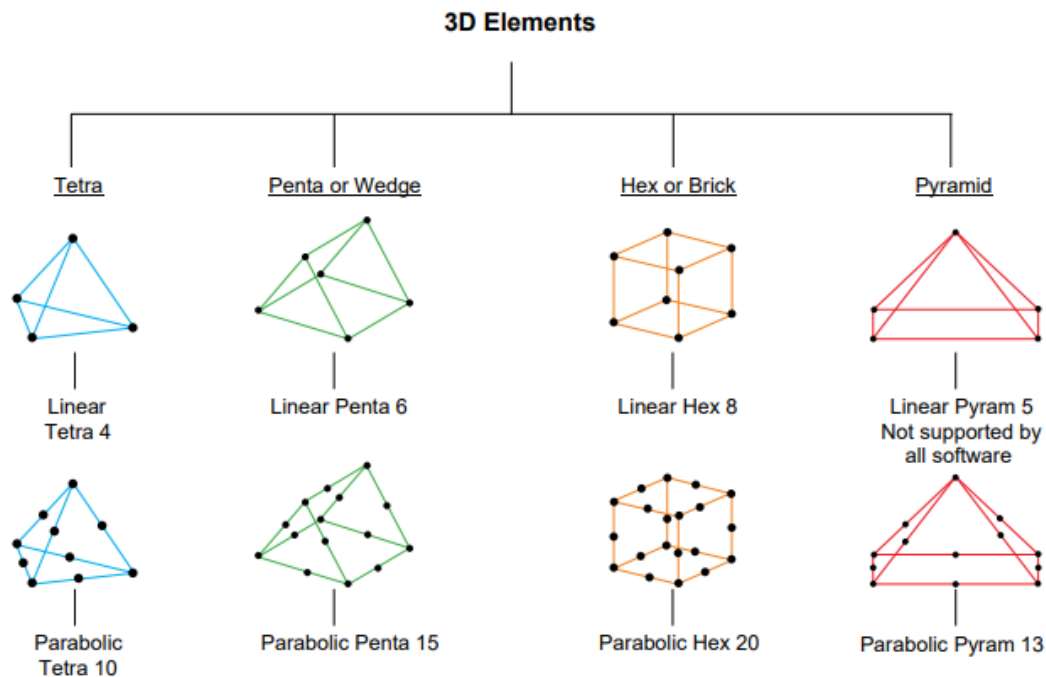


Figura 25. Elementi 3D [24]

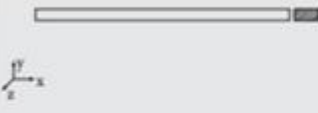
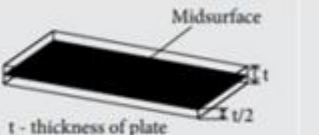

Elements		
1D	2D	3D
 <p>$x \gg y, z$</p>	 <p>$x, z \gg y$</p>	 <p>$x \sim y \sim z$</p>
<p>One of the dimensions is very large in comparison to the other two</p> <p><u>Element shape</u> – line</p> <p><u>Additional data from user</u> – remaining two dimensions i.e. area of cross section</p> <p><u>Element type</u> – rod, bar, beam, pipe, axisymmetric shell, etc</p> <p><u>Practical applications</u> – Long shafts, beams, pin joint, connection elements, etc.</p>	<p>Two of the dimensions are very large in comparison to the third one</p> <p><u>Element shape</u> – quad, tria</p> <p><u>Additional data from user</u> – remaining dimension i.e. thickness</p> <p><u>Element type</u> – thin shell, plate, membrane, plane stress, plane strain, , axis-symmetric solid, etc.</p> <p><u>Practical applications</u> – Sheet metal parts, plastic components like an instrument panel ,etc.</p>	<p>All dimensions are comparable</p> <p><u>Element shape</u> – tetra, penta, hex, pyramid</p> <p><u>Additional data from user</u> – none</p> <p><u>Element type</u> – solid</p> <p><u>Practical applications</u> – Transmission casing, engine block, crankshaft, etc.</p>

Figura 26. Elementi per realizzare una mesh [24]

2.4.2 Dalla geometria alla mesh

Si realizza sul continuo una discretizzazione, chiamata mesh, caratterizzata da un numero finito di elementi, i quali sono definiti dai loro vertici chiamati nodi. Ciascun elemento è un'entità che va a modellare un pezzo del continuo ed interagisce con l'elemento adiacente per mezzo dei nodi. I nodi rappresentano informazioni di carattere tensionale e deformazionale, ovvero relazionato ai carichi e agli spostamenti che si hanno in corrispondenza di questi punti. Su tutto il sistema è difficile esprimere le equazioni che permettono di risolvere meccanicamente il comportamento della struttura mentre sul singolo elemento, di forma semplice, si è in grado di definire una relazione matematica che legghi le grandezze in gioco all'interno dell'elemento. Si vuole una relazione che riesca a legare i carichi, cioè le forze che agiscono sull'elemento, agli spostamenti subiti dall'elemento per effetto dei carichi applicati. Il legame tra forza e spostamento è dato dalla rigidità meccanica dell'elemento. All'interno dell'elemento si riuscirà anche ad individuare come variano le tensioni e le deformazioni che derivano dalle forze applicate e dagli spostamenti che ne derivano.

Per ottenere la soluzione complessiva del sistema, bisogna assemblare tutte le equazioni derivanti dai diversi elementi. Questa soluzione sarà riferita agli spostamenti e, eventualmente, alle forze che si hanno nei nodi.

Affinché il modello approssimi fedelmente la realtà bisogna che il numero di elementi e di nodi della mesh aumenti ma diminuisca la dimensione degli elementi. Questo comporta un aumento del costo computazionale, dunque, è necessario trovare un giusto compromesso tra le due.

Il modello discretizzato presenta un numero finito di gradi di libertà e, quindi, è più rigido della struttura reale. Questo è dovuto alle funzioni che vengono utilizzate per approssimare il campo degli spostamenti all'interno degli elementi, per la maggior parte definiti mediante leggi di spostamento assegnato [28].

2.4.3 La matrice di rigidità e le funzioni di forma

Una delle formulazioni più utilizzate nell'analisi strutturale nel metodo degli elementi finiti per lo studio di problemi strutturali è una formulazione a spostamenti assegnati. Questo implica che gli spostamenti della struttura saranno quelle grandezze incognite a partire dalle quali si determineranno inizialmente le forze applicate al sistema e, in seguito, deformazioni e tensioni.

Gli spostamenti nodali ed i carichi nodali applicati sono legati tra loro dalla matrice $[K]$, detta matrice di rigidità, in base alla seguente relazione:

$$[K]\{s\} = \{f\} \quad (4)$$

La matrice di rigidità può essere determinata o direttamente mediante il principio dei lavori virtuali oppure mediante combinazioni lineari a partire dalle equazioni di equilibrio e deformazione. Se si hanno due sistemi, il principio dei lavori virtuali afferma che il lavoro che le forze esterne del primo sistema compiono sugli spostamenti del secondo è uguale al lavoro

che le tensioni interne del primo sistema compiono sulle deformazioni del secondo. Questo implica che di questi due sistemi si può calcolare il lavoro meccanico.

Per poter ottenere gli spostamenti dall'equazione precedente, bisogna garantire che la matrice di rigidezza $[K]$, simmetrica e con le righe che non sono linearmente indipendenti, sia invertibile. Per poterla rendere invertibile, bisogna:

- *Introdurre le condizioni di vincolo cinematico* (in un numero sufficiente a impedire il moto rigido della struttura), i corrispondenti termini di forze saranno incognite (reazioni vincolari).
- *Introdurre le condizioni al contorno in termini di carichi*, i termini corrispondenti di spostamento saranno incogniti.

Per un sistema continuo discretizzato, lo spostamento di tutti i punti del continuo può essere definito utilizzando la seguente relazione:

$$\{u\} = [n]\{s\} \quad (5)$$

Dove $\{u\}$ è il vettore degli spostamenti in ogni punto dell'elemento, $\{s\}$ è il vettore degli spostamenti nodali ed $[n]$ è la matrice delle funzioni di forma.

Le funzioni di forma sono utilizzate per approssimare il campo degli spostamenti all'interno dell'elemento. Si tratta di funzioni polinomiali in quanto i polinomi sono comunemente utilizzati per approssimare funzioni incognite perché facilmente derivabili.

Essendo funzioni di approssimazione, di conseguenza, i risultati saranno approssimati; il grado di approssimazione dipende dal numero di elementi utilizzati per modellare la struttura e dal grado del polinomio scelto per rappresentare il campo di spostamenti. Queste funzioni introducono dei vincoli cinematici che obbligano l'elemento a muoversi e deformarsi secondo leggi imposte. Per questo motivo, il sistema discretizzato presenta una rigidezza maggiore di quello continuo.

Per garantire la convergenza dell'analisi al diminuire delle dimensioni dell'elemento la funzione scelta per approssimare il campo di spostamenti dovrà osservare i seguenti requisiti:

1. Essere continua all'interno dell'elemento e possedere derivata sino all'ordine n richiesto dal particolare problema (ad esempio, $n=1$ per l'elemento asta, $n=2$ per l'elemento trave inflessa e per l'elemento piastra, ecc.).
2. Essere in grado di rappresentare il moto rigido dell'elemento con una corrispondente energia di deformazione nulla. Un modo per valutare il numero di gradi di libertà di moto rigido rappresentati dalle equazioni di rigidezza di un elemento è quello di calcolare gli autovalori della matrice di rigidezza dell'elemento. Si vedrà infatti che l'autovalore i -esimo è proporzionale all'energia di deformazione corrispondente al modo i -esimo di deformazione e quindi il numero di autovalori nulli corrisponderà al numero di gradi di libertà di moto rigido contenuti nel sistema.

3. Essere in grado di rappresentare uno stato di deformazione costante. Questa è la condizione minima che l'elemento deve soddisfare quando le sue dimensioni tendono a zero.
4. Avere continuità tra gli elementi, cioè non devono nascere, se non erano presenti, discontinuità al contorno fra elementi adiacenti.

Inoltre, bisogna aggiungere la condizione di continuità ai nodi, ovvero, lo spostamento di un nodo deve essere comune a tutti gli elementi che convergono in esso. Se la funzione soddisfa le condizioni 1,2 e 3 si dice completa, se soddisfa in aggiunta anche la 4 si dice compatibile. Una funzione completa e compatibile si dice conforme. Quest'ultima ha una convergenza monotona della risposta verso il valore esatto. Gli elementi incompatibili sono quelli che non rispettano la condizione 4, in questo caso, la convergenza è garantita se l'incompatibilità diminuisce al diminuire delle dimensioni dell'elemento [28].

2.4.4 I metodi di integrazione diretta

I fenomeni di urti rientrano nei metodi strutturali dinamici, ovvero quei metodi le cui variabili (spostamento, velocità, accelerazione) dipendono non solo dalle coordinate spaziali, come quelle dei metodi strutturali statici, ma variano anche in funzione del tempo. Il metodo di integrazione diretta prevede la risoluzione di questo tipo di problemi. Il sistema di equazioni è integrato utilizzando una procedura numerica passo-passo e con il termine diretta si intende che nessuna trasformazione di coordinate e delle equazioni viene eseguita prima dell'integrazione numerica.

L'equazione a cui si fa riferimento è la seguente:

$$[M]\{\ddot{S}\} + [C]\{\dot{S}\} + [K]\{S\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

Dove:

- $\{\ddot{S}\}$ rappresenta il vettore dell'accelerazione moltiplicato alla matrice delle masse, $[M]$, legata alle caratteristiche inerziali del sistema.
- $\{\dot{S}\}$ è il vettore delle velocità moltiplicato per la matrice di smorzamento $[C]$, legata alla dissipazione di energia del sistema.
- $\{S\}$ rappresenta il vettore degli spostamenti dell'elemento moltiplicato per la matrice di rigidità $[K]$ legata alle proprietà elastiche del sistema.
- $\{F(t)\}$ rappresenta il vettore delle forze dipendenti dal tempo.

Il metodo di integrazione diretta ha lo scopo di calcolare i valori del campo degli spostamenti, velocità e accelerazioni dell'elemento dal tempo $t=0$ al tempo $t=T$, noti i loro valori iniziali al tempo $t=0$. L'intero intervallo di tempo T è suddiviso in n intervalli di tempo Δt , dove $\Delta t = T/n$, per ognuno dei quali si calcola una soluzione del sistema mediante opportuni schemi di integrazione, assumendo a priori una legge di variazione degli spostamenti, velocità ed

accelerazioni all'interno dell'intervallo Δt . I risultati ottenuti sono affetti da un errore che dipende dalla scelta del passo temporale Δt . Intervalli di tempo troppo elevati portano a risultati non ottimali, mentre intervalli troppo piccoli comportano elevati tempi e costi di calcolo.

I metodi di integrazione diretta si dividono in metodi espliciti e metodi impliciti [28].

2.4.5 I metodi espliciti ed i metodi impliciti

I *metodi espliciti*, di cui il più famoso è quello delle differenze centrali, contengono il vettore spostamento al tempo $t + \Delta t$ funzione di tutto ciò che si conosce agli istanti precedenti:

$$\{S\}_{t+\Delta t} = f(\{S\}_t, \{\dot{S}\}_t, \{\ddot{S}\}_t, \{S\}_{t-\Delta t}, \dots) \quad (7)$$

Questa soluzione numerica utilizza le informazioni degli istanti di tempo precedenti a quello in esame per prevedere la soluzione del sistema all'istante di tempo successivo. Per garantire che la soluzione appartenga al sistema, il nuovo spostamento deve soddisfare l'equazione di equilibrio e quindi viene inserito all'interno dell'equazione di equilibrio scritta all'istante t :

$$[M]\{\ddot{S}\}_t + [C]\{\dot{S}\}_t + [K]\{S\}_t = \{F(t)\}_t \quad (8)$$

I metodi espliciti sono condizionatamente stabili, sono veloci dal punto di vista computazionale in quanto non bisogna invertire la matrice di rigidezza ma è necessario controllare il passo di integrazione altrimenti la soluzione assume valori infiniti e diventa di difficile calcolo per il codice.

I *metodi impliciti* sono caratterizzati da un vettore spostamento, che si vuole determinare, funzione degli spostamenti precedenti (noti) e delle velocità ed accelerazioni attuali (ignote). Questo implica che l'equazione del moto venga scritta all'istante di tempo successivo a quello in cui si conosce la soluzione.

$$\{S\}_{t+\Delta t} = f(\{\dot{S}\}_{t+\Delta t}, \{\ddot{S}\}_{t+\Delta t}, \{S\}_t, \dots) \quad (9)$$

Le equazioni di equilibrio sono scritte all'istante $t + \Delta t$:

$$[M]\{\ddot{S}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{S}\}_{t+\Delta t} + [K]\{S\}_{t+\Delta t} = \{F(t)\}_{t+\Delta t} \quad (10)$$

Questi metodi sono, in generale, incondizionatamente stabili, ovvero non presentano problemi di accumulo di errore ma, in compenso, sono lenti e macchinosi, soprattutto in condizioni di non linearità. I principali metodi impliciti sono i metodi di Houbolt, di Wilson- θ e di Newmark.

Nel caso di dinamiche molto veloci, ad esempio nei crash test dove avvengono urti ad elevate velocità, si utilizza il metodo di calcolo esplicito. Questo è dovuto al fatto che, rispetto al metodo di calcolo implicito, l'esplicito possiede maggiore velocità di calcolo e migliore risoluzione della non linearità proprio dei problemi di contatto e di urto. Il solutore Ansys LS-DYNA, utilizzato in questo lavoro, utilizza il metodo di calcolo esplicito [28].

2.4.6 Il fenomeno dell'Hourglass

Un'integrazione esatta della matrice di rigidezza, soprattutto per elementi di forma complessa, comporta un elevato costo computazionale. Per svolgere il calcolo più velocemente si può sottointegrare, ovvero si possono utilizzare meno punti di integrazione rispetto a quelli necessari.

Il metodo degli elementi finiti, utilizzando meno gradi di libertà rispetto alla realtà continua, tende a sovrastimare la rigidezza. Al contrario, sottointegrando si ottiene una soluzione della matrice di rigidezza sottostimata.

Bisogna misurare con attenzione l'entità di sottointegrazione poiché, altrimenti, si rischia di generare nel calcolo quelli che sono detti dei modi spuri o meccanismi nascosti dell'elemento, ovvero modi di deformazione con energia di deformazione nulla. Dunque, si otterrebbe un elemento che si deforma ma non viene calcolato un valore di energia di deformazione: nella simulazione si percepisce l'elemento deformarsi senza essere associato a carichi applicati dall'esterno. Questo fenomeno prende il nome di hourglass [28].

Per calcolare il numero di meccanismi di deformazione spuri che si possono avere all'interno dell'elemento si utilizza la seguente formula:

$$M = GN - L - rn \quad (11)$$

Dove:

- M : è il numero di modi ad energia nulla.
- G : è il numero di gradi di libertà per nodo.
- N : è il numero di nodi dell'elemento.
- L : è il numero di gradi di libertà di moto rigido.
- r : è il rango della matrice di elasticità $[E]$.
- n : il numero di punti di campionamento.

3. I software utilizzati

3.1 Tipico processo di analisi agli elementi finiti

Il processo tipico di analisi agli elementi finiti prevede l'esecuzione di tre passaggi fondamentali per giungere alla soluzione finale a partire dal CAD:

- *Pre-processing.*
- *Solving.*
- *Post-processing.*

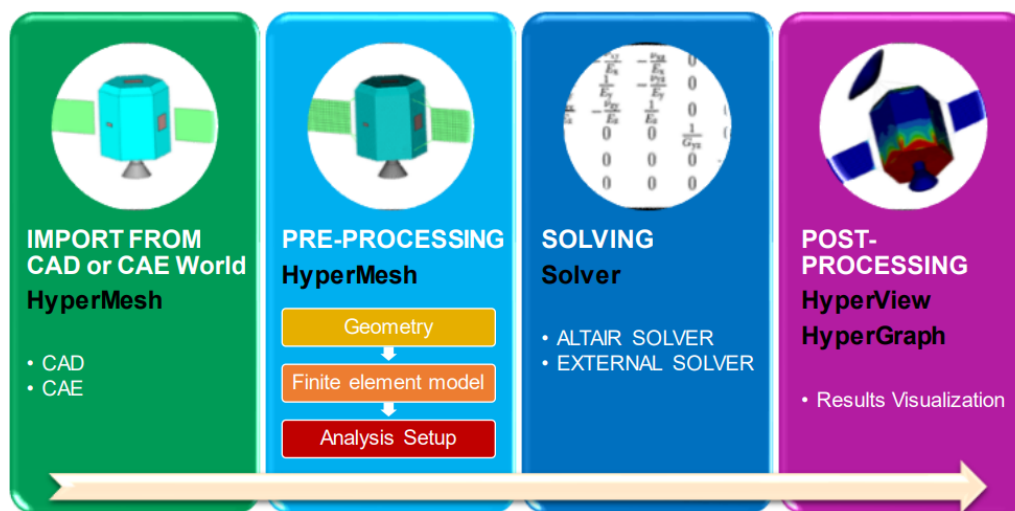


Figura 27. Schema del processo di analisi agli elementi finiti [26]

La prima fase prevede di importare la geometria realizzata tramite software CAD o un modello CAE in un software di pre-processing dove l'utente ne esegue la mesh con il fine di procedere con l'analisi. Nella fase di meshing la geometria complessa viene scomposta in forme semplici (elementi). Una volta realizzata la mesh, vengono aggiunte le definizioni per il tipo e lo spessore dei materiali e vengono applicate forze e vincoli. Inoltre, l'utente deve richiedere i parametri interessati in output al termine della simulazione. Il modello viene quindi scritto in un formato comprensibile per il solutore ed inviato per l'elaborazione.

La seconda fase, di solving, è quella di calcolo e viene svolta propriamente dal software CAE.

La terza ed ultima fase, di post-processing, prevede l'utilizzo di software che permettono di visualizzare gli output precedentemente settati mediante animazioni e/o grafici [26].

In questo studio sono stati utilizzati i seguenti software, i quali verranno trattati nei paragrafi successivi:

- *Pre-processing: HyperMesh-Altair.*
- *Solving: ANSYS-LS-DYNA.*
- *Post-processing: HyperView/HyperGraph-Altair.*

3.2 Pre e Post-Processing

Per le fasi di pre-processing e post-processing sono stati utilizzati rispettivamente i software HyperMesh e HyperView (congiuntamente con HyperGraph), tutti facenti parte del pacchetto HyperWorks prodotto dalla Altair Engineering.

HyperWorks garantisce la possibilità di interfacciarsi con i maggiori solutori presenti sul mercato, fornendo così modelli robusti e soluzioni affidabili.

3.2.1 Pre-Processing: Altair HyperMesh

La fase di pre-processing permette la realizzazione del modello ad elementi finiti a partire dal suo modello geometrico CAD.

Questa operazione comporta una serie di passaggi da eseguire:

1. **Importare il modello CAD.**

La geometria del modello CAD importata, nella maggior parte dei casi, necessita di riparazione della topologia (topology repair). Lo scopo è quello di pulire e semplificare le superfici per migliorare la qualità della mesh che si vuole costruire: vengono eliminate superfici duplicate, colmati gap, rimossi fori troppo piccoli ed eventuali loghi presenti.

2. **Costruzione della mesh.**

Sulla base della geometria pulita e semplificata, si procede con la mesh. Può essere effettuata una mesh 1D, 2D o 3D: questo varia in base alla complessità della geometria ed al tempo computazionale che si intende impiegare.

3. **Controllo della qualità della mesh.**

Per poter ritenere affidabili i risultati ottenuti, bisogna verificare:

- La dimensione degli elementi: gli elementi non possono presentare una dimensione caratteristica che sia al di sotto di determinati valori impostati precedentemente nel calcolo.
- La distorsione degli elementi: affinché gli elementi non siano troppo distorti bisogna controllare il valore che assume lo jacobiano. L'eccessiva distorsione degli elementi comporta il mancato svolgimento dei calcoli da parte del solutore.
- La presenza di elementi tria: le mesh, in genere, vengono eseguite utilizzando elementi quad, ovvero elementi a quattro nodi, in quanto forniscono risultati più accurati degli elementi a tre nodi, tria, ma l'utilizzo di questi ultimi risulta inevitabile per descrivere geometrie complesse.
- Il valore di aspect ratio: ovvero il rapporto tra le due dimensioni principali dell'elemento che deve essere minore di un valore stabilito.

4. **Definizione delle proprietà e dei materiali.**

Bisogna definire le proprietà di un componente ed i materiali in esame. In HyperMesh vi sono diverse categorie di materiali, identificata la categoria corretta vengono settate manualmente le proprietà meccaniche (ad esempio: modulo di Young, coefficiente di Poisson, tensione di snervamento, ecc.) ed altri parametri richiesti.

5. **Definizione di carichi e vincoli.**

Si vanno a definire le condizioni di carichi e vincoli a cui è soggetto il componente in esame.

6. **Esportazione del modello.**

Si definiscono gli output che si desidera ottenere alla fine del calcolo ed in seguito si esporta il modello in un formato che sia leggibile dal solutore: nel caso di LS-DYNA i formati tipici sono: .k, .key, .dyn.

Sempre in fase di pre-processing le fasi descritte possono essere applicate anche a partire da un modello CAE precedente, per azioni di modifica/aggiornamento del modello stesso [26].

3.2.2 Post-Processing: Altair HyperView e Altair HyperGraph 2D

La fase di post-processing consiste nella visualizzazione dei risultati ottenuti in output dal solutore. LS-DYNA, dopo aver eseguito i calcoli, fornisce tre file di output:

- **d3plot** contiene le animazioni del modello che vengono visualizzate tramite il software HyperView. L'animazione mostra come evolve il sistema modellato nel tempo in funzione di carichi e vincoli a cui è soggetto. E contiene dei risultati in formato grafico che possono essere visualizzati.
- **binout** è un file in formato binario al cui interno risiedono file in formato ASCII contenenti i valori di output delle grandezze richieste. Questi dati contenuti nel file binout vengono utilizzati dal software HyperGraph 2D per la realizzazione di grafici.
- **d3hsp** contiene tutte le informazioni riguardanti il processo di calcolo effettuato dal solutore (memoria utilizzata, eventuali warning, ecc.).

3.3 Solving: Ansys LS-DYNA

Ansys LS-DYNA è un software di calcolo dedicato alla soluzione delle equazioni del moto dei sistemi non lineari discretizzando, oltre lo spazio, anche la variabile tempo. LS-DYNA è un software nato come integratore esplicito ossia in grado di riprodurre una dinamica veloce. Si tratta di un solutore esplicito in quanto vengono rimosse ipotesi semplificative che rendevano possibili gli approcci lineari [29]. Tra le non linearità importanti sono da evidenziare:

- *Matrice di rigidezza [K]*: si rimuove l'ipotesi di materiale elastico-lineare e si introduce l'ipotesi di materiale con caratteristica elasto-plastica ovvero non si avrà più proporzionalità diretta tra carichi e spostamenti, tra tensioni e deformazioni.
- *Massa del sistema*: il sistema presenta una massa non più costante.
- *I contatti*: possono mostrare una variabilità dei vincoli nel tempo non trascurabile, mentre i componenti reali hanno dei contatti che introducono vincoli in un'unica direzione con forze scambiate tra parti diverse.

Il solutore è di tipo Command Line, ovvero è possibile definire il file di input, di tipo ASCII dove si inseriscono i comandi, utilizzando qualsiasi editor di testo.

Il file di input viene definito utilizzando il formato “keyword”, introdotto nel 1993 per sostituire il formato “structured”, obsoleto e di difficile comprensione. La prima linea del file deve obbligatoriamente iniziare con “*KEYWORD”, per identificare il formato, e deve terminare con “*END”. Tra queste due, vi sono tutte le righe che contengono le informazioni da immagazzinare in modo da eseguire l'algoritmo numerico per il calcolo. Ogni informazione viene fornita sottoforma di “card” preceduta dal simbolo “*”, al cui interno può contenere massimo 8 campi (colonne) di 10 caratteri, generalmente. Per rendere il file di più facile comprensione all'utente, si possono inserire dei commenti utilizzando il simbolo “\$”, che non vengono letti dal software [30].

Le “card”, utili alla scrittura del file, possono essere raggruppate in due categorie principali in base alla loro funzione:

- *Di impostazione*: si utilizzano per definire tutti i parametri del modello, tra cui i nodi, gli elementi, le proprietà, i materiali, i set, le condizioni al contorno, i vincoli, i contatti, i carichi.
- *Di controllo*: sono card opzionali ma definite per controllare la correttezza dell'esecuzione del calcolo. È richiesto di utilizzare la “*CONTROL_TERMINATION” in modo da verificare il tempo limite di simulazione.

Terminata la fase di pre-processing, i modelli risultano completi e pronti per essere lanciati. Le simulazioni sono state lanciate utilizzando LS-DYNA attraverso il server morpheus dell'azienda AMET.

Tutte le simulazioni sono state eseguite con MPP LS-DYNA, versione r9 ed in singola precisione. Ogni simulazione ha avuto una durata di circa 24 ore utilizzando 1 nodo a 32 CPU.

4. I modelli FEM utilizzati

La simulazione dell'urto pedone è stata realizzata utilizzando i seguenti modelli agli elementi finiti:

- *I modelli delle vetture*: 2010 Toyota Yaris e 2017 Honda Accord, saranno discussi in dettaglio nel paragrafo 4.1.
- *Il modello di corpo umano*: Human Body Model (HBM) THUMS, sarà discusso nel paragrafo 4.2.
- *Il modello di impattore testa omologativo*: sarà discusso nel paragrafo 4.3.

4.1 Modelli delle vetture

Sono stati utilizzati due modelli di vettura: una Toyota Yaris del 2010 ed una Honda Accord del 2017. Entrambe berline a quattro porte, facenti parte della categoria di auto family car, sono state ottenute tramite il processo di reverse engineering presso il National Crash Analysis Center (NCAC) dell'università George Washington di Washington (GWU).

Il processo di reverse engineering prevede inizialmente di scomporre il veicolo parte per parte, in seguito, ogni parte viene catalogata, scansionata per definirne la geometria, misurata per gli spessori e classificata per tipologia di materiale. I dati ottenuti sono inseriti all'interno di un file e, successivamente, le parti sono unite per creare una rappresentazione digitale di modellazione agli elementi finiti che rispetti le reali caratteristiche strutturali e meccaniche.

Per ottenere i dati sui materiali dei principali componenti strutturali sono eseguiti test su campioni prelevati da parti del veicolo. Dalle prove sui materiali, vengono determinati i valori di sollecitazione e deformazione appropriati da includere nel modello per l'analisi del comportamento a compressione nella simulazione dell'urto.

In figura 28 è mostrato il veicolo di Toyota Yaris reale rispetto al suo modello agli elementi finiti mentre in figura 29 viene rappresentato il veicolo Honda Accord reale e realizzato agli elementi finiti.



Figura 28. Modello attuale e rappresentazione agli elementi finiti di una Toyota Yaris del 2010

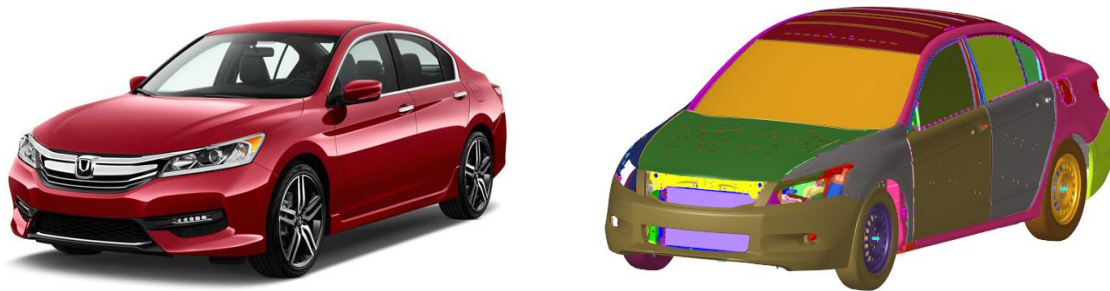


Figura 29. Modello attuale e rappresentazione agli elementi finiti di una Honda Accord del 2017

Il modello del veicolo Toyota Yaris presenta un totale di 1 514 068 elementi, di cui 1 250 424 sono shells, 4738 sono beams e 258 887 sono solidi, ed un totale di 1 480 422 nodi. Il modello Honda Accord, invece, presenta un totale di 1 914 855 elementi, di cui 1 815 446 sono shells, 98 716 sono solidi, ed un totale di 1 969 904 nodi.

Per ciascuna vettura, il modello è stato inizialmente verificato e convalidato in modi differenti per garantire che fosse una rappresentazione accurata del veicolo reale. I modelli assumono le seguenti unità di misura: tempo in secondi, lunghezza in millimetri, massa in tonnellate, forza in newton, gli stress/pressione in megapascal ed energia in newton millimetri

Questi modelli sono stati sviluppati e resi disponibili al download direttamente dal sito del NHTSA [31].

4.2 Total HUMAN Model for Safety (THUMS)

Total HUMAN Model for Safety (THUMS) è un modello agli elementi finiti umano sviluppato congiuntamente da TOYOTA MOTOR CORPORATION e TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC. Il modello mira a simulare la cinematica del corpo umano e le risposte alle lesioni che possono verificarsi in seguito ad incidenti automobilistici. Le geometrie delle parti del corpo umano sono rappresentate da mesh agli elementi finiti e le proprietà dei loro materiali sono definite assumendo leggi costitutive. Sono state sviluppate diverse versioni di THUMS:

- *AM50%ile*: rappresenta un modello maschio adulto di taglia media che ha un'altezza di 175 cm ed una massa corporea di 77 kg.
- *AF05%ile*: è un modello femminile di taglia piccola, di altezza 152 cm ed una massa corporea di 48 kg.
- *AM95%ile*: è un modello maschile di taglia grande, di altezza 185 cm ed una massa corporea di 105 kg.

Ognuno di questi ha due posture; una è la postura seduta che rappresenta un occupante di un'autovettura e l'altra è una postura eretta che rappresenta un pedone, quest'ultima utilizzata in questo lavoro di tesi.

La figura 30 mostra l'intera vista dell'attuale famiglia THUMS; il modello maschile di taglia media (AM50), il modello femminile di taglia piccola (AF05) e il modello maschile di taglia grande (AM95) rispettivamente nelle due posture.

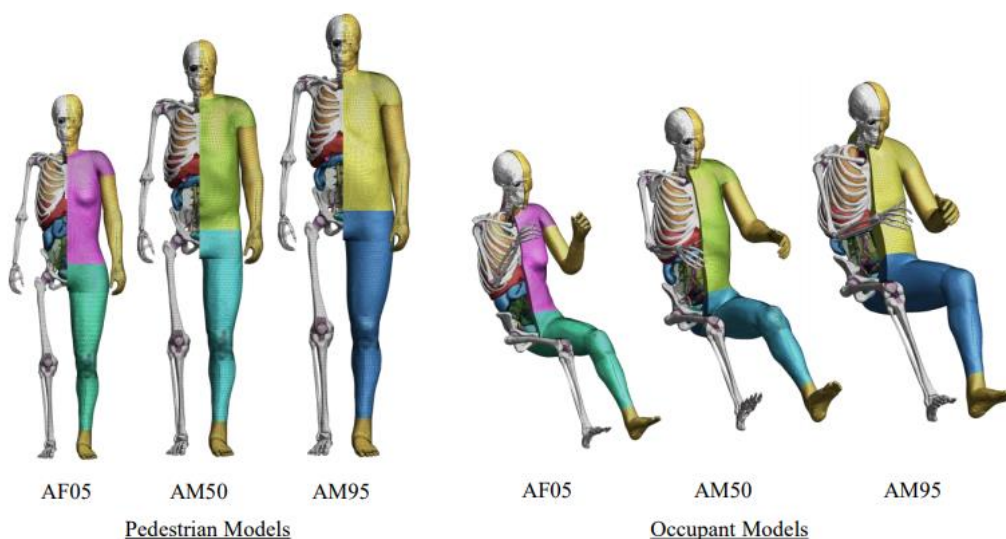


Figura 30. Famiglia intera THUMS versione 4 [32]

I modelli THUMS sono disponibili in commercio e, negli anni, sono state sviluppate diverse versioni:

1. La prima versione, completata nel 2000, prevedeva le principali ossa ed i principali legamenti, mentre il cervello e gli organi interni erano stati semplificati come parti

solide. I movimenti articolari erano stati simulati come movimento relativo tra le ossa senza utilizzare elementi articolari cinematici equipaggiati nel codice agli elementi finiti. Il modello prevedeva un numero totale di elementi di circa 80 000 con una mesh di dimensione media di 15 mm. Lo scopo principale era quello di simulare le fratture ossee e le rotture dei legamenti negli incidenti automobilistici;

2. La seconda versione, generata nel 2004, comportava una modifica alle parti dell'osso facciale per simulare la frattura;
3. La terza versione, disponibile dal 2008, ha introdotto un modello cerebrale dettagliato per simulare una lesione cerebrale ed il numero totale di elementi utilizzati era di circa 130 000;
4. La quarta versione è l'ultimo modello, completato nel 2010, in cui sono state modellate parti di organi interni in modo da poter simulare le loro ferite. Quest'ultimo contiene un numero totale di elementi di circa 2 000 000.

4.2.1 THUMS versione 4

La versione 4 mira a simulare le lesioni agli organi interni. Per questo, sono state generate mesh agli elementi finiti completamente nuove per rappresentare accuratamente la geometria del corpo umano. Le scansioni TC ad alta risoluzione sono state utilizzate per digitalizzare l'interno del corpo e per generare dati geometrici precisi per gli organi interni. Di conseguenza, è stato possibile riprodurre accuratamente la disposizione degli organi all'interno del corpo e le loro strutture di collegamento. Inoltre, la modellazione rifletteva le caratteristiche anatomiche di ciascun organo e, inserendo i dati sulle proprietà fisiche del tessuto dell'organo riportati nelle ultime ricerche, è stato possibile simulare lesioni a livello tissutale. La figura 31 mostra le immagini della pelle, dello scheletro e dei tessuti molli inclusi nei dati scansionati.

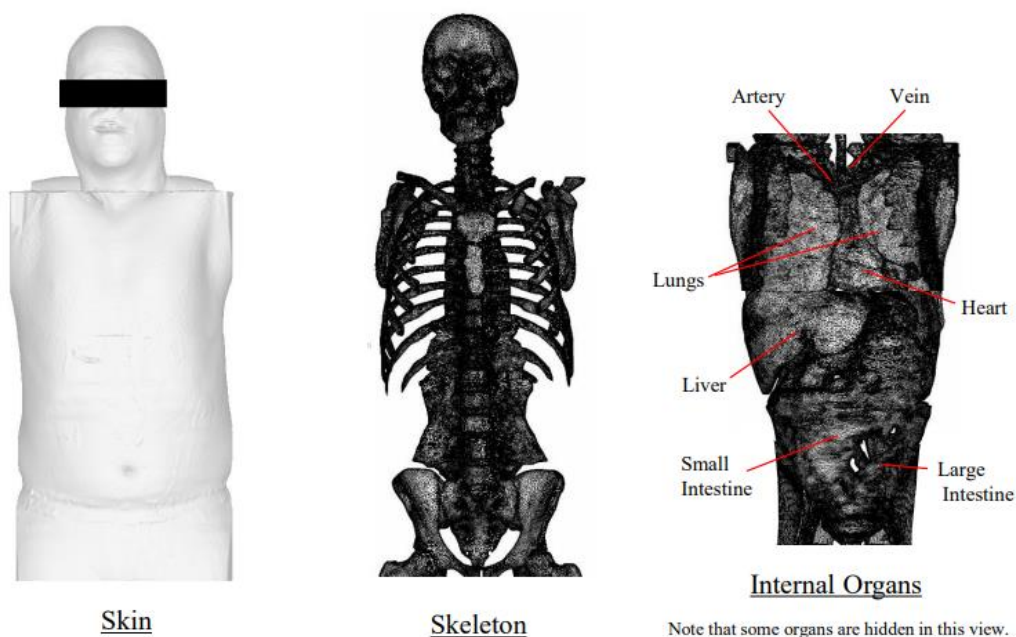


Figura 31. Dati digitalizzati del corpo umano [32]

Le diverse parti sono caratterizzate dalle seguenti proprietà:

- Le parti scheletriche con proprietà elasto-plastiche.
- I tessuti molli con materiale iperelastico che simula bene il loro comportamento meccanico. Tra questi sono compresi: i legamenti, i tendini, parti di pelle e carne. Tutti possiedono generalmente una bassa rigidità per un piccolo allungamento ma mostrano un'elevata rigidità per un grande allungamento.
- Organi solidi come fegato, reni e cuore hanno proprietà meccaniche incompressibili.
- Gli organi cavi come il polmone e l'intestino hanno proprietà meccaniche di compressione. Per tali parti sono stati assunti materiali espansi a bassa densità.

I dati di proprietà immessi in ciascun modello di materiale provengono dai dati della letteratura. Il modello assume le seguenti unità di misura: tempo in secondi, lunghezza in millimetri, massa in tonnellate, forza in newton, gli stress/pressione in megapascal ed energia in newton millimetri.

Modello della testa

Il modello include l'epidermide (pelle), il cranio, la mandibola, i bulbi oculari, i denti, le meningi, il cervello, il cervelletto, il tronco encefalico ecc. La parte delle meningi ha tre strati; dura madre, aracnoide e pia madre. Le parti del cervello includono la materia bianca e la materia grigia. La lunghezza dell'elemento che costituisce le parti del cervello, cranio ed epidermide è compresa tra 1,2 e 5 mm per la versione 4.02. La parte inferiore della testa è attaccata al modello del busto tramite il collo, la fusione avviene tramite il condilo occipitale. I muscoli del collo sono modellati con elementi 1D e i loro punti di attacco alle parti ossee corrispondono ai punti di inserimento effettivi. Per il cervello si assume materiale incompressibile e viscoelastico. Le connessioni delle parti e le definizioni dei contatti sono state rimosse per migliorare la stabilità numerica.

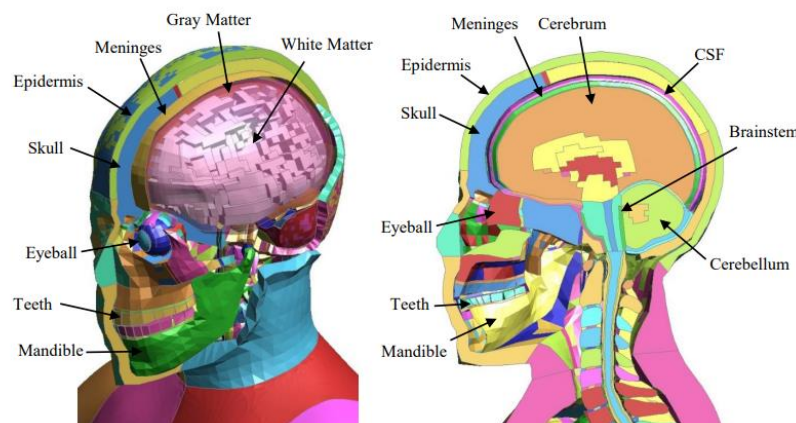


Figura 32. Modello della testa [32]

Modello del torso

Il modello comprende tutte le parti scheletriche ed i principali tessuti molli. La figura 33 mostra le parti scheletriche compreso il collo. I tessuti duri inclusi sono; costole, sterno,

colonna vertebrale (vertebre), clavicole, scapole, sacro e bacino. Le ossa corticali del tronco sono modellate con elementi shell poiché il loro spessore è di circa 1 mm o inferiore, mentre le ossa trabecolari sono modellate con elementi solidi. Gli elementi solidi sono utilizzati anche per modellare i tessuti connettivi come le cartilagini costali, i dischi intervertebrali e la sinfisi pubica. Gli elementi shell sono usati per i legamenti. I nodi sulle superfici di confine tra il tessuto connettivo sono condivisi (ad esempio ossa corticali e trabecolari, cartilagine costale e ossa costali). Tutte le parti sono deformabili. Si presume che le ossa siano viscoplastiche elastiche, mentre per i dischi intervertebrali e la sinfisi pubica si ipotizzano materiali di tipo espanso.

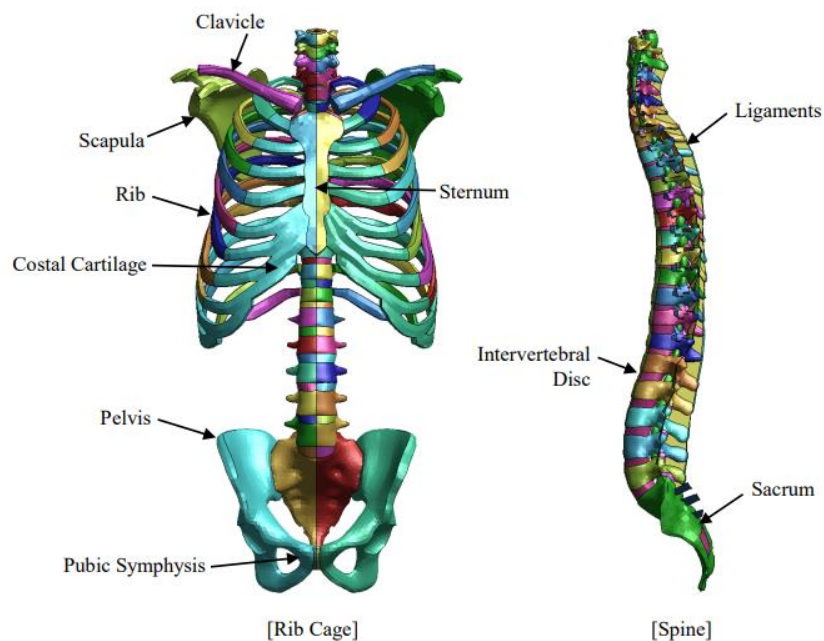


Figura 33. Parti scheletriche nel modello del torso (con modello del collo) [32]

La Figura 34 mostra le parti principali dei tessuti molli. I muscoli spessi o voluminosi sono modellati con elementi solidi mentre i muscoli relativamente sottili sono modellati con elementi 1D. I tessuti degli organi interni inclusi nel modello sono; cuore, polmoni, fegato, reni, milza, pancreas, cistifellea, vescica, esofago, stomaco, duodeno, intestino tenue e intestino crasso. Ogni tessuto d'organo è modellato come una singola parte FE. Sono inclusi anche i tessuti tubolari come l'arteria, la vena e l'esofago. I nodi sulle superfici di confine tra il tessuto connettivo sono condivisi (ad esempio aorta/vena cava e cuore/polmoni). I nodi sono anche condivisi in corrispondenza di connessioni parziali tra tessuti adiacenti come la porzione superiore del fegato attaccata al diaframma e la porzione posteriore dell'intestino crasso che si collega al peritoneo. I contatti scorrevoli sono definiti per altre superfici di confine, come l'interfaccia tra organi diversi o tra organi e membrane non connessi. I materiali iperelastici sono assunti per i tessuti molli solidi, mentre i materiali espansi sono utilizzati per gli organi cavi.

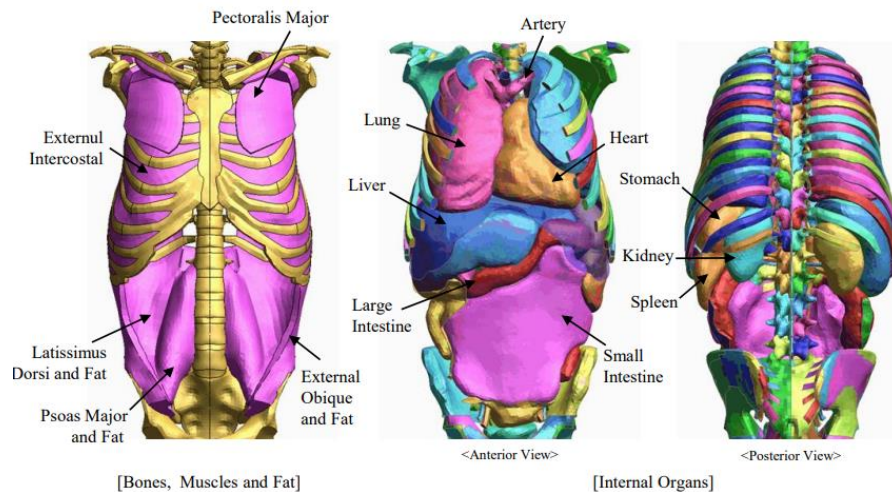


Figura 34. Parti di tessuti molli nel modello del torso [32]

Modelli delle estremità

I modelli di estremità comprendono tutte le parti scheletriche ed i principali tessuti molli. La figura 35 mostra i componenti principali. Gli elementi solidi sono usati sia per le ossa corticali che per quelle trabecolari. Le parti scheletriche sono circondate da parti di carne. Le parti di carne sono divise in sottogruppi; per lo più corrispondenti ai muscoli estensori e ai muscoli flessori. I nodi sulle superfici di confine sono condivisi tra la carne e le parti scheletriche, ma non sono tra le parti della carne divise. I contatti scorrevoli sono definiti tra le parti della carne in modo che si comportino come parti muscolari separate. Gli elementi shell sono usati per modellare la pelle. La parte della pelle copre completamente le parti della carne che condividono i nodi. Le parti scheletriche sono costituite da materiale deformabile non lineare, mentre le parti di carne da materiale iperelastico.

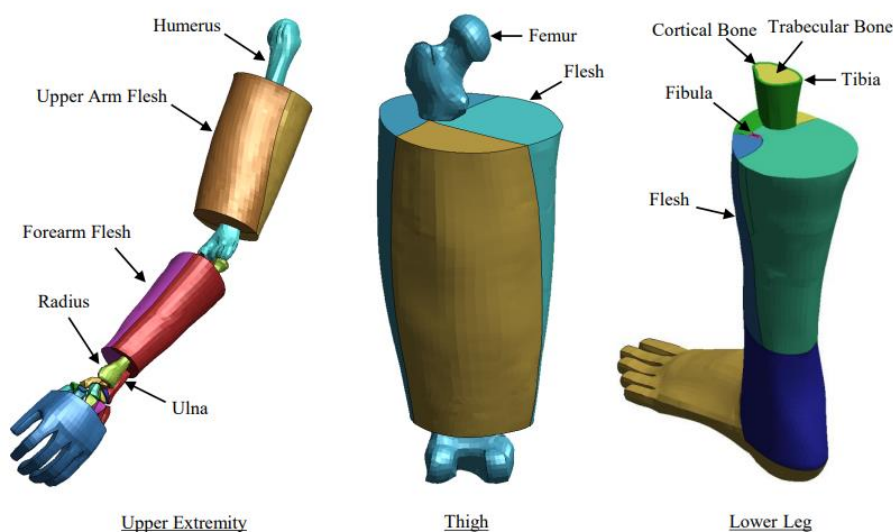


Figura 35. Modelli delle estremità [32]

Modelli delle articolazione

Le articolazioni sono modellate come connessioni osso-osso con legamenti. Non viene utilizzato alcun elemento giunto cinematico. La figura 36 mostra l'articolazione del ginocchio e l'articolazione della caviglia. La parte distale del femore è rivolta verso la parte prossimale della tibia. Queste ossa sono collegate dai legamenti del ginocchio come ACL, PCL, MCL, LCL, il tendine del quadricipite e il legamento rotuleo. La rotula è attaccata al tendine del quadricipite e al legamento rotuleo. Gli elementi solidi vengono utilizzati per modellare questi legamenti. Si assumono materiali iperelastici per legamenti e tendini. Anche i menischi sono modellati sul piatto tibiale. L'area dell'articolazione del ginocchio è coperta da elementi di membrana che rappresentano la capsula. I legamenti dell'articolazione della caviglia sono modellati con elementi shell, mentre quelli del piede sono modellati con elementi 1D. La porzione distale del tendine di Achille è modellata utilizzando elementi solidi ed è attaccata al calcagno. Anche l'area dell'articolazione della caviglia è coperta dalla parte della capsula.

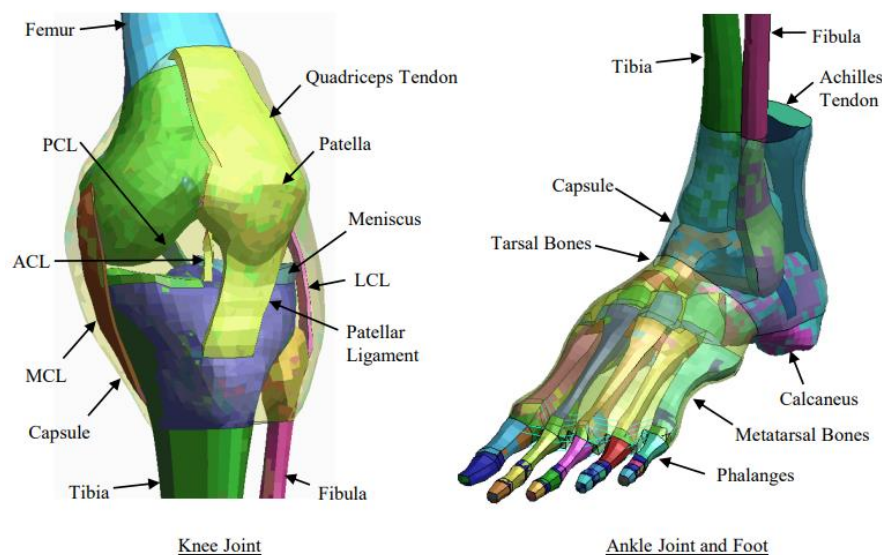


Figura 36. Modelli delle articolazioni [32]

Modello completo del corpo

Il modello del corpo intero è stato generato integrando i modelli dei componenti (modelli della testa, del busto e delle estremità). I confini tra i modelli dei componenti sono stati accuratamente collegati in modo da far combaciare le mesh senza creare discontinuità geometriche. La figura 37 mostra il modello del corpo intero. La pelle e le parti di carne ricoprono completamente il corpo. Le parti agli elementi finiti sono fondamentalmente generate in modo simmetrico e sono anche separate nelle aree di giunzione. Gli elementi tetraedrici sono utilizzati nelle aree di giunzione per facilitare il remeshing, mentre gli elementi esaedrici sono utilizzati nelle altre parti. Il modello contiene circa 760 000 nodi e 1,9 milioni di elementi. La figura 38 mostra la vista scheletrica/muscolare [32].

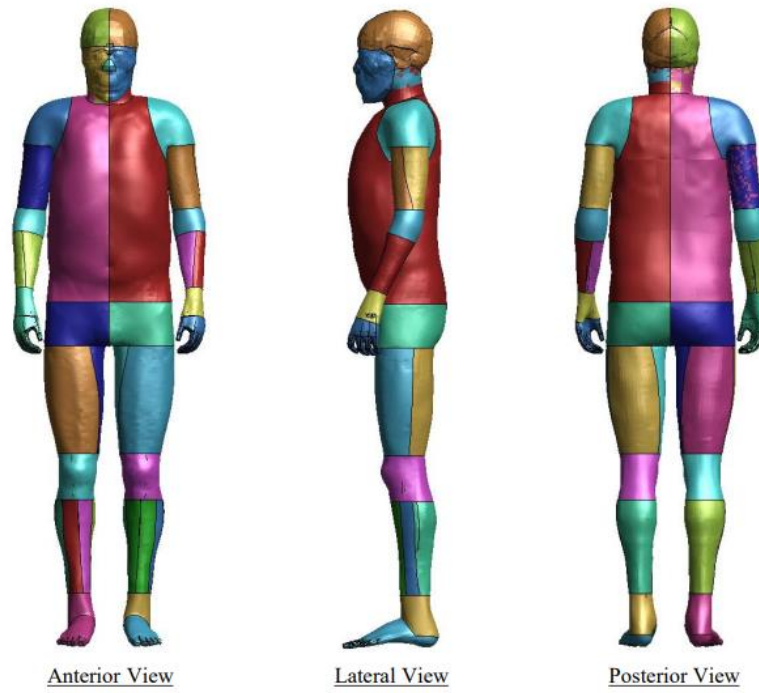


Figura 37. Modello completo del corpo [32]

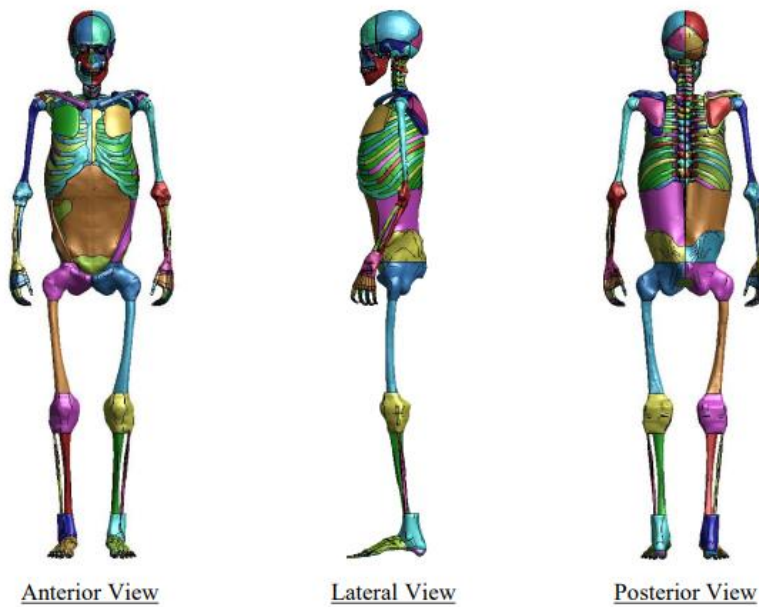


Figura 38. Modello completo del corpo (scheletro) [32]

4.3 Modello dell'impattore testa adulto

Il modello di impattore testa è stato sviluppato con riferimento al sistema di unità di misura descritto in tabella 3.

Tabella 3. Convenzione di unità di misura impiegate nel modello di impattore testa

Quantità	Unità di misura
Lunghezza	millimetri
Massa	kilogrammi
Tempo	millisecondi
Densità	kilogrammi al millimetro cubo
Forza	kilonewton
Momento	kilonewton millimetro
Sforzo	kilogrammi al millimetro quadro

Le caratteristiche geometriche del modello sono descritte in figura 39.

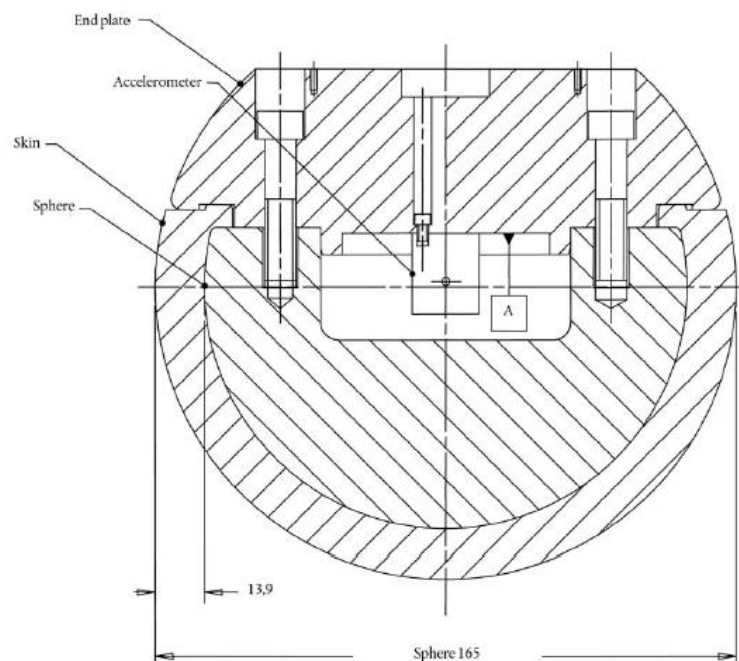


Figura 39. Modello descrittivo di impattore testa

Il modello numerico di impattore è costituito da una sfera di alluminio, modellata con elementi shell in LS-DYNA, ricoperta da un rivestimento di schiuma sintetica (i.e., materiale elastico) di spessore 13,9 mm descritto con elementi brick. Gli elementi della schiuma di copertura sono a loro volta ricoperti da shell di materiale nullo per agevolare la gestione dei contatti esterni dell'impattore.

Il diametro esterno è di 165 mm mentre la massa totale è di 4,8 kg.

Le corrette caratteristiche inerziali dell'impattore sono ristabilite imponendo il tensore d'inerzia alla calotta sferica di alluminio, tramite la card *PART_INERTIA in LS-DYNA. Il centro di gravità dell'impattore, che comprende anche la strumentazione, è collocato al centro della sfera a meno di una tolleranza di 5 mm. Il sistema è dotato di un accelerometro triassiale.

Il modello è descritto in tabella 4.

Tabella 4. Composizione del modello numerico di impattore testa

Numero di componenti	4
Numero di elementi	7604
Numero di nodi	6248
Numero di sistemi di riferimento	1

5. Fase preliminare

La fase preliminare prevede la certificazione del modello di corpo umano THUMS tramite l'urto con un veicolo generico family car secondo il bollettino tecnico 024 Euro NCAP. Prima della certificazione è stata verificata la robustezza del veicolo generico e la conformità del solutore utilizzato.

5.1 Verifica del veicolo generico

Come indicato dal bollettino tecnico 024, prima di certificare il modello di corpo umano THUMS, sulla mezzeria del veicolo generico family car (FC), devono essere eseguite quattro prove preliminari con un dispositivo di simulazione cilindrico rigido con una massa totale di 5,95 kg. Il fine è di verificare la robustezza del veicolo generico tramite il solutore utilizzato, evitando problematiche relative alla compatibilità tra le varie versioni.

Il cilindro deve essere spinto ad una velocità iniziale di 40 km/h secondo il suo sistema di riferimento locale (con vettore velocità giacente su un piano ortogonale all'asse del cilindro stesso) contro la parte anteriore in quattro diversi punti di impatto specificati che sono rispettivamente spoiler (figura 40a), bumper (figura 40b), bonnet leading edge (figura 40c) e bonnet (figura 40d). La card utilizzata è *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY.

La forza (calcolata dall'accelerazione) e gli spostamenti delle simulazioni riguardanti il dispositivo devono essere confrontati con le risposte di riferimento dei corridoi.

Inoltre, è stato valutato il parametro di massa aggiuntiva (added_mass). Nel metodo esplicito, generalmente, il passo temporale è molto piccolo per mantenere la stabilità numerica. Tuttavia, le dimensioni ridotte del passo impediscono a questo metodo di essere utile per il lavoro di analisi di routine. Il mass scaling viene spesso utilizzato per aumentare la dimensione del passaggio temporale (LS-DYNA – Mass Scaling) così da ridurre il costo della CPU e migliorare le prestazioni. Dunque, risulta importante controllare nel post-processing che la massa aggiunta dal solutore sia una percentuale bassa della sua massa reale, al fine di ottenere risultati attendibili.

Le unità di misura utilizzate nella simulazione sono: lunghezza in millimetri, massa in kilogrammi, tempo in millisecondi, forza in kilonewton, stress/pressione in gigapascal ed energia in newton metri.

È stata richiesta in output la cronologia (accelerazione risultante e deflessione risultante) del nodo di interesse dell'impattore cilindrico con ID 10 000 che rappresenta il suo centro di gravità.

Il tempo di simulazione (ENDTIM) è stato settato pari a 35 ms, definito all'interno della card *CONTROL_TERMINATION.

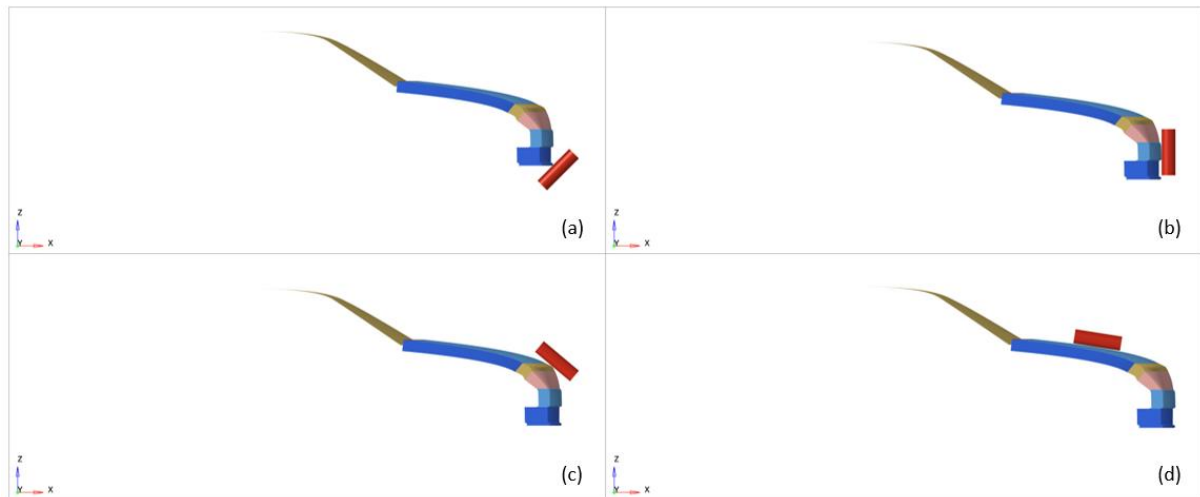


Figura 40. Posizionamento dell'impattore cilindrico nella zona dello spoiler (a), del bumper (b), del bonnet leading edge (c) e del bonnet (d)

Le curve forza-spostamento ottenute (Current) sono riportate nei grafici di figura 41 e rientrano nei corridoi di riferimento (Corridor Loading e Corridor Unloading).

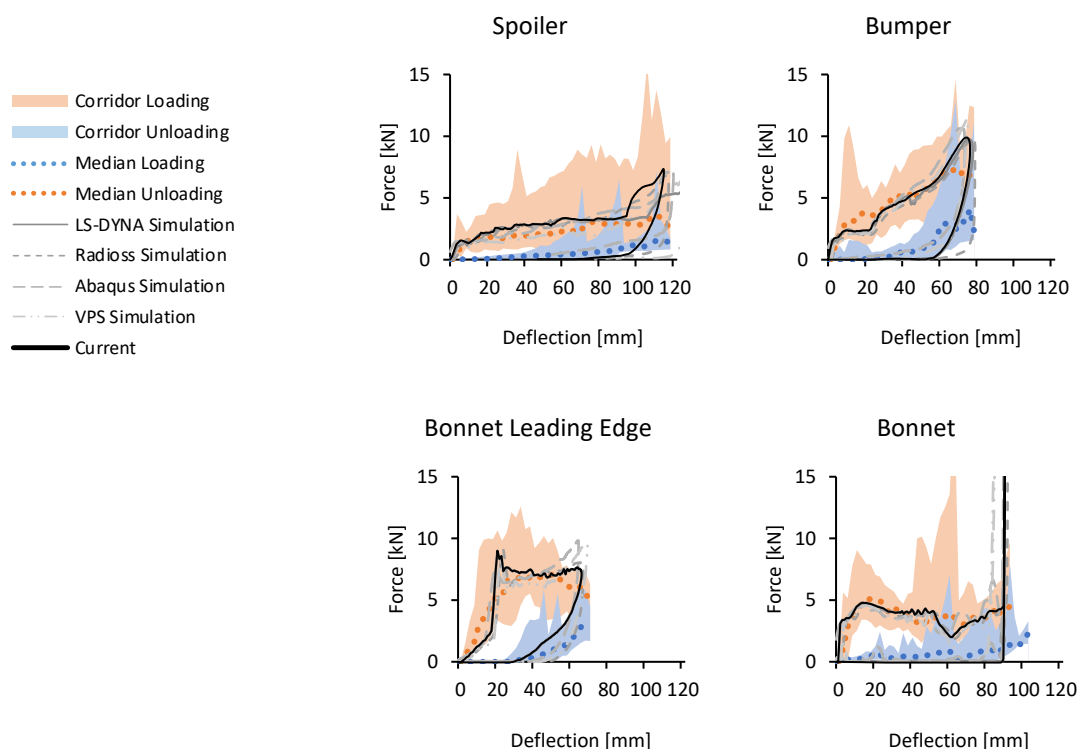


Figura 41. Grafici forza-spostamento dell'impattore cilindrico

La massa totale è pari a 1709 kg, a cui è stata sommata una massa artificiale massima pari a 6,38 kg (caso del bonnet, figura 45), dunque, valore ritenuto accettabile.

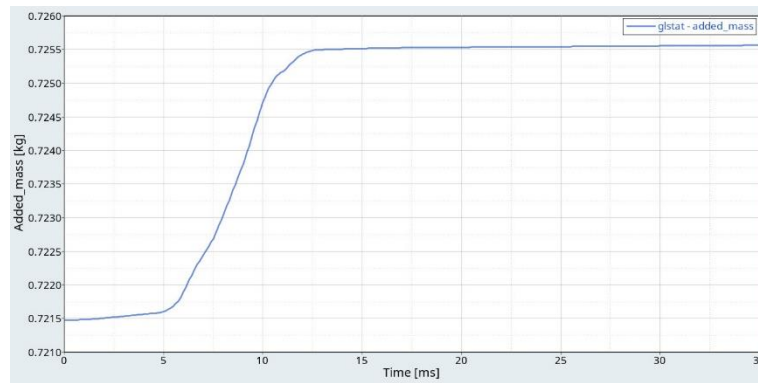


Figura 42. Andamento massa aggiunta per lo spoiler

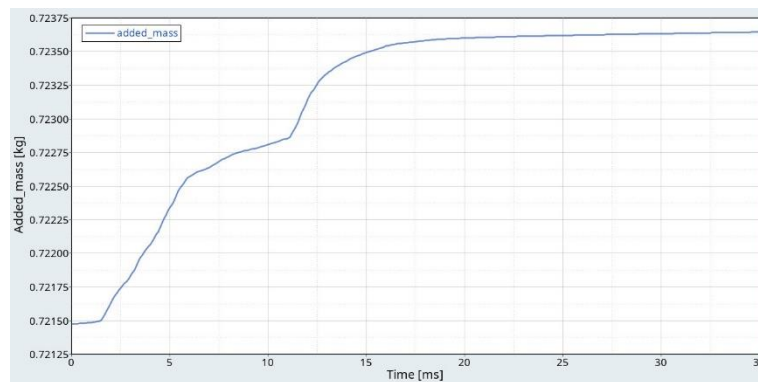


Figura 43. Andamento massa aggiunta per il bumper

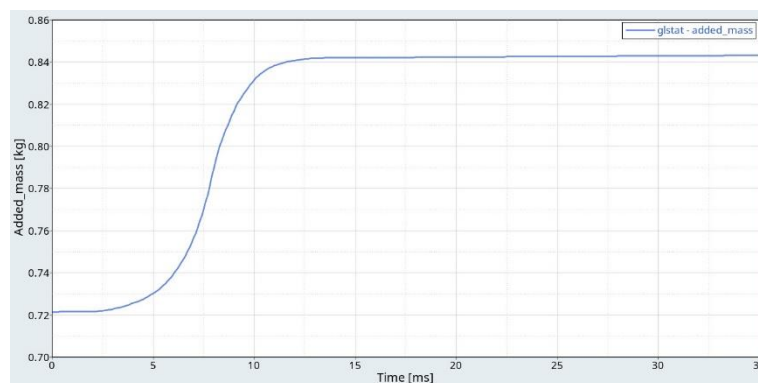


Figura 44. Andamento massa aggiunta per il bonnet leading edge

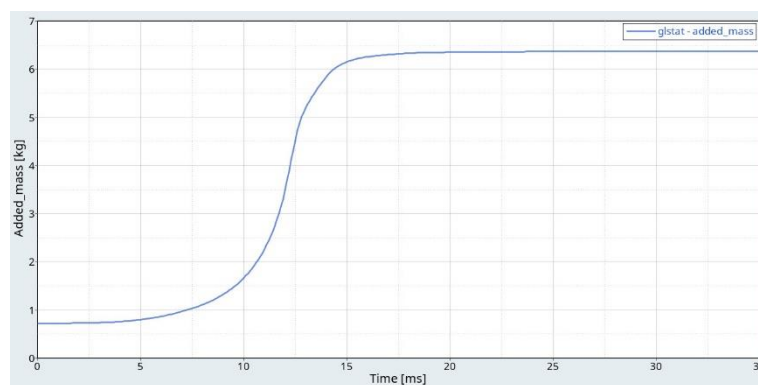


Figura 45. Andamento massa aggiunta per il bonnet

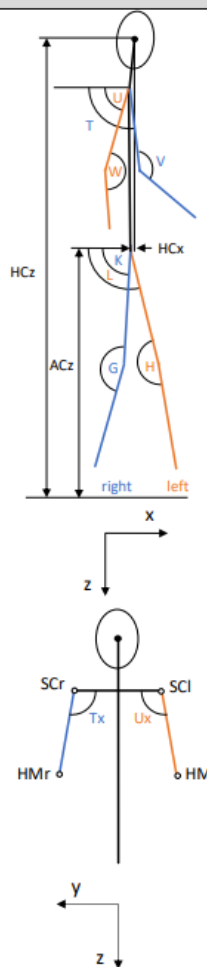
5.2 Verifica del modello di corpo umano THUMS

In questo paragrafo è riportata la simulazione di certificazione dello human body model, ovvero, una simulazione computerizzata che attesti che il modello THUMS risulti confrontabile con altri modelli e dimostri risultati coerenti, in particolare in riferimento alla cinematica del corpo e al tempo di impatto della testa.

Nell'analisi sono state utilizzate le seguenti unità di misura: lunghezza in millimetri, massa in kilogrammi, tempo in millisecondi, forza in kilonewton, stress/pressione in gigapascal ed energia in newton metri.

Per eseguire la simulazione è stato necessario dotare il THUMS di un paio di scarpe (con uno spessore della suola compreso tra 20 mm e 30 mm ed un peso non superiore a 1300 g) e posizionarlo secondo i parametri del protocollo Euro NCAP, riportati in tabella 5. I valori effettivi del posizionamento del THUMS sono riportati in tabella 6 e la sovrapposizione dello scheletro del THUMS con lo scheletro di riferimento Euro NCAP è riportato in figura 46. La posizione iniziale mira ad una postura di camminata naturale.

Tabella 5. Posizione iniziale AM50 riportata nel TB024 [19]

Abbrev.	Measure	Ref. Value	Tolerance (+/-)	Angle Definition
Px	Heel to heel distance Longitudinal	310 mm	5.0%	
Py	Heel to heel distance lateral	185 mm	15.0%	
ACz ⁷	Height of AC relative to the ground level	949 mm	1.2%	
K	Right Upper Leg Angle (around Y w.r.t. horizontal)	89°	3°	
L	Left Upper Leg Angle (around Y w.r.t. the horizontal)	106°	5°	
G	Right Knee flexion Angle (Y)	164°	3°	
H	Left Knee flexion Angle (Y)	175°	5°	
Ty	Right Upper Arm Angle (Y w.r.t. horizontal)	98°	3°	
Uy	Left Upper Arm Angle (Y w.r.t. horizontal)	70°	3°	
Tx	Right Upper Arm Angle (X w.r.t. horizontal)	100°	10°	
Ux	Left Upper Arm Angle (X w.r.t. horizontal)	100°	10°	
V	Right Elbow flexion Angle	140°	5°	
W	Left Elbow flexion Angle Left	160°	10°	
HCx	x-Position of HC relative to AC	44 mm	15 mm	
HCz ⁸	Height of HC relative to the ground level	1686 mm	0.8%	

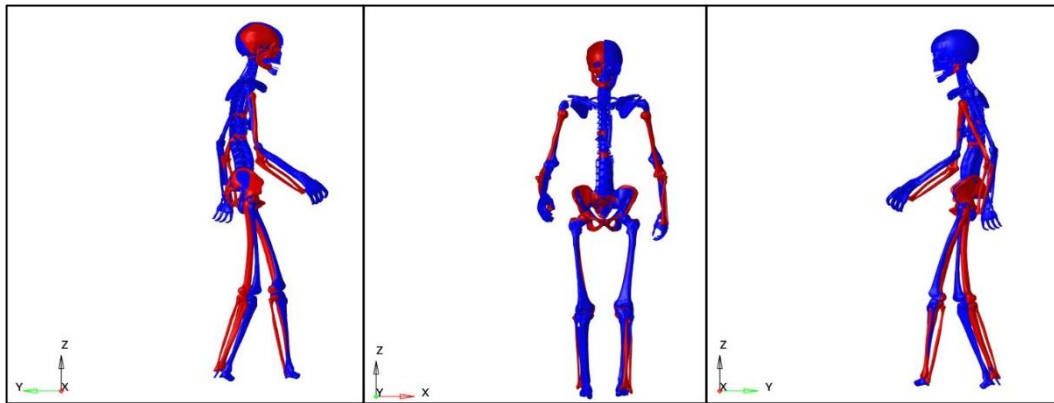


Figura 46. Sovrapposizione scheletro THUMS (blu) e scheletro Euro NCAP (rosso)

Tabella 6. Postura iniziale THUMS

Abbreviazione	Unità di misura	Valore
Px	mm	298
Py	mm	167
ACz	mm	939
K	°	91
L	°	105
G	°	165
H	°	176
Ty	°	98
Uy	°	70
Tx	°	100
Uy	°	103
V	°	140
W	°	160
HCx	mm	44
HCz	mm	1682

Il THUMS è stato posizionato il più vicino possibile al generico veicolo family car (FC) con il centro di gravità della testa in linea con la mezzeria del veicolo ($y=0$ nel sistema di coordinate globale). Il lato destro è la parte colpita a tre diverse velocità di collisione; 30 km/h, 40 km/h e 50 km/h.

È stato scelto un tempo di simulazione maggiore del tempo di impatto previsto della testa (Head Impact Time). L'Head Impact Time (HIT) è definito come il tempo dal primo aumento della forza di contatto del paraurti (C) fino al primo aumento della forza di contatto tra testa e generico veicolo (H) che è definito come il momento in cui la forza di contatto inizia ad aumentare (la prima volta in cui la forza di contatto non è più pari a zero).

La cinematica del corpo è riportata in figura 47.

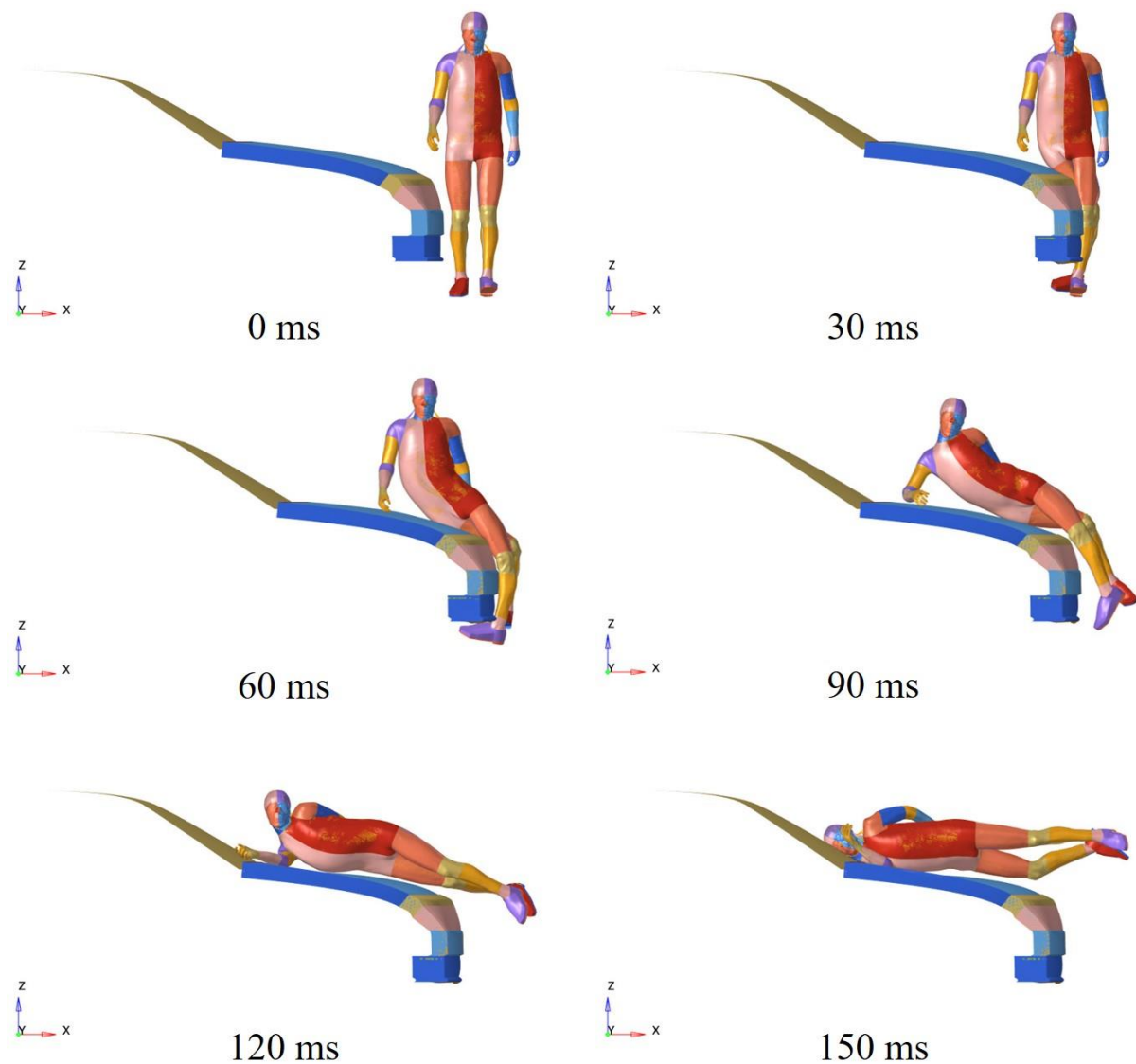


Figura 47. Cinematica del THUMS

Nella fase di post-processing sono richiesti i seguenti output:

- *Forze di contatto*: forza di contatto totale tra veicolo e THUMS e forza di contatto per strato di interfaccia (paraurti e cofano) e parte del corpo (testa, braccio destro, gamba destra e torso).
- *Cronologia delle coordinate X e Z dei nodi di tracciamento* (HC, C7, T12, AC, T8, FR, MR, FL, ML) nel sistema di coordinate globale.

I nodi di tracciamento con relativo ID sono riportati in tabella 7.

Tabella 7. Nodi di tracciamento THUMS

Nome	Abbreviazione	ID del nodo
Centro di gravità della testa	HC	90 000 300
Centro dei nodi del corpo vertebrale C7	C7	90 000 320
Centro dei nodi del corpo vertebrale T8	T8	90 000 330
Centro dei nodi del corpo vertebrale T12	T12	90 000 340
Il punto medio tra i centri dell'acetabolo destro e sinistro	AC	90 000 400
Il punto medio dell'epicondilo femorale laterale e mediale (destra)	Fr	90 000 350
Il punto medio dell'epicondilo femorale laterale e mediale (sinistra)	Fl	90 000 360
Il punto intermalleolare (destra)	Mr	90 000 370
Il punto intermalleolare (sinistra)	Ml	90 000 380

- *Accelerazione risultante, velocità risultante e accelerazione lungo Z del centro della testa.*
- *Energia di hourglass, di contatto, interna e totale.*
- *Massa aggiunta e timestep.*
- *Spostamento lungo X del centro di gravità del veicolo nel sistema di coordinate globale.*
- *Incremento percentuale di massa aggiunta durante la simulazione.*
- *Energia di hourglass e quantità di massa aggiunta riferite al THUMS.*

Tutti i seguenti controlli e criteri di qualità definiti all'interno del modello di post-elaborazione devono essere soddisfatti:

- *Le superfici FE che entrano in contatto non devono compenetrarsi.*
- *Le superfici che entrano in contatto non devono rimanere bloccate l'una nell'altra.*
- *La forza di contatto (tra THUMS e veicolo) deve essere nulla all'inizio della simulazione.*

I precedenti tre requisiti sono stati soddisfatti da tutte le simulazioni eseguite.

- *L'energia totale deve rimanere costante entro una tolleranza del 15%.*

Nella simulazione a 30 km/h si riscontra un valore di 0,4% mentre per 40 km/h e 50 km/h il valore risulta 0,2%.

- *Energia di hourglass non deve superare il 10% dell'energia totale.*

In tutte le simulazioni il valore risulta pari a 0,1%.

- *Energia di contatto all'inizio della simulazione non deve superare l'1% dell'energia totale.*

In tutte le simulazioni il valore dell'energia di contatto è nullo, quindi, corrisponde allo 0% dell'energia totale.

- *Energia artificiale (energia di contatto ed energia di hourglass) non devono superare il 15% dell'energia totale.*

Per le velocità di 30 km/h e 50 km/h il valore è di 0,4% mentre nel caso di velocità pari a 40 km/h tale valore raggiunge lo 0,5%.

- *Aumento della massa artificiale non deve superare il 3%.*

L'aumento della massa artificiale nei casi di velocità di 30 km/h e 50 km/h si stabilizza a 0,09% mentre nel caso di 40 km/h si osserva un leggero aumento fino a 0,1%.

- *La traiettoria delle coordinate X e Z dei punti di tracciamento HC, AC, T12 deve essere fornita e confrontata con i corridoi¹.*

Le cronologie dei nodi vengono ritagliate automaticamente da C a H nel modello di post-elaborazione. Tutte le traiettorie rientrano all'interno dei corridoi.

¹ La procedura con cui sono stati ricavati i corridoi è descritta in Klug et al. (2019) [20].

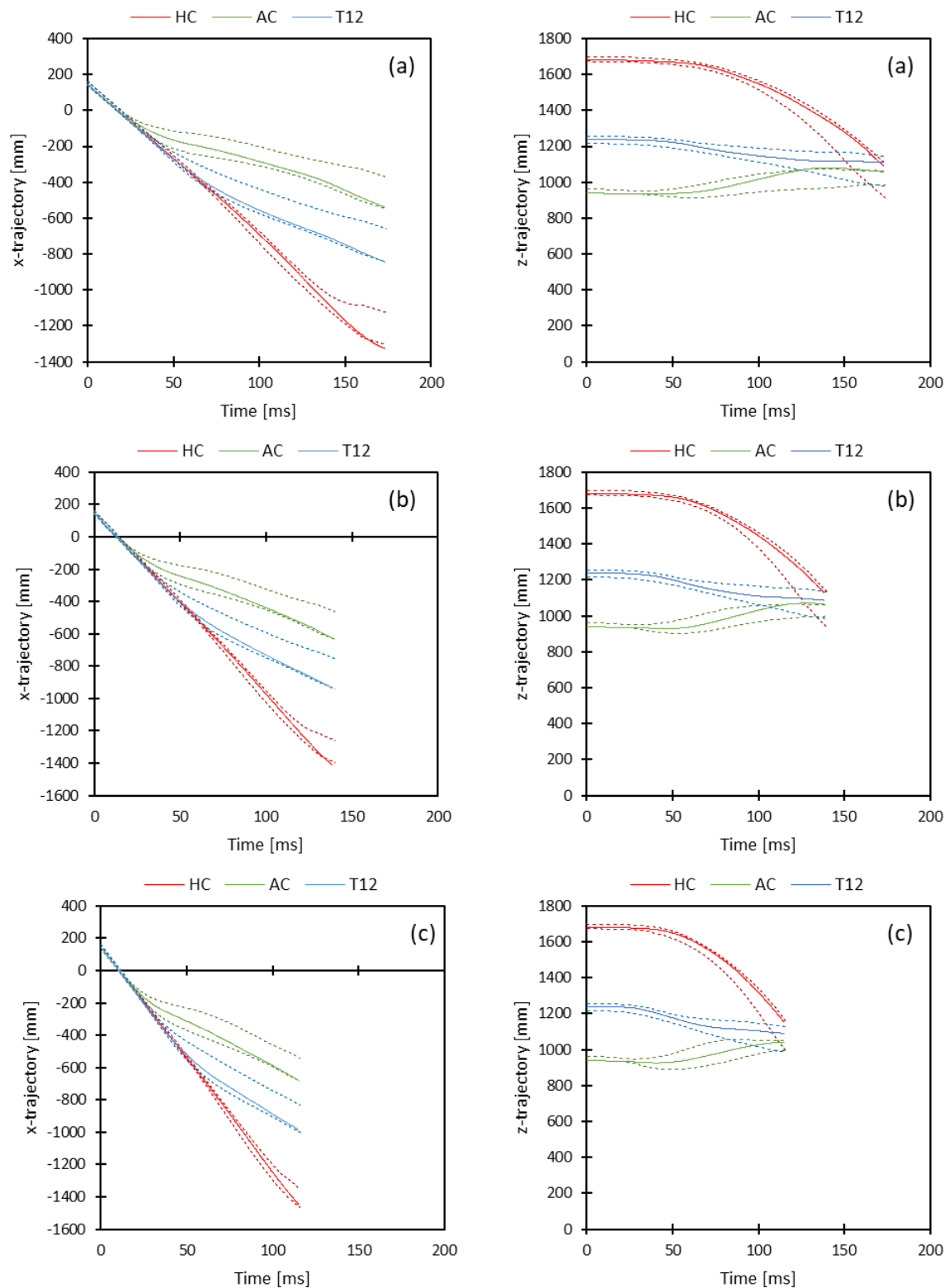


Figura 48. Traiettoria delle coordinate X e Z dei punti di tracciamento HC, AC, T12: 30 km/h (a), 40 km/h (b) e 50 km/h (c)

- L'HIT non deve discostarsi oltre il 2% rispetto all'HIT di riferimento medio.

In tutte le simulazioni il requisito è rispettato.

- Le forze di contatto devono rientrare all'interno dei corridoi.

In tutte le simulazioni la forza di contatto totale tra veicolo e THUMS rientra all'interno dei corridoi forniti.

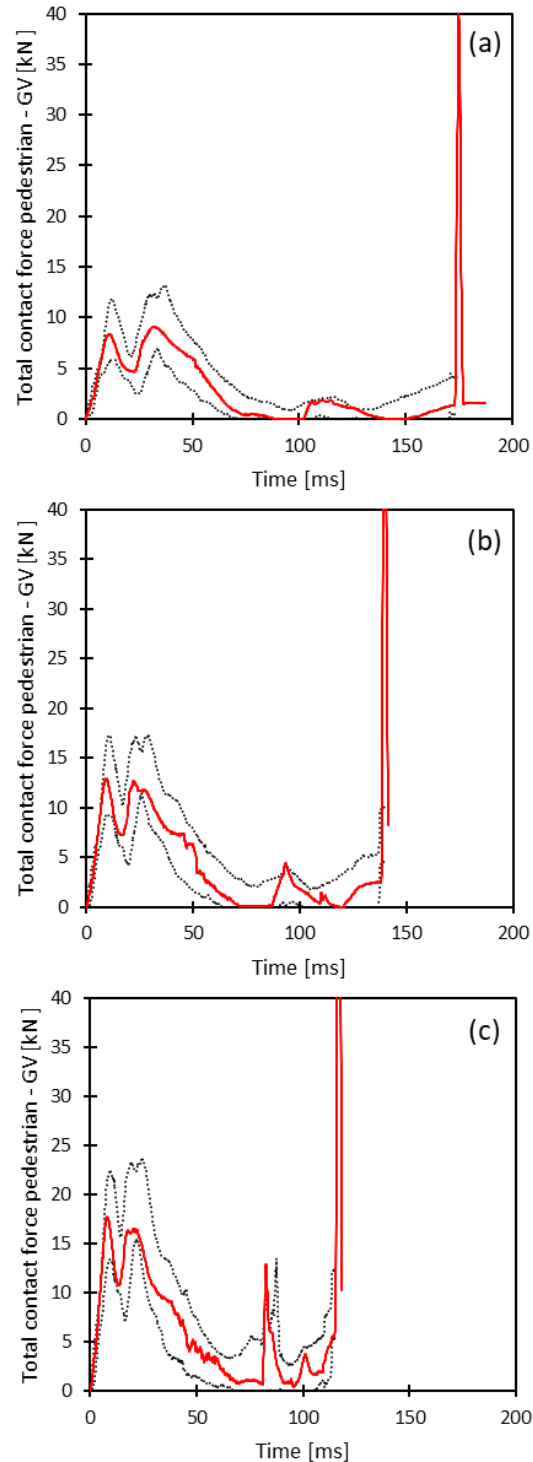


Figura 49. Andamento della forza di contatto totale: 30 km/h (a), 40 km/h (b) e 50 km/h (c)

- Il passo temporale non deve diminuire eccessivamente.

Il timestep, in tutte le simulazioni, è stato mantenuto costante a 0,0004 ms.

5.3 Impostazioni di simulazione

Verificata la ripetibilità del solutore e la conformità del modello di corpo umano THUMS, si è passati a completare i modelli per simulare l'urto, per cui in ogni simulazione è stato necessario delimitare i seguenti parametri:

- *La definizione dei contatti.*
- *La definizione dei controlli.*
- *La definizione degli output.*
- *La definizione del terreno.*
- *Velocità iniziale della vettura.*
- *Posizione del pedone rispetto alla vettura.*
- *Posizione e velocità iniziale dell'impattore testa.*

Contatti

Nelle simulazioni bisogna creare dei contatti per evidenziare come le parti che compongono il modello interagiscono tra loro. Molte definizioni di contatti erano state già effettuate all'interno dei modelli utilizzati in questo lavoro. È stato necessario aggiungere i contatti tra le vetture ed il THUMS e tra le vetture ed il modello di impattore testa tramite la keyword LS-DYNA *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Il set di parti dell'autovettura è stato imposto come master mentre il set di parti inerente al THUMS o all'impattore come slave. Il coefficiente di attrito statico e dinamico tra i due set di parti è stato settato pari a 0,3.

Inoltre, per quanto riguarda il modello THUMS, è stato definito un contatto interno per gli elementi schiuma esaedrici e tetraedrici, utilizzando la card dyna *CONTACT_INTERIOR. Quando i materiali in schiuma vengono compressi ad alta pressione, come avviene in caso di urto con un veicolo, possono invertirsi portando a volumi negativi con conseguente terminazione del calcolo. Per evitare questo fenomeno, è possibile includere contatti interni all'interno della schiuma tra strati di superfici costituite dalle facce degli elementi solidi.

Controlli

È necessario settare le card dei controlli per ottimizzare le simulazioni, tra le card utilizzate:

- *CONTROL_ACCURACY: definisce i parametri di controllo che possono migliorare l'accuratezza del calcolo.
- *CONTROL_BULK_VISCOSITY: la viscosità di massa viene utilizzata per trattare le onde d'urto.
- *CONTROL_CONTACT: modifica le impostazioni predefinite per il calcolo con le superfici di contatto.
- *CONTROL_CPU: controlla il tempo di esecuzione della CPU.

- ***CONTROL_ENERGY:** controlli per le opzioni di dissipazione dell'energia. All'interno del bilancio energetico sono incluse e calcolate l'energia di Stonewall, l'energia di contatto, l'energia di Rayleigh e l'energia di hourglass.
- ***CONTROL_HOURLASS:** controllo dei valori associati al fenomeno dell'hourglass.
- ***CONTROL_OUTPUT:** controllo sui parametri di output richiesti.
- ***CONTROL_SHELL:** controllo per il calcolo della risposta della shell.
- ***CONTROL_SOLID:** controllo per la risposta dell'elemento solido.
- ***CONTROL_SOLUTION:** controllo sul tipo di soluzione dell'analisi che viene eseguita, con possibilità di impostare altri parametri, tra cui la verifica dei NaN (Not a Number).
- ***CONTROL_TERMINATION:** controllo sulla durata della simulazione.
- ***CONTROL_TIMESTEP:** controllo delle dimensioni del passo temporale strutturale utilizzando diverse opzioni.

Output

Bisogna definire la card ***DATABASE_HISTORY_NODE** per richiedere in output la cronologia dei nodi di interesse che sarà riportata all'interno del file ASCII nodout. Per ottenere i file ASCII che contengono le informazioni relative ai risultati di interesse sono state utilizzate le seguenti card:

- ***DATABASE_GLSTAT:** contiene i valori globali del calcolo, tra cui il time step, l'energia cinetica, l'energia interna, l'energia di hourglass, l'energia di contatto, l'energia totale, la massa aggiunta (added_mass) e l'incremento percentuale di massa aggiunta (percentage_mass_increase).
- ***DATABASE_MATSUM:** tra i valori contenuti al suo interno vi sono; energia cinetica, energia interna, energia di hourglass e massa aggiunta (added_mass). Gli output di matsum e glstat presentano delle divergenze. In matsum le energie sono calcolate elemento per elemento per i materiali deformabili e, di conseguenza, anche i nodi che sono fusi con corpi rigidi avranno la loro energia cinetica inclusa nel totale del corpo rigido. Inoltre, in glstat l'energia cinetica viene calcolata dalle velocità nodali mentre in matsum dalle velocità del punto medio degli elementi.
- ***DATABASE_NODOUT:** contiene i dati relativi ai nodi precedentemente richiesti in output, tra questi: spostamento, velocità, accelerazione, velocità angolare e accelerazione angolare, ognuna lungo le direzioni X, Y e Z.
- ***DATABASE_RCFORC:** contiene le forze di contatto risultanti.

Le card ***DATABASE_BINARY_D3PLOT** e ***DATABASE_EXTENT_BINARY** permettono di ottenere gli output binari riguardanti le animazioni della simulazione.

L'intervallo di tempo per tutti gli output è stato settato pari a 0,1 ms.

Terreno

È stato definito un pavimento per caratterizzare l'interazione tra le ruote del veicolo ed il terreno e tra le scarpe del THUMS ed il terreno. La card utilizzata è la **RIGIDWALL_PLANAR*. Il coefficiente di attrito è stato settato pari a 0,9. Il pavimento creato è mostrato in figura 50.

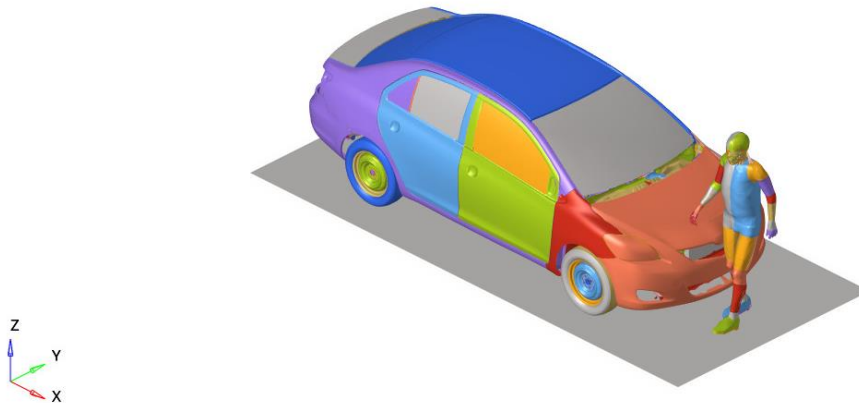


Figura 50. Vista isometrica del veicolo e del THUMS sul terreno

Velocità iniziale della vettura

Al veicolo è stata assegnata una velocità iniziale di 40 km/h tramite la card **INITIAL_VELOCITY_GENERATION*.

Posizione del pedone rispetto alla vettura

Sono stati rappresentati tre diversi scenari di collisione con il pedone: il centro della testa del THUMS allineato alla mezzzeria del veicolo ($y=0$, figura 51a e figura 52a, nella trattazione verrà indicato come **caso 1**), il centro della testa del THUMS allineato al montante anteriore del veicolo ($y=500$, figura 51b e figura 52b, nella trattazione verrà indicato come **caso 3**) e, l'ultimo, una posizione intermedia tra le due ($y=250$, figura 51c e figura 52c, nella trattazione verrà indicato come **caso 2**).²

Per posizionare il THUMS, sono state utilizzate le card **DEFINE_TRANSFORMATION* e **INCLUDE_TRANSFORM*.

² Si noti che il sistema di riferimento globale della Honda Accord differisce da quello della Toyota Yaris. Ai fini del calcolo tale differenza è ininfluenza.

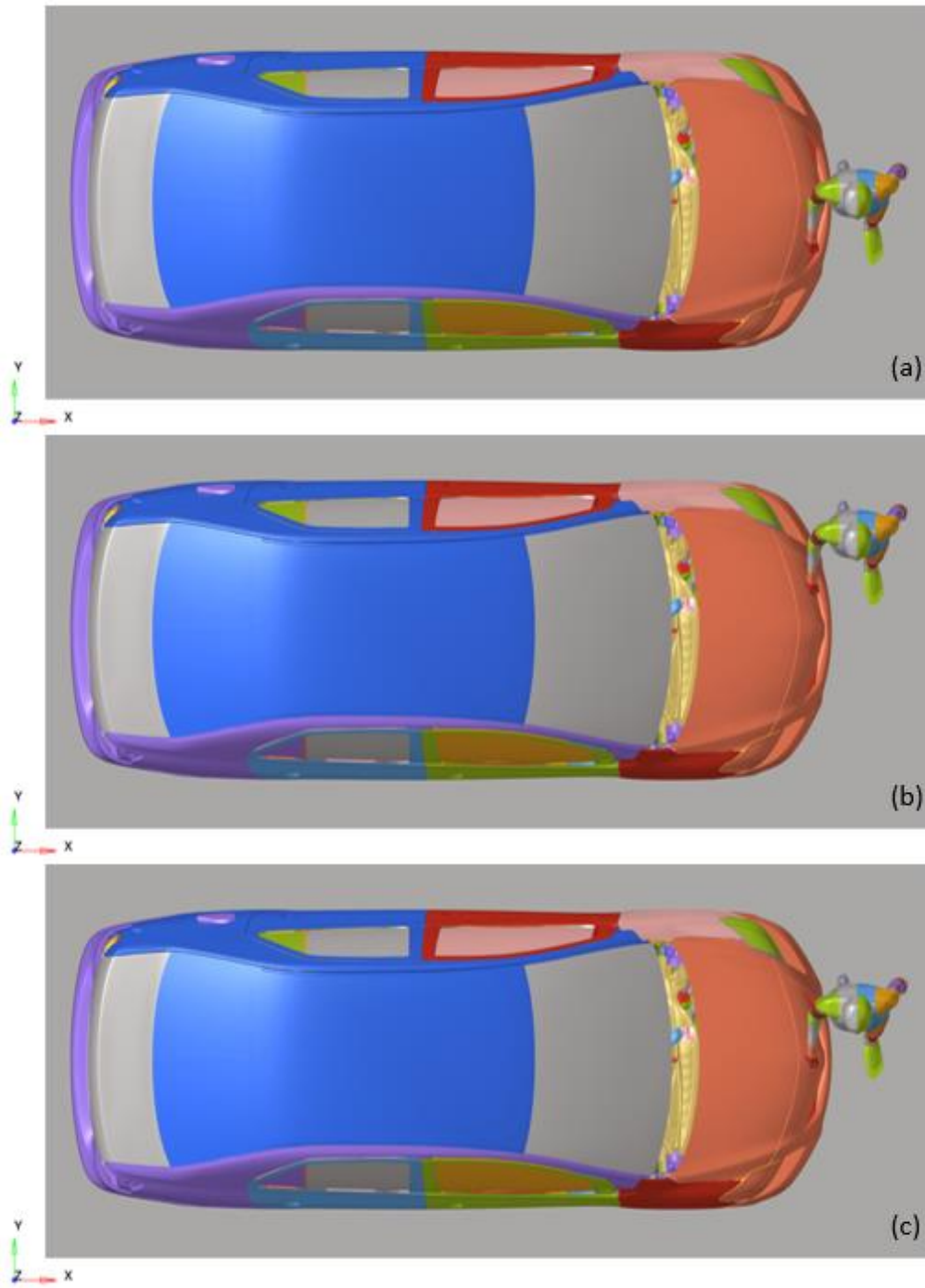


Figura 51. Posizionamento reciproco tra THUMS e Toyota Yaris

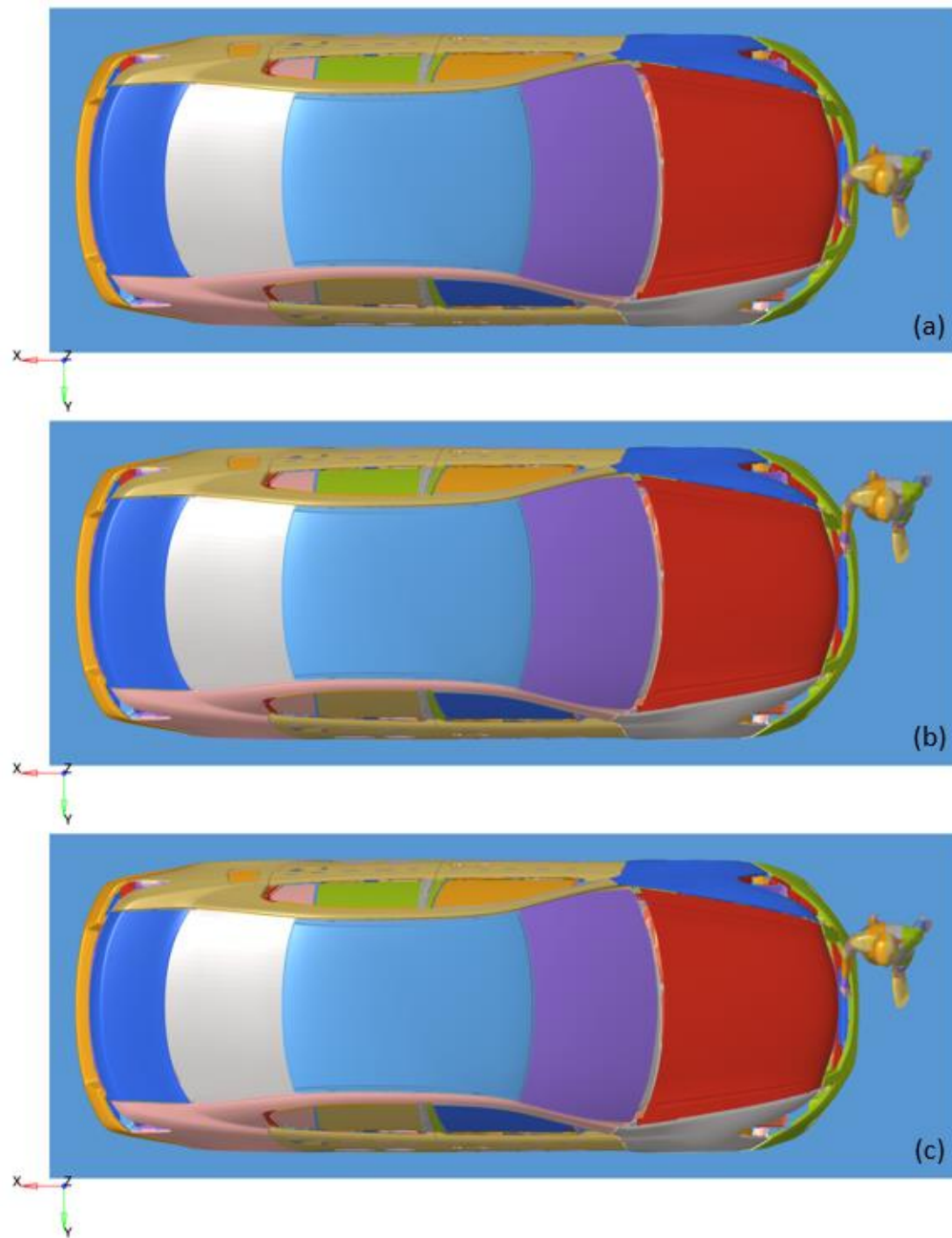


Figura 52. Posizionamento reciproco tra THUMS e Honda Accord

Posizione e velocità iniziale dell'impattore testa

La posizione iniziale dell'impattore testa è stata definita in seguito ai risultati ottenuti dalle simulazioni di impatto tra le autovetture ed il THUMS. Individuata la posizione della testa nell'istante di tempo precedente l'urto, l'impattore è stato allineato di conseguenza, come visibile in figura 53 e figura 54.

Il protocollo Euro NCAP prevede che il dispositivo di simulazione della testa di adulto, in volo libero, impatti il parabrezza con un angolo di 65° rispetto al piano di riferimento del suolo ad una velocità iniziale di 40 km/h.

Inoltre, per avere un confronto attendibile tra i criteri di lesione su testa, la simulazione è stata ripetuta con valori di velocità iniziale dell'impattore analoghi ai valori di velocità della testa del THUMS al momento della collisione con il parabrezza, valutando il primo istante di tempo in cui la forza di contatto tra veicolo e testa assumesse valore non nullo.

I valori utilizzati sono riassunti in tabella 8 per la Toyota Yaris e in tabella 9 per la Honda Accord.

Tabella 8. Velocità iniziale impattore testa in funzione della posizione per l'urto con Toyota Yaris

	Unità di misura	Caso 1 (figura 53a)	Caso 2 (figura 53c)	Caso 3 (figura 53b)
Istante di impatto della testa THUMS	s	0,123	0,125	0,140
Componente x della velocità	mm/s	-10 052	-10 143	-11 507
Componente y della velocità	mm/s	2152	1655	563
Componente z della velocità	mm/s	-9780	-9114	-6120

Tabella 9. Velocità iniziale impattore testa in funzione della posizione per l'urto con Honda Accord

	Unità di misura	Caso 1 (figura 54a)	Caso 2 (figura 54c)	Caso 3 (figura 54b)
Istante di impatto della testa THUMS	s	0,137	0,149	0,170
Componente x della velocità	mm/s	7338	9081	4786
Componente y della velocità	mm/s	-862	-1439	-1087
Componente z della velocità	mm/s	-11 886	-9370	-6325

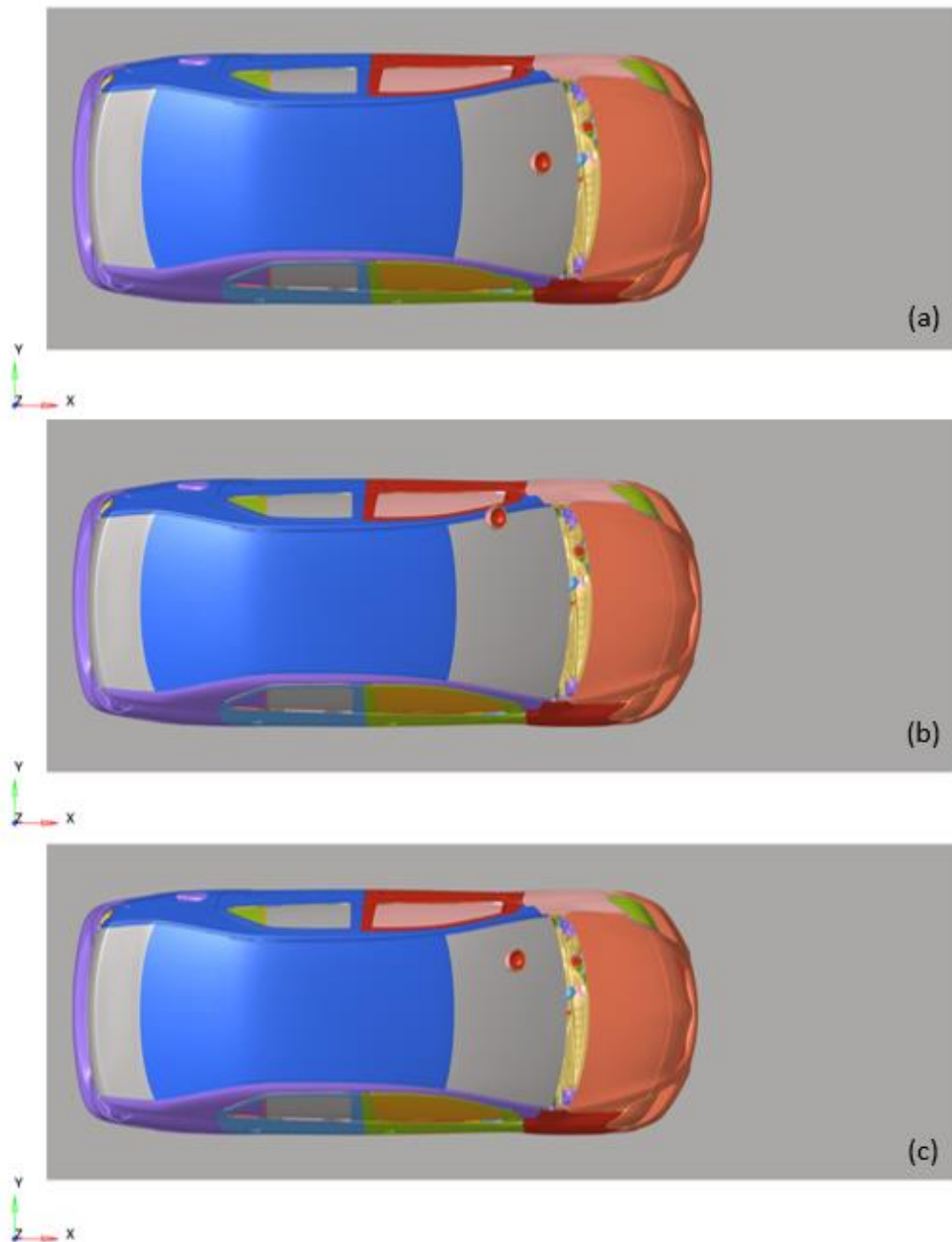


Figura 53. Posizionamento reciproco tra impattore testa e Toyota Yaris

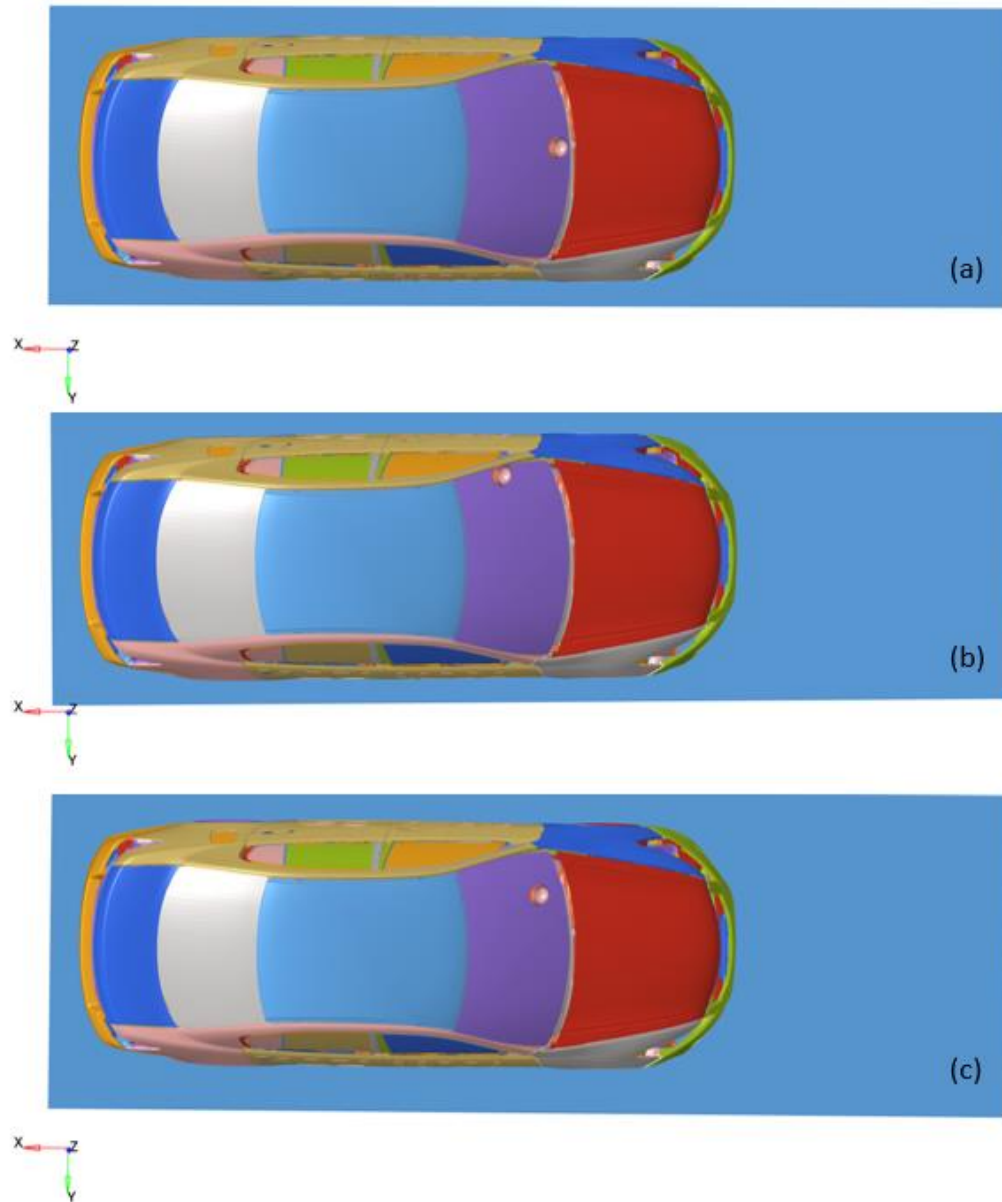


Figura 54. Posizionamento reciproco tra impattore testa e Honda Accord

6. Analisi dei risultati

In figura 55, 56 e 57 sono riportati frame catturati ogni 30 ms dell'impatto tra THUMS e Toyota Yaris mentre in figura 58, 59 e 60 è rappresentata la collisione ogni 30 ms tra THUMS e Honda Accord, ad eccezione dell'ultimo frame della figura 60 pari a 170 ms, istante di tempo in cui la testa impatta il montante anteriore dell'autovettura. Queste simulazioni hanno avuto una durata di 200 ms, eccetto quella riguardante il veicolo Honda Accord con il THUMS caso 2 che si è interrotta 25 ms dopo l'impatto, i risultati sono comunque significativi per le analisi da effettuare.

La durata delle simulazioni riguardanti l'impattore testa omologativo ed i veicoli è stata pari a 60 ms.

Nella fase di post-processing sono state utilizzate le seguenti unità di misura: tempo in secondi, lunghezza in millimetri, massa in tonnellate, forza in newton, stress/pressione in megapascal ed energia in newton millimetri.

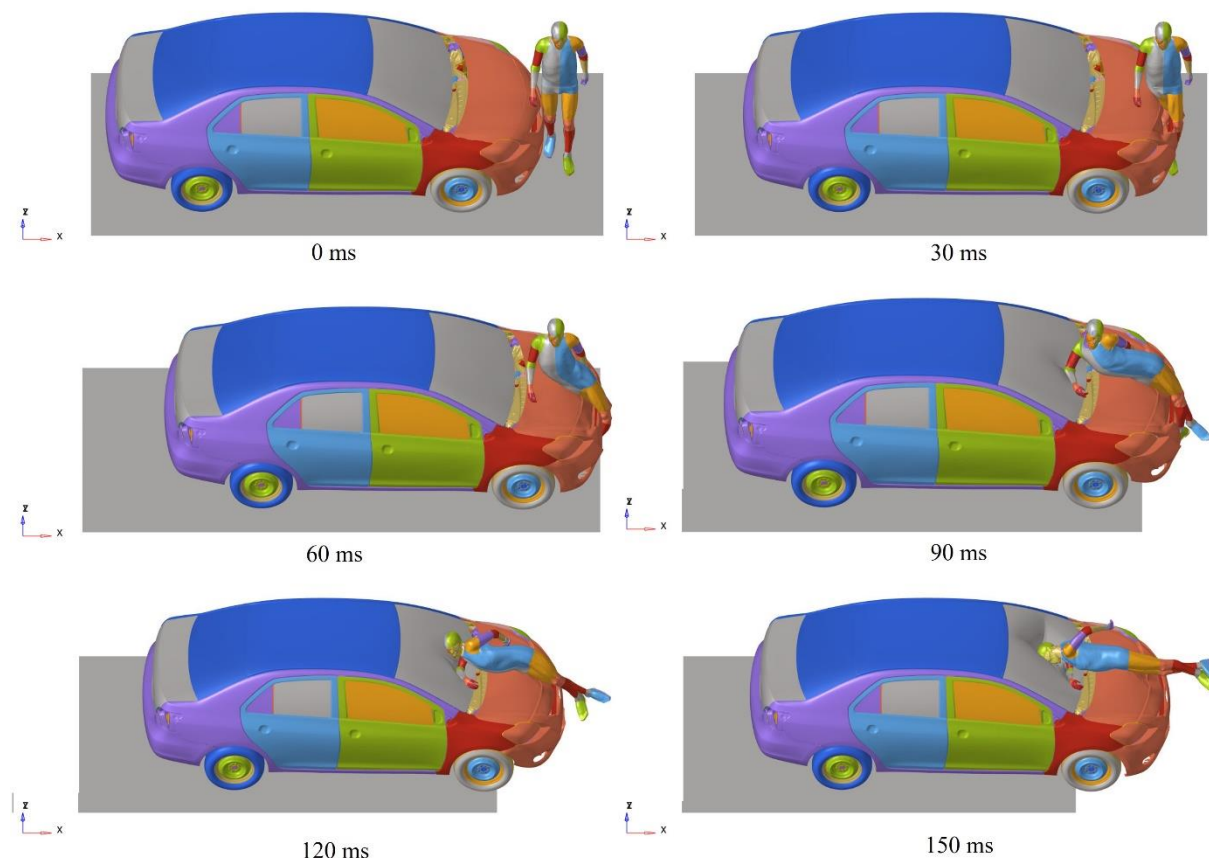


Figura 55. Cinematica del THUMS caso 1, urto con veicolo Toyota Yaris

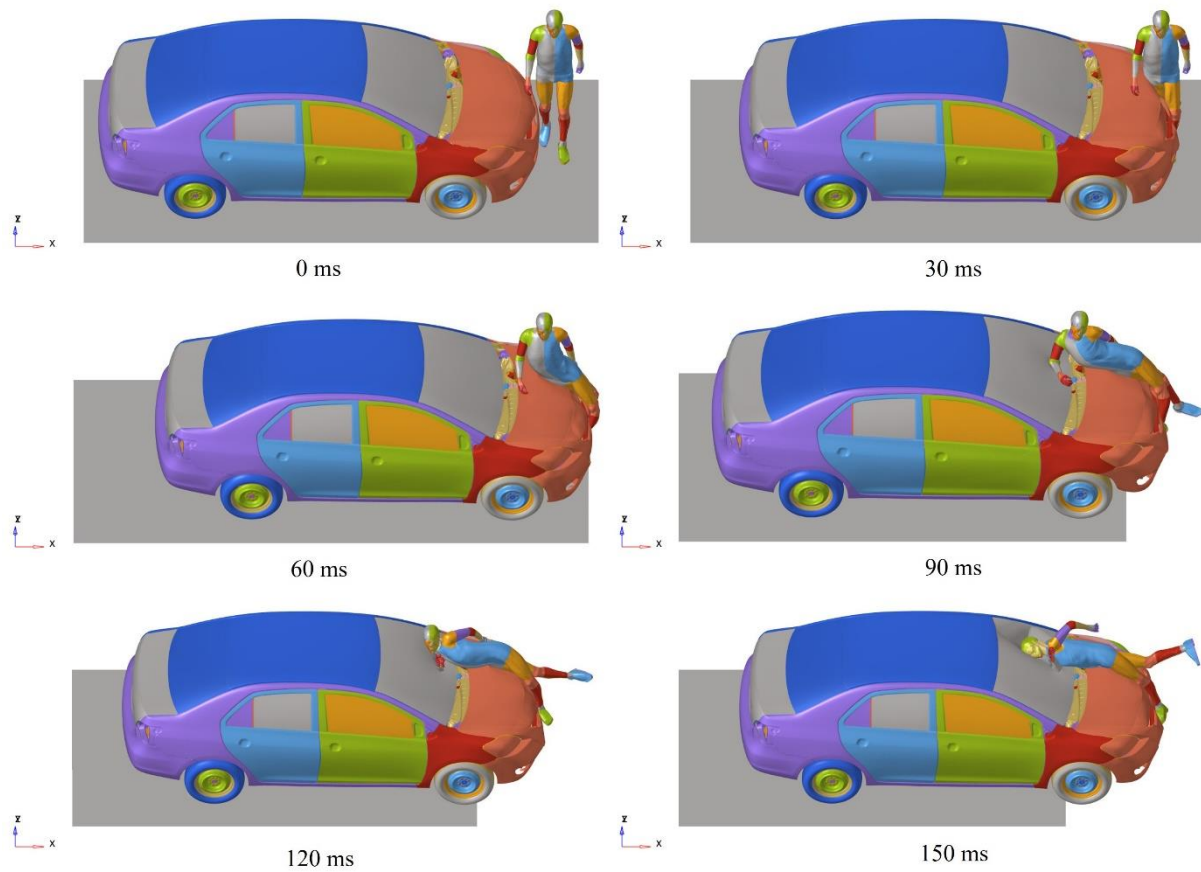


Figura 56. Cinematica del THUMS caso 2, urto con veicolo Toyota Yaris

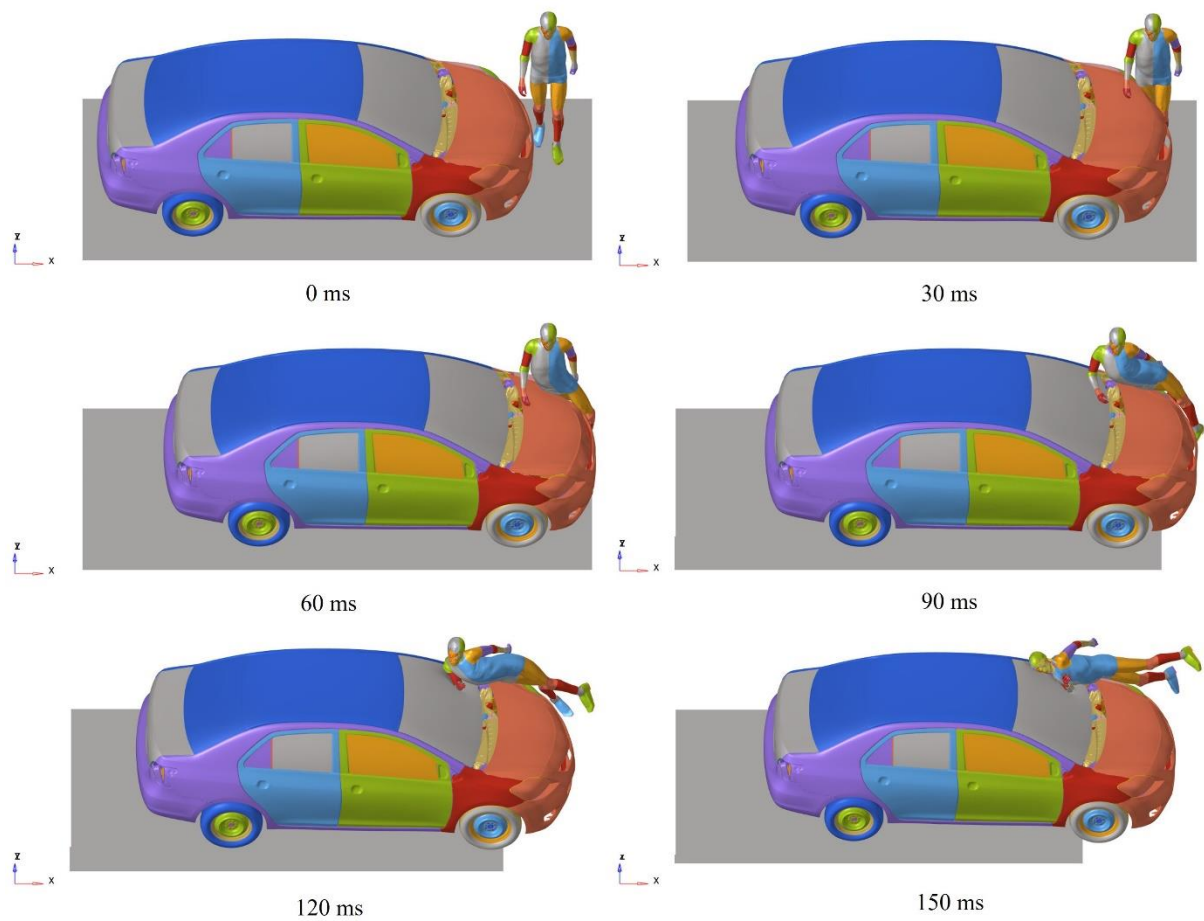


Figura 57. Cinematica del THUMS caso 3, urto con veicolo Toyota Yaris

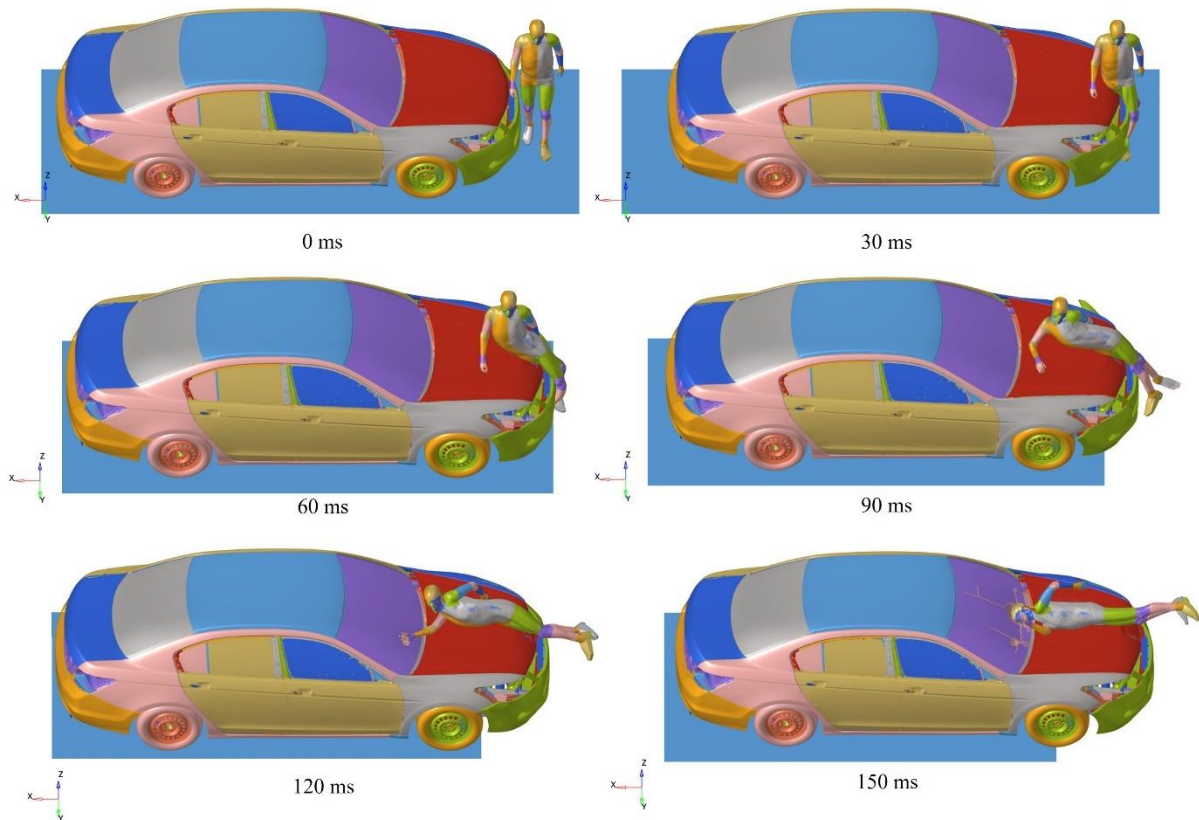


Figura 58. Cinematica del THUMS caso 1, urto con veicolo Honda Accord

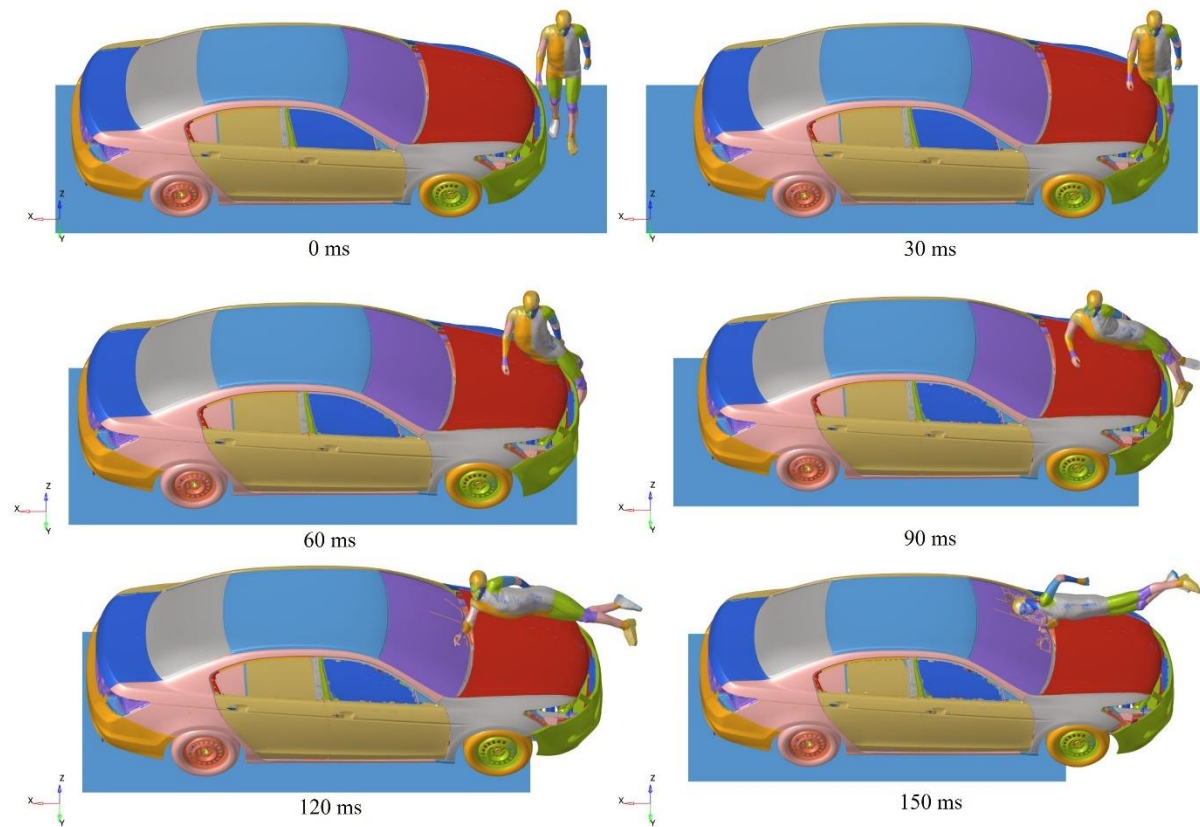


Figura 59. Cinematica del THUMS caso 2, urto con veicolo Honda Accord

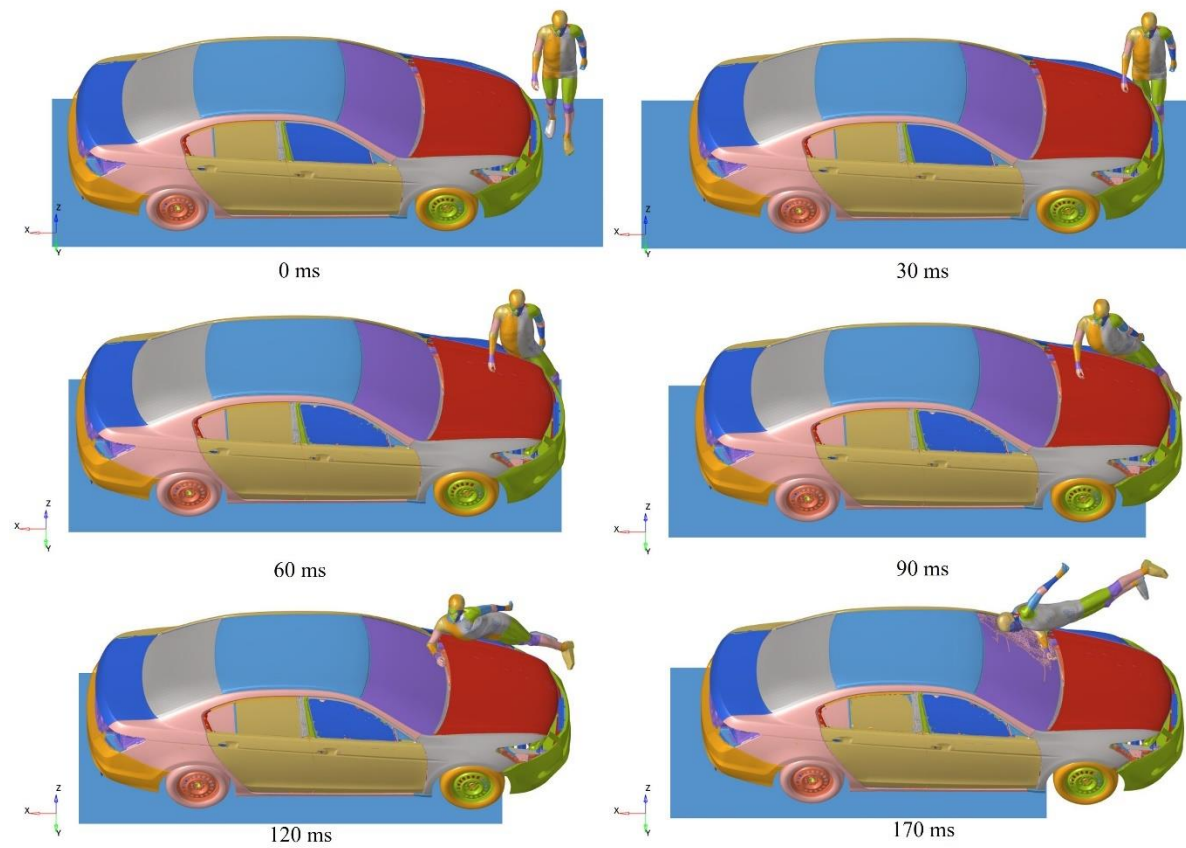


Figura 60. Cinematica del THUMS caso 3, urto con veicolo Honda Accord

6.1 Verifiche energetiche

Prima di valutare i risultati riguardo i criteri di lesione su testa sono state effettuate delle considerazioni energetiche per verificare la stabilità e la significatività della simulazione e, di conseguenza, la bontà dei risultati forniti dal solutore.

Il bilancio energetico deve essere soddisfatto per ogni time step dell'intera simulazione e può essere scritto nel modo seguente:

$$E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg} = E_{kin}^0 + E_{int}^0 + W_{ext} \quad (12)$$

Dove:

- E_{kin} è l'energia cinetica.
- E_{int} è l'energia interna.
- E_{si} è l'energia di contatto.
- E_{rw} è l'energia di corpo rigido.
- E_{damp} è l'energia di smorzamento.
- E_{hg} è l'energia di hourglass.
- E_{kin}^0 è l'energia cinetica all'istante iniziale.
- E_{int}^0 è l'energia interna all'istante iniziale.
- W_{ext} è il lavoro delle forze esterne.

La somma dei contributi di energia a sinistra del segno di uguale corrisponde all'energia totale (E_{tot}). In ogni simulazione l'energia totale deve essere costante e la sua variazione, rispetto a tale valore, deve essere inferiore al 5%.

Nelle seguenti figure sono riportati gli andamenti del bilancio energetico: energia totale, energia interna, energia cinetica, energia di hourglass, lavoro compiuto dalle forze esterne, che sono i contributi predominanti su cui è effettuata la verifica. In particolare, in figura 61 è riportato l'andamento riferito all'urto tra THUMS e Toyota Yaris, in figura 62 è mostrato l'andamento riferito all'urto tra THUMS e Honda Accord, in figura 63 è descritto l'andamento riferito all'urto tra impattore testa e Toyota Yaris mentre in figura 64 l'andamento è riferito all'urto tra impattore testa e Honda Accord. Poiché i valori di energia sono analoghi in tutti e tre gli scenari di collisione (caso 1, caso 2 e caso 3) è riportato un solo grafico per casistica.

In figura 61 e 62 si nota che l'energia totale (in arancione) è costante ed è pari alla somma dell'energia cinetica iniziale e dell'energia interna iniziale, in quanto, il lavoro compiuto dalle forze esterne (external_work) applicate al sistema è nullo. Ad esempio, considerando i valori del grafico di figura 61, l'energia interna iniziale (E_{int}^0) è nulla mentre l'energia cinetica

iniziale (E_{kin}^0) è pari a $8 \cdot 10^7$ N mm pari al valore di energia totale (E_{tot}^0).

Affinché i risultati rispecchino la fisica del sistema, trattandosi di un urto anelastico, l'energia cinetica (in viola in figura) non si conserva ma viene convertita in energia interna (in verde in figura), dovuta all'assorbimento di energia causa delle deformazioni dei vari componenti, tra cui anche il THUMS. L'energia di hourglass (in rosso in figura) è un'energia computazionale dovuta al fenomeno dell'hourglass che dovrebbe assumere un valore basso e, nelle simulazioni in questione, assume valori prossimi a zero. Il fenomeno è ridotto nel tempo e non si arriva ad un completo arresto del veicolo e del manichino che comporterebbe un'energia cinetica che si annulla e la somma delle altre energie pari all'energia totale.

Dei risultati analoghi si riscontrano nelle simulazioni dell'impattore testa omologativo con i due veicoli (figura 63 e figura 64), con la differenza che, in questo caso, è stata applicata una velocità e proprietà inerziali all'impattore testa da cui deriva il lavoro compiuto dalle forze esterne (external_work in blu in figura).

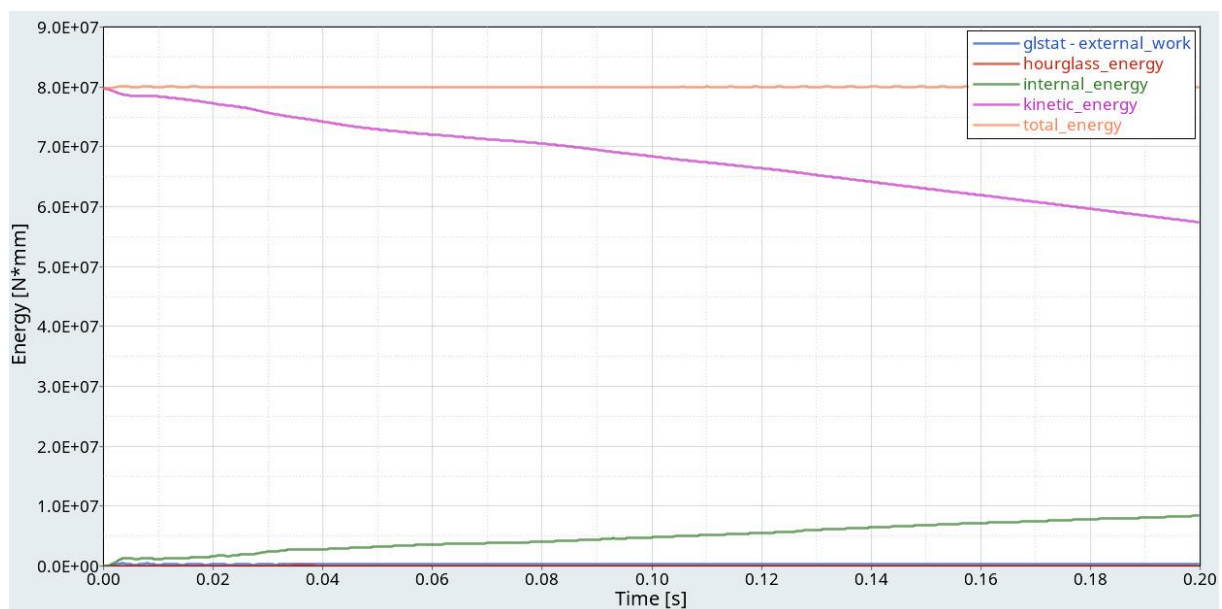


Figura 61. Andamento bilancio energetico, urto THUMS e Toyota Yaris

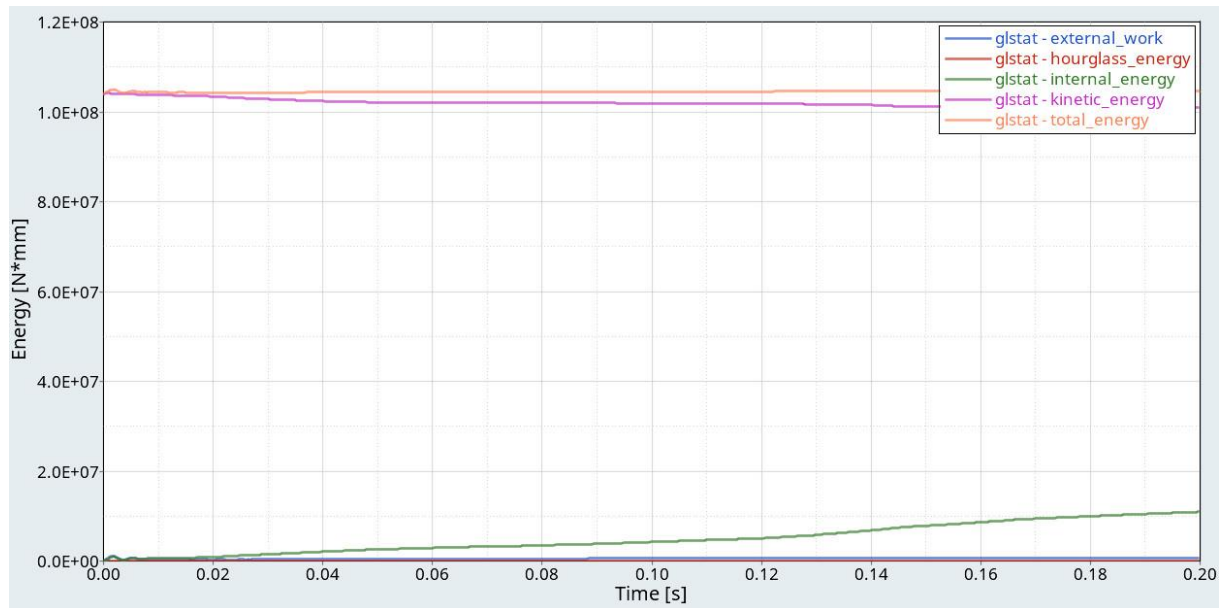


Figura 62. Andamento bilancio energetico, urto THUMS e Honda Accord

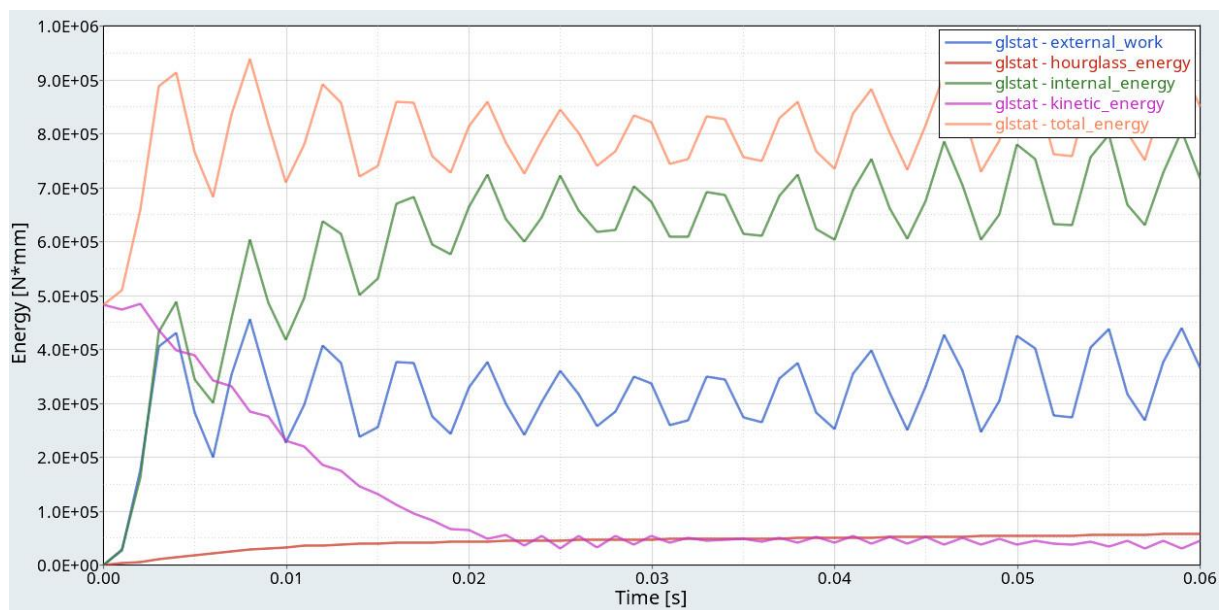


Figura 63. Andamento bilancio energetico, urto impattore testa e Toyota Yaris

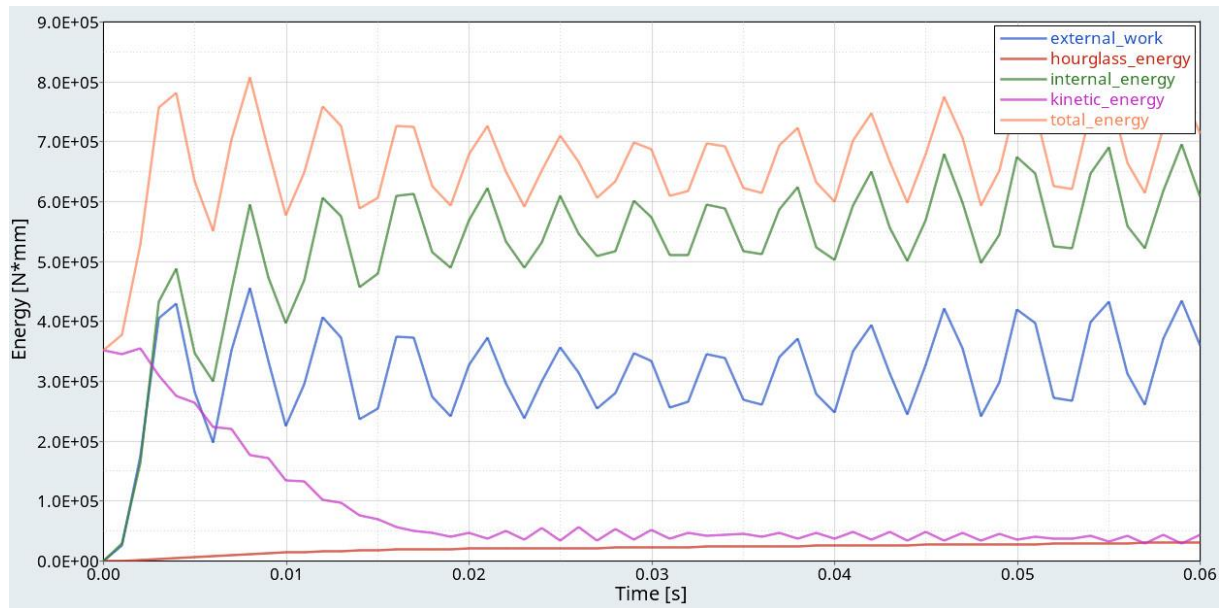


Figura 64. Andamento bilancio energetico, urto impattore testa e Honda Accord

Altro parametro importante da valutare nell'analisi delle energie è il rapporto energetico, definito come segue:

$$e_{ratio} = \frac{E_{tot}}{E_{tot}^0 + W_{ext}} \quad (13)$$

Dove:

- E_{tot} è l'energia totale.
- E_{tot}^0 è l'energia totale iniziale.
- W_{ext} è il lavoro compiuto dalle forze esterne.

Per definire un bilancio energetico perfetto bisogna che l'energia totale uguagli la somma tra l'energia totale iniziale ed il lavoro compiuto dalle forze esterne, questo implica che il rapporto assuma un valore più prossimo possibile all'unità. Questa condizione è rispettata dalle simulazioni come è possibile riscontrare dalle figure 65, 66, 67 e 68.

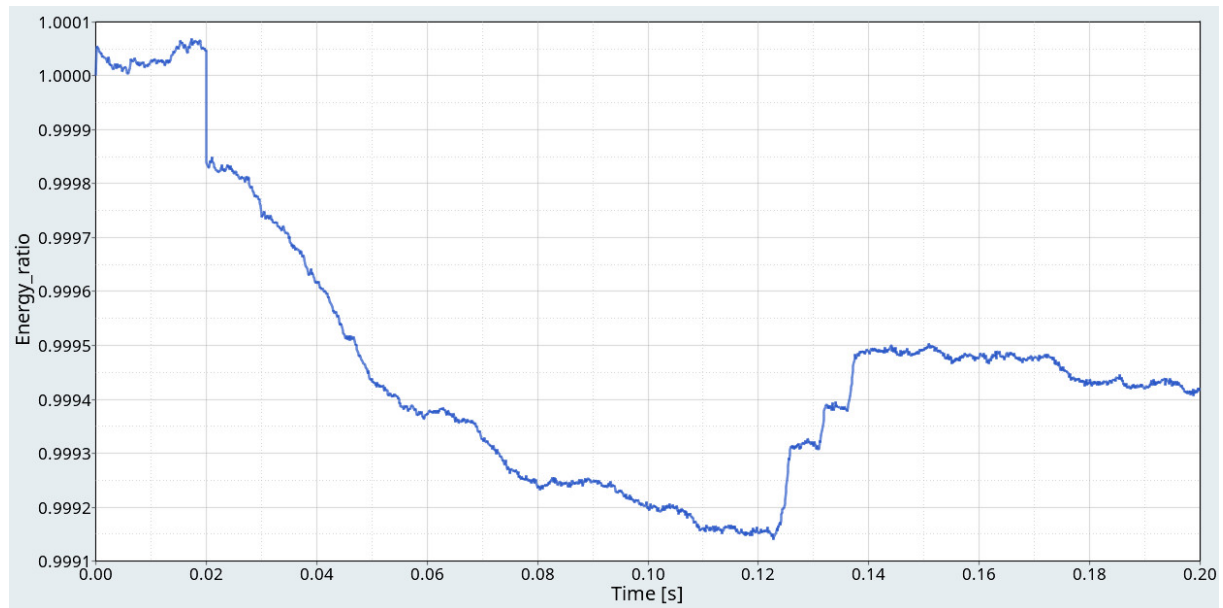


Figura 65. Andamento rapporto energetico, urto THUMS e Toyota Yaris

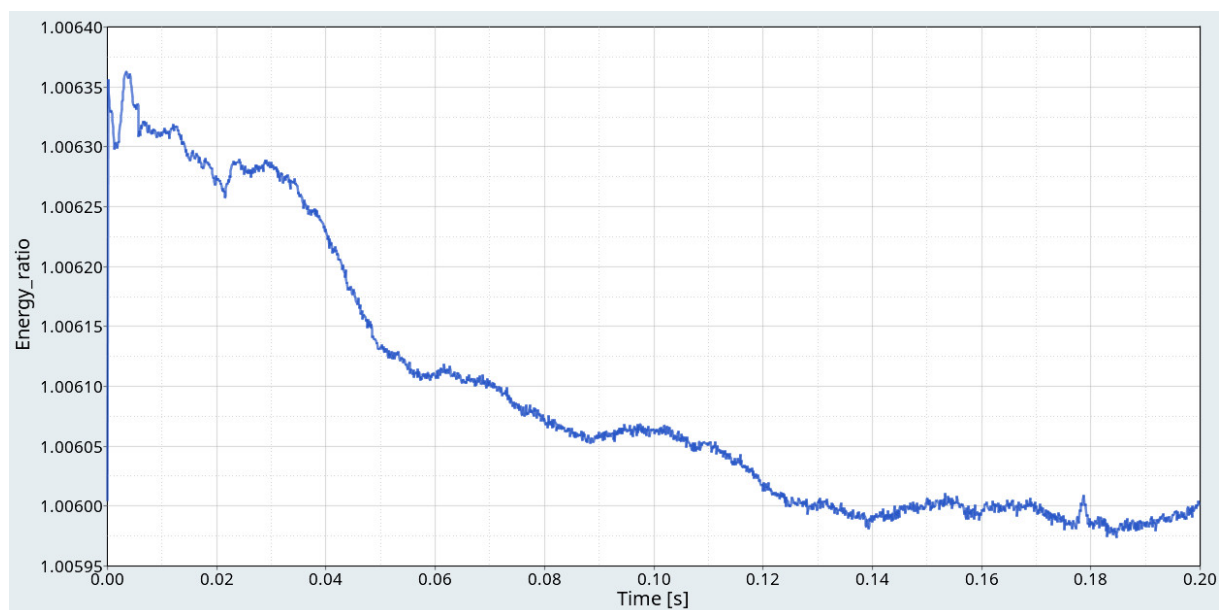


Figura 66. Andamento rapporto energetico, urto THUMS e Honda Accord

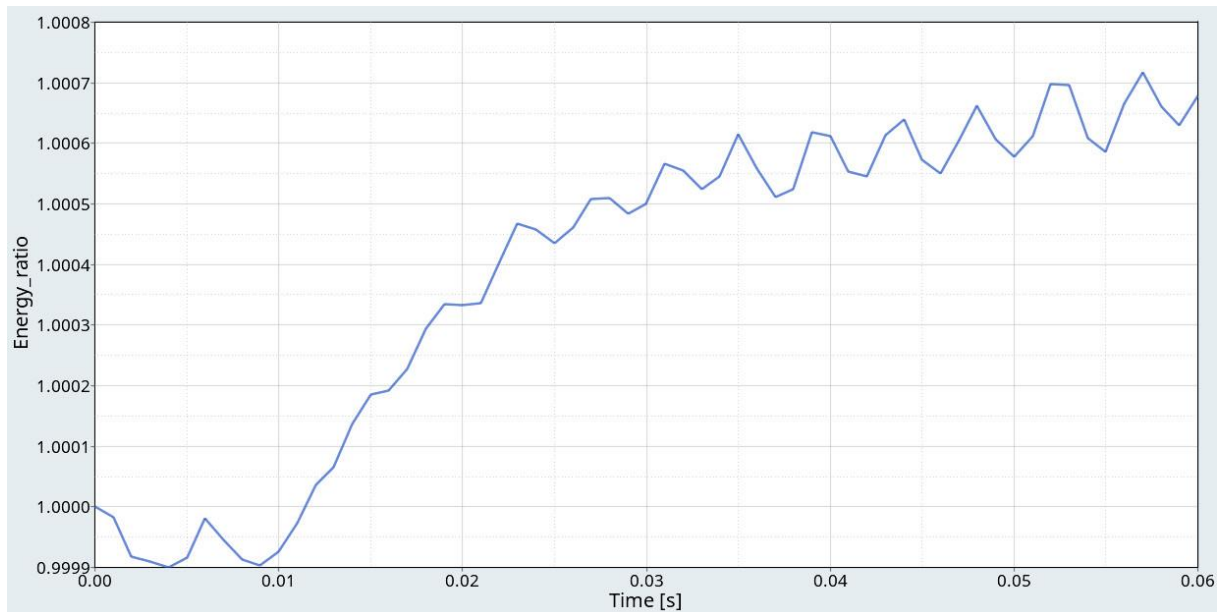


Figura 67. Andamento rapporto energetico, urto impattore testa e Toyota Yaris

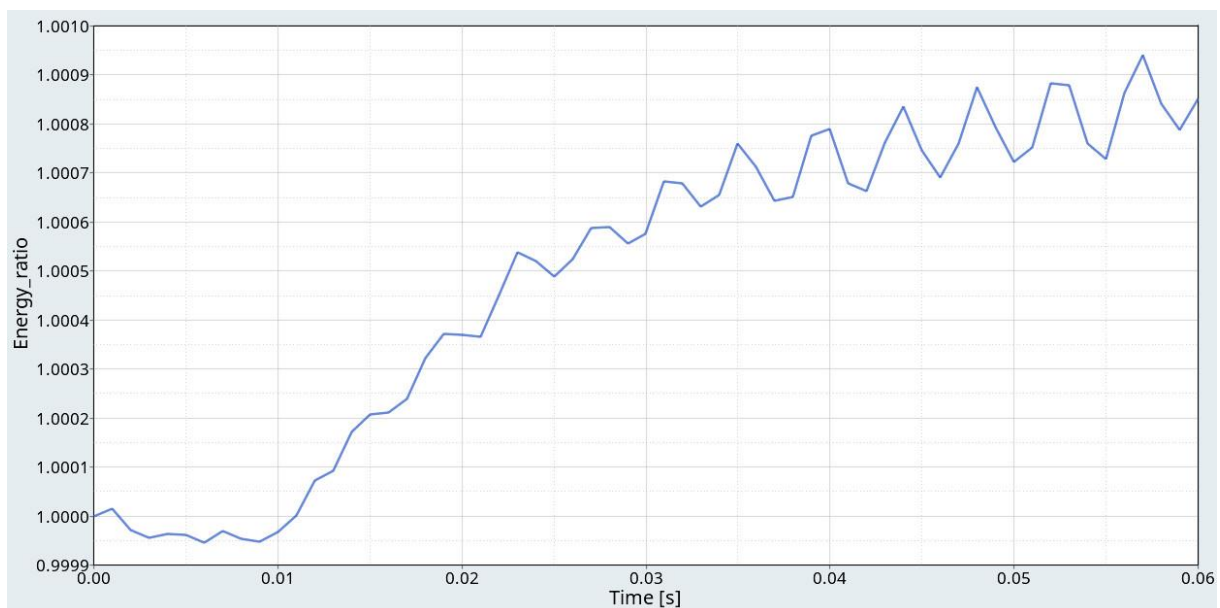


Figura 68. Andamento rapporto energetico, urto impattore testa e Honda Accord

È stato valutato anche il parametro di massa aggiunta dal software (added_mass).

Nel caso delle simulazioni con il modello THUMS ed il veicolo Toyota Yaris (figura 69), di massa totale pari a 1,33 t, è stata aggiunta una massa di 316 g, nel caso del veicolo Honda Accord (figura 70), di massa pari a 1,75 t, la massa aggiunta è pari a 10,9 kg.

Nel caso delle simulazioni con l'impattore testa: con il veicolo Toyota Yaris (figura 71), di massa totale 1,26 t è stata aggiunta una massa pari a 12,3 kg mentre nel caso del veicolo Honda Accord (figura 72) con massa totale pari a 1,68 t, la massa aggiunta risulta pari a 14,6 kg.

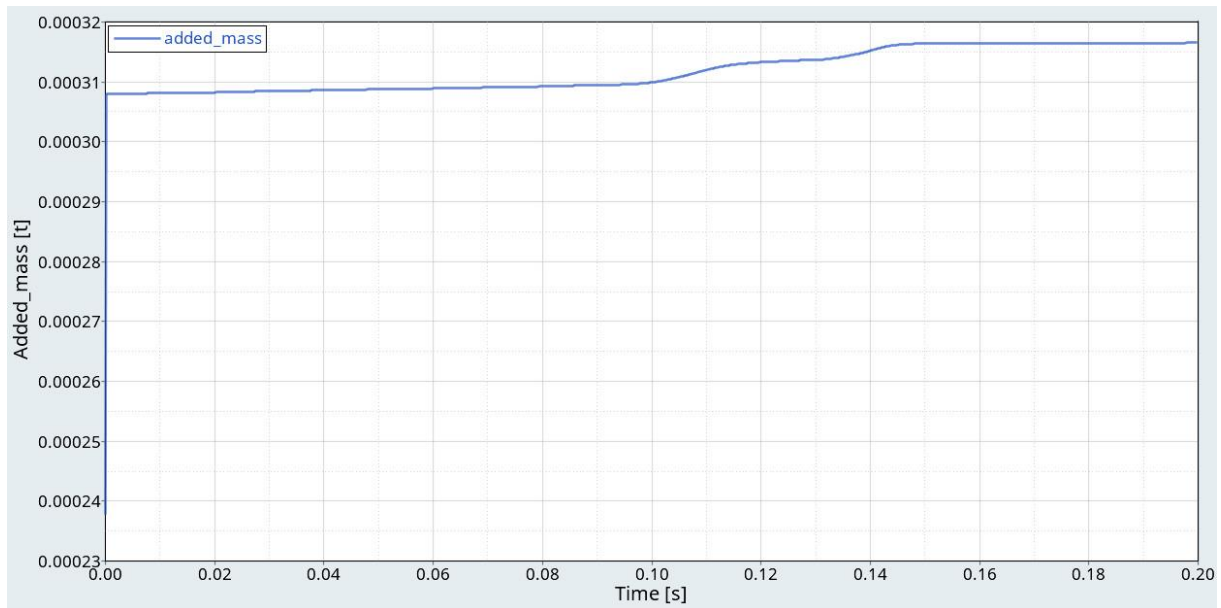


Figura 69. Andamento massa aggiunta, urto THUMS e Toyota Yaris

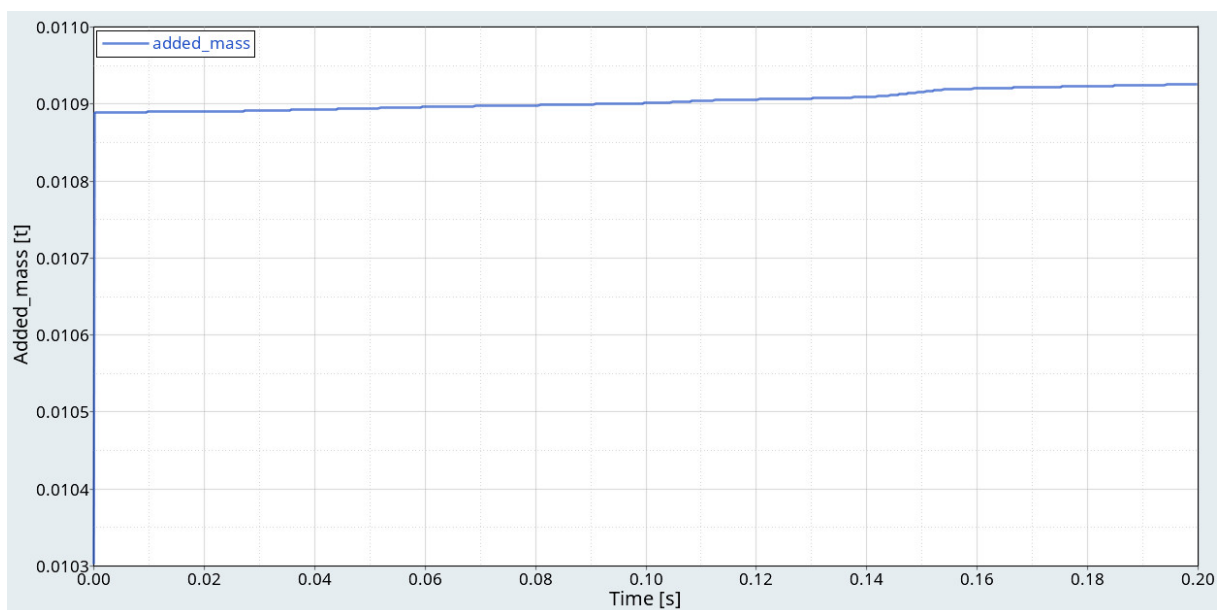


Figura 70. Andamento massa aggiunta, urto THUMS e Honda Accord

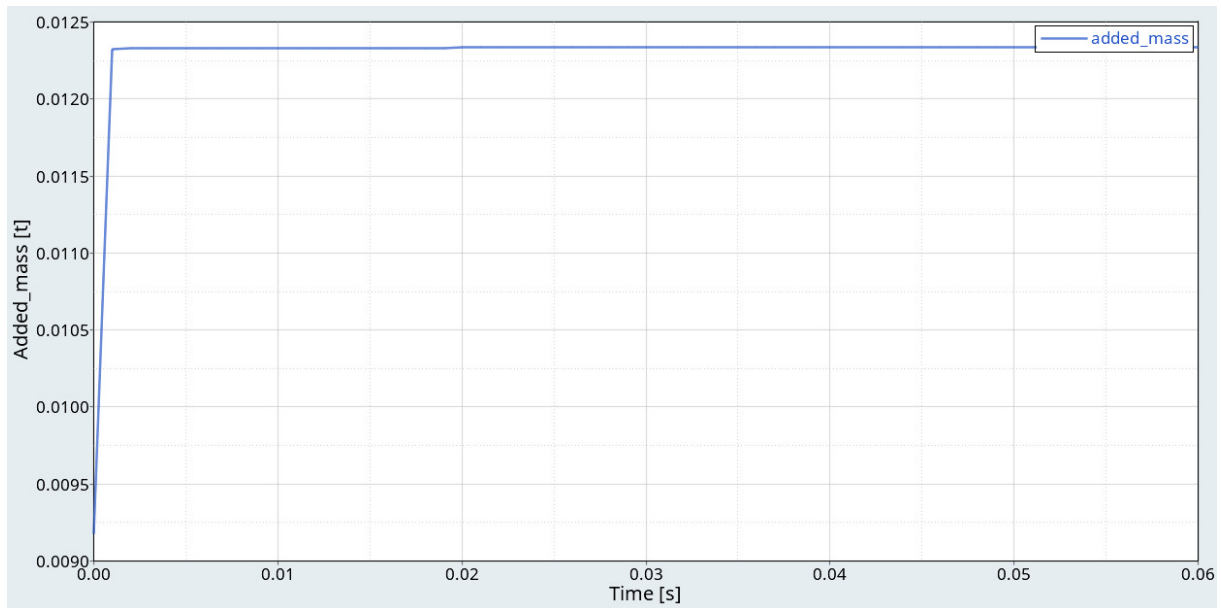


Figura 71. Andamento massa aggiunta, urto impattore testa e Toyota Yaris

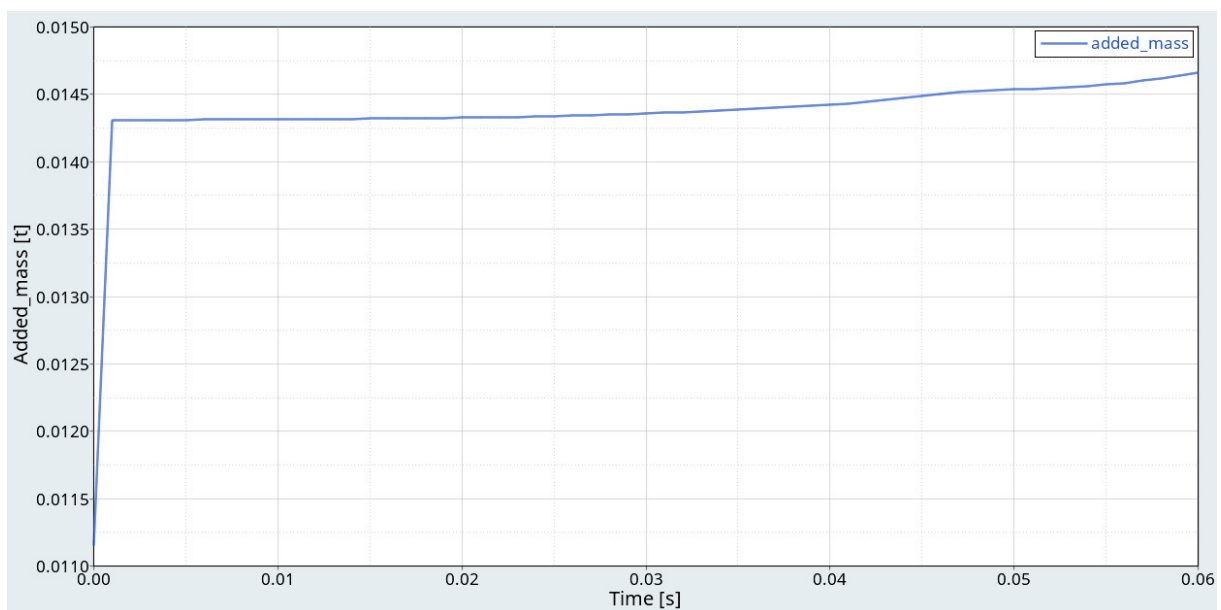


Figura 72. Andamento massa aggiunta, urto impattore testa e Honda Accord

Le simulazioni effettuate soddisfano i criteri di significatività e di fisicità del sistema, si è quindi passati ad analizzare i criteri di lesione su testa.

6.2 Analisi dei criteri di lesione su testa

Nelle figure seguenti sono riportati, per ogni scenario di collisione (caso 1, caso 2 e caso 3), l'accelerazione risultante e le componenti lungo X, Y e Z della velocità angolare da cui sono stati calcolati i criteri di lesione su testa, con riferimento alle formule riportate nel paragrafo 1.2.2.3 per ogni urto simulato rispettivamente nel seguente ordine: THUMS contro veicolo, impattore testa con condizioni di velocità secondo il protocollo Euro NCAP contro veicolo (**primo urto**) ed impattore testa con condizioni iniziali uguali al THUMS contro veicolo (**secondo urto**).

Per mostrare accuratamente il comportamento delle velocità angolari in figura 76, 78, 80, 82, 84 e 86 l'intervallo di tempo è stato ridotto da 0 ms - 200 ms a 40 ms - 180 ms.

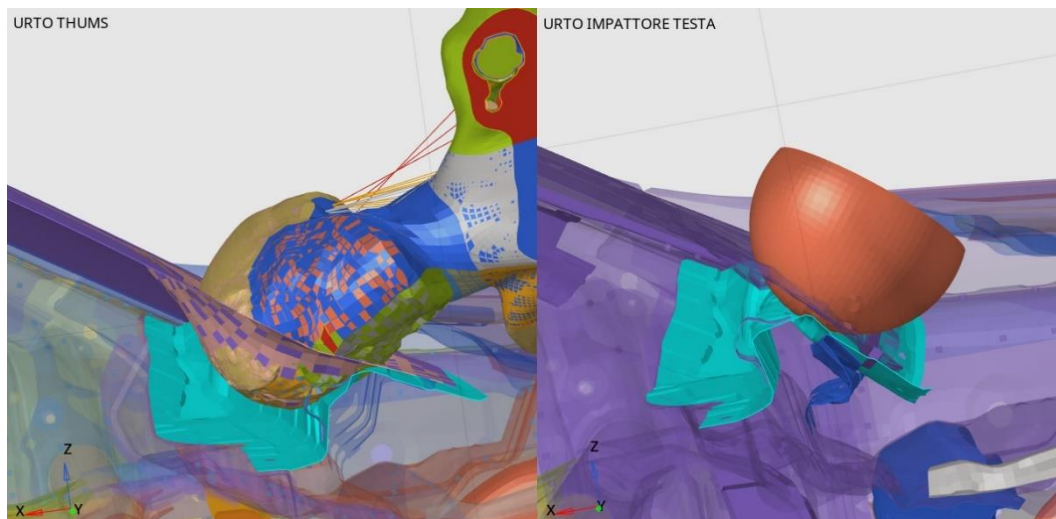


Figura 73. Confronto THUMS (sinistra) vs impattore (destra), caso 1 Honda Accord

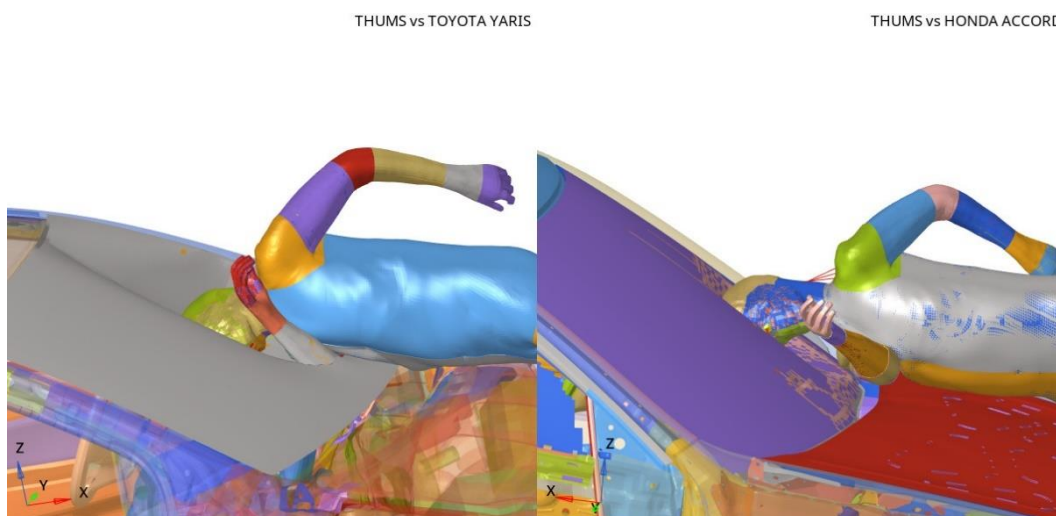


Figura 74. Confronto THUMS contro Toyota Yaris (sinistra) e Honda Accord (destra), caso 2

Caso 1

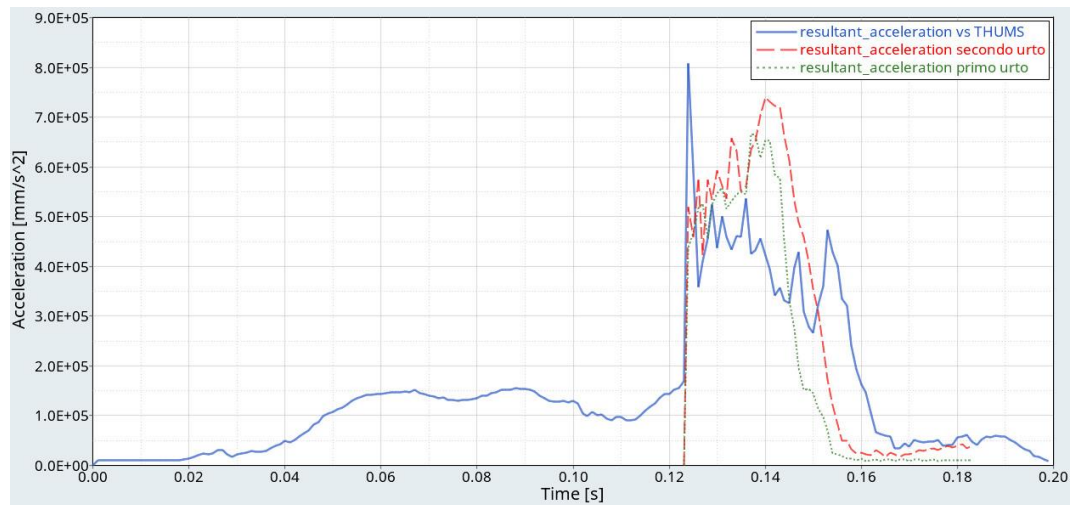


Figura 75. Andamento accelerazioni risultanti, Toyota Yaris

I valori di HIC calcolati risultano:

- *vs THUMS*: tra 123 ms e 137 ms pari a 236.
- *Primo urto*: tra 7 ms e 22 ms pari a 563.
- *Secondo urto*: tra 6 ms e 21 ms pari a 471.

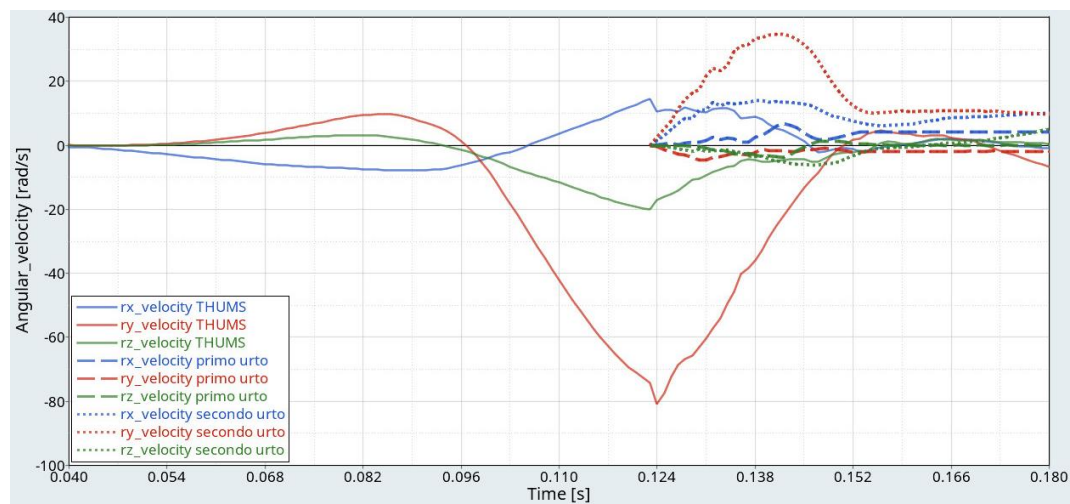


Figura 76. Andamento velocità angolari, Toyota Yaris

I valori di BrIC calcolati risultano:

- *Vs THUMS*: pari a 1,523.
- *Primo urto*: pari a 0,157.
- *Secondo urto*: pari a 0,667.

Caso 2

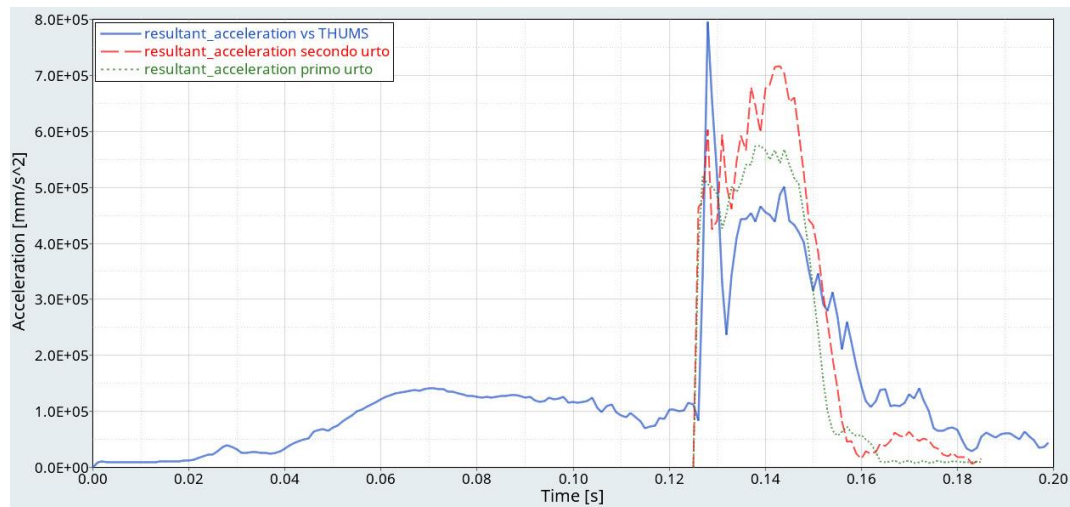


Figura 77. Andamento accelerazioni risultanti, Toyota Yaris

I valori di HIC calcolati risultano:

- *vs THUMS*: tra 127 ms e 141 ms pari a 207.
- *Primo urto*: tra 8 ms e 23 ms pari a 418.
- *Secondo urto*: tra 8 ms e 23 ms pari a 549.

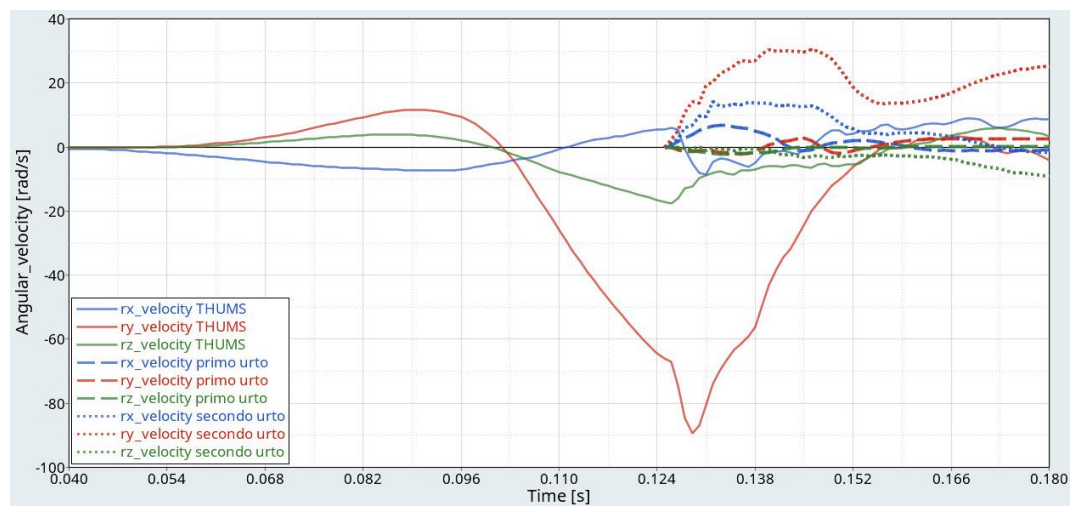


Figura 78. Andamento velocità angolari, Toyota Yaris

I valori di BrIC calcolati risultano:

- *Vs THUMS*: pari a 1,641.
- *Primo urto*: pari a 0,125.
- *Secondo urto*: pari a 0,619.

Caso 3

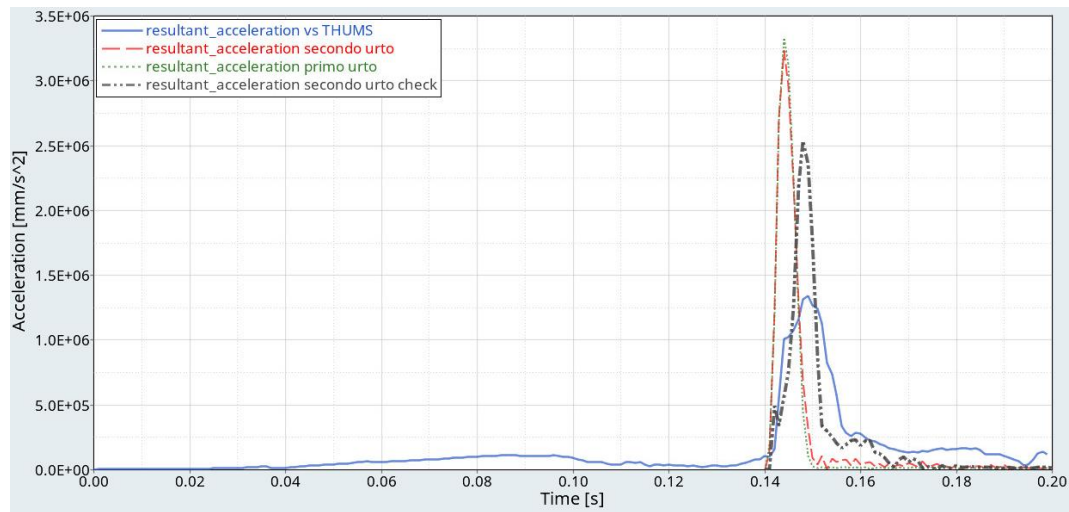


Figura 79. Andamento accelerazioni risultanti, Toyota Yaris

I valori di HIC calcolati risultano:

- *vs THUMS*: tra 143 ms e 155 ms pari a 1450.
- *Primo urto*: tra 2 ms e 7 ms pari a 4164.
- *Secondo urto*: tra 2 ms e 7 ms pari a 4005.
- *Secondo urto check*: tra 6 ms e 11 ms pari a 2370.

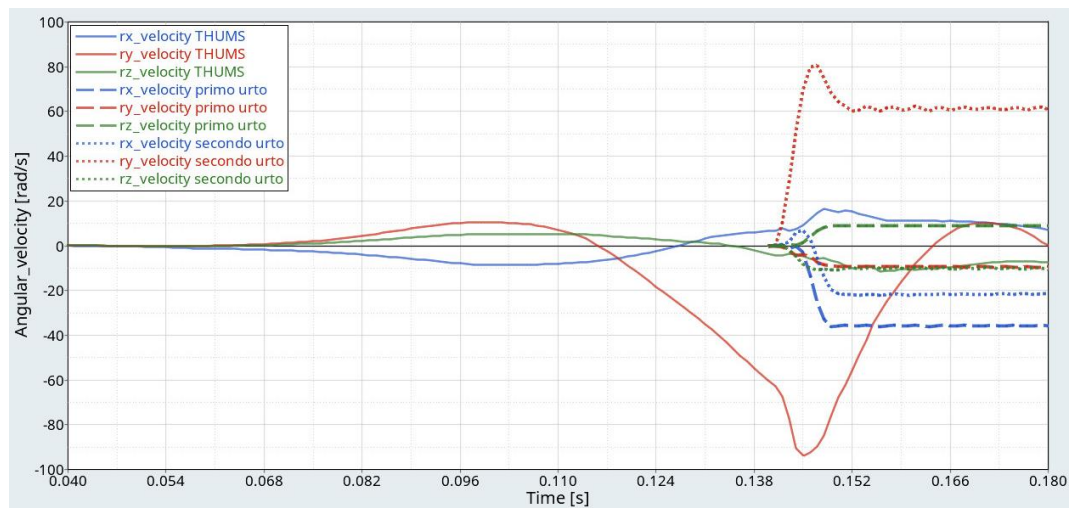


Figura 80. Andamento velocità angolari, Toyota Yaris

I valori di BrIC calcolati risultano:

- *Vs THUMS*: pari a 1,701.
- *Primo urto*: pari a 0,609.
- *Secondo urto*: pari a 1,488.

Caso 1

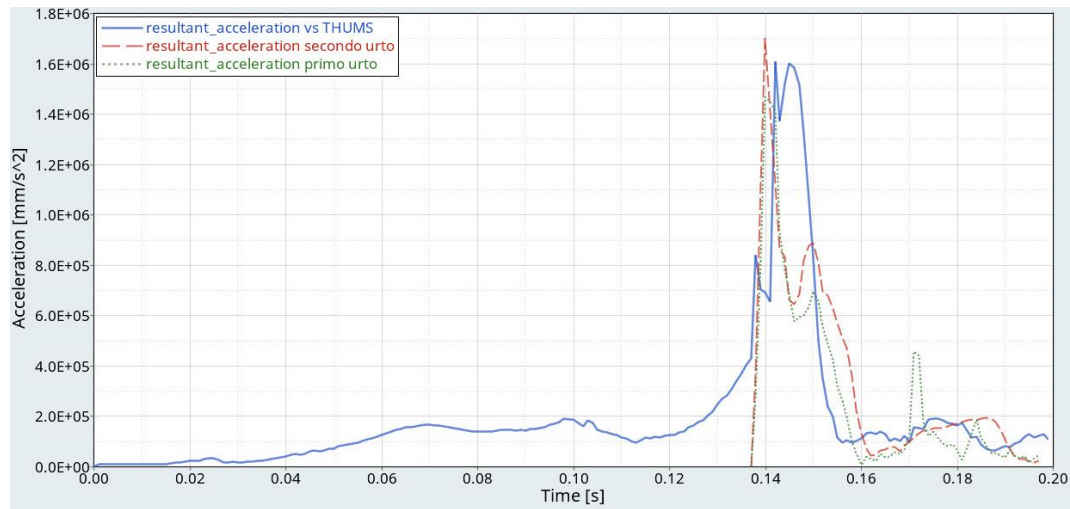


Figura 81. Andamento accelerazioni risultanti, Honda Accord

I valori di HIC calcolati risultano:

- *vs THUMS*: tra 141 ms e 150 ms pari a 2081.
- *Primo urto*: tra 1 ms e 16 ms pari a 885.
- *Secondo urto*: tra 1 ms e 16 ms pari a 1110.

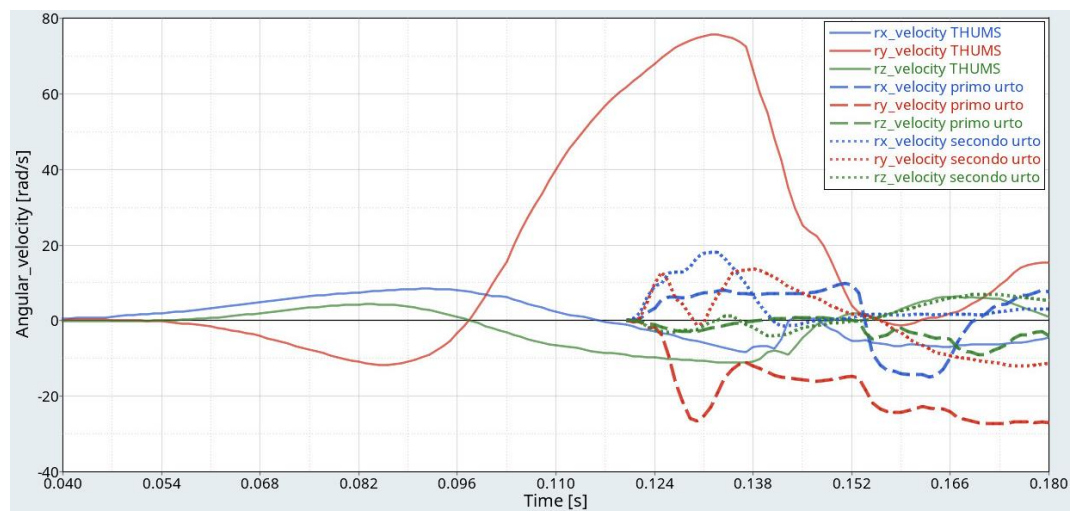


Figura 82. Andamento velocità angolari, Honda Accord

I valori di BrIC calcolati risultano:

- *Vs THUMS*: pari a 1,371.
- *Primo urto*: pari a 0,402.
- *Secondo urto*: pari a 0,574.

Caso 2

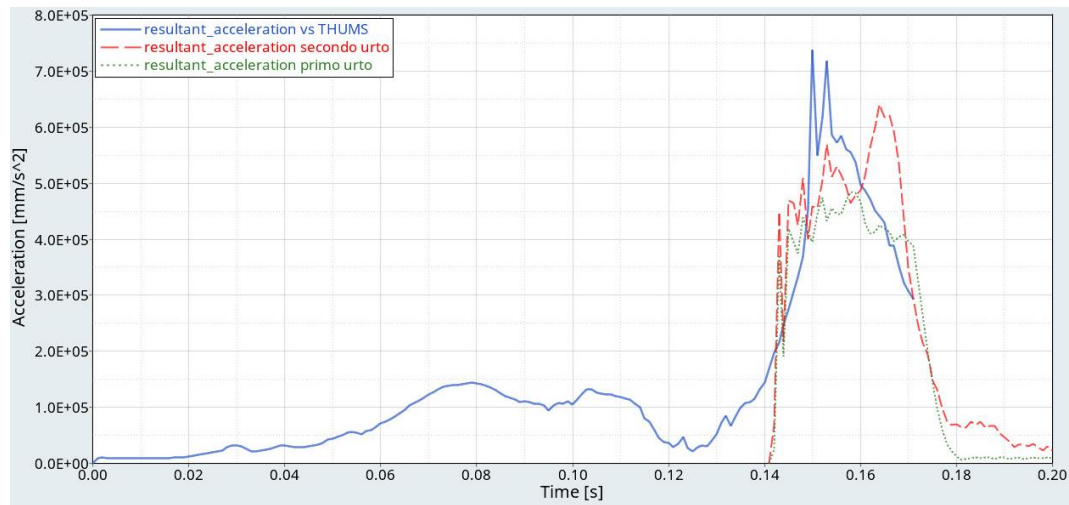


Figura 83. Andamento accelerazioni risultanti, Honda Accord

I valori di HIC calcolati risultano:

- *vs THUMS*: tra 149 ms e 164 ms pari a 367.
- *Primo urto*: tra 9 ms e 24 ms pari a 324.
- *Secondo urto*: tra 12 ms e 27 ms pari a 428.

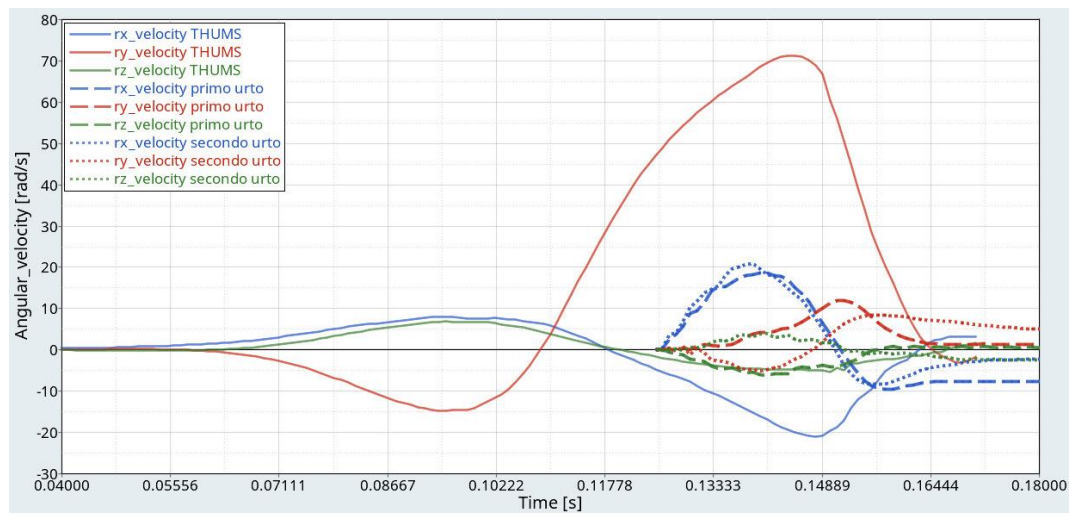


Figura 84. Andamento velocità angolari, Honda Accord

I valori di BrIC calcolati risultano:

- *Vs THUMS*: pari a 1,312.
- *Primo urto*: pari a 0,363.
- *Secondo urto*: pari a 0,381.

Caso 3

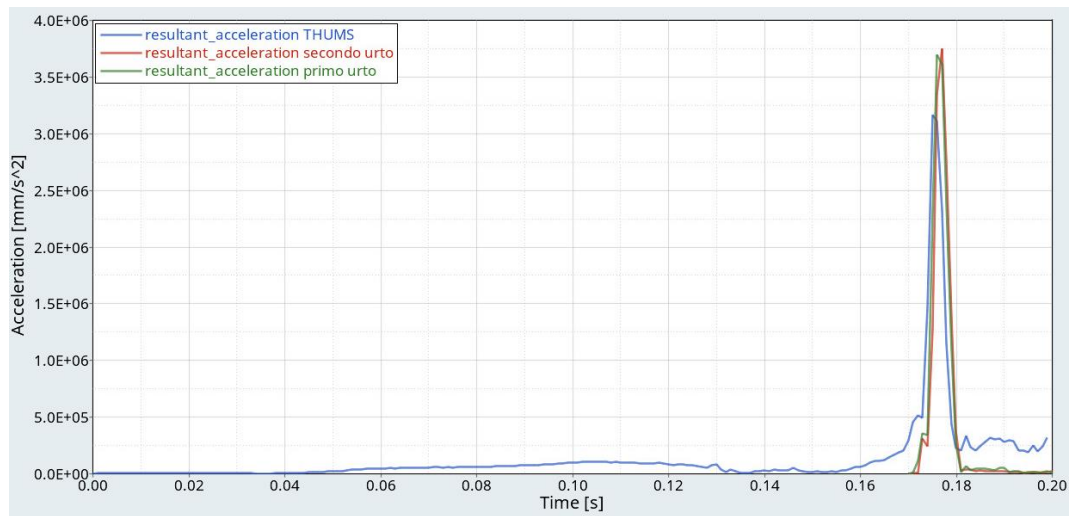


Figura 85. Andamento accelerazioni risultanti, Honda Accord

I valori di HIC calcolati risultano:

- *vs THUMS*: tra 174 ms e 178 ms pari a 4057.
- *Primo urto*: tra 5 ms e 8 ms pari a 4562.
- *Secondo urto*: tra 5 ms e 9 ms pari a 4308.

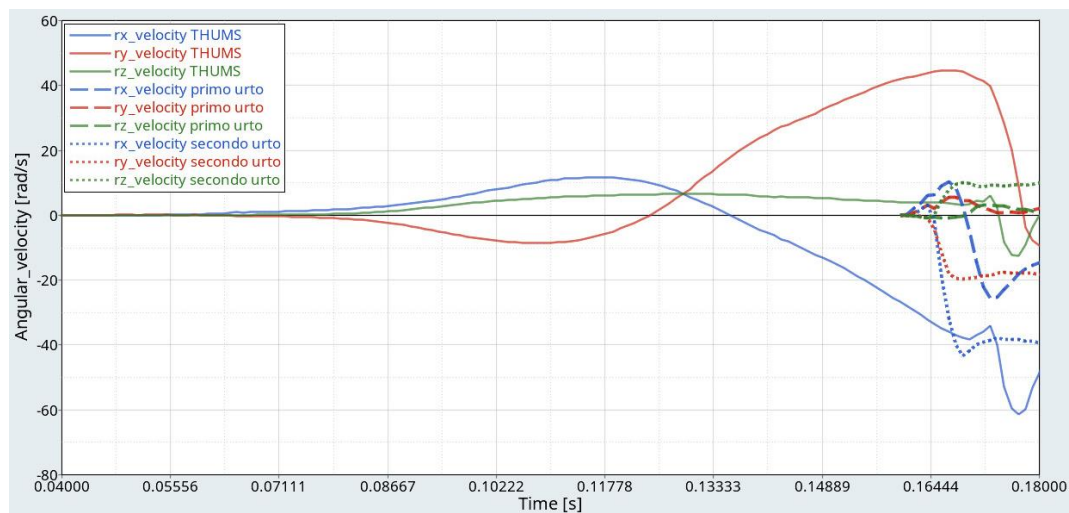


Figura 86. Andamento velocità angolari, Honda Accord

I valori di BrIC calcolati risultano:

- *Vs THUMS*: pari a 1,271.
- *Primo urto*: pari a 0,415.
- *Secondo urto*: pari a 0,778.

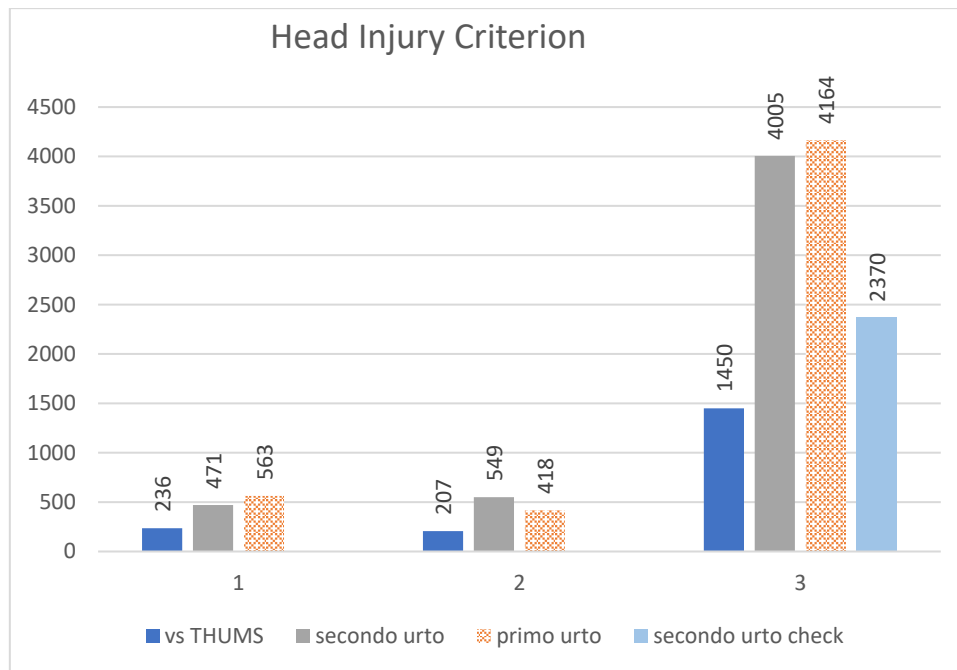


Figura 87. Confronto dei valori di HIC, veicolo Toyota Yaris

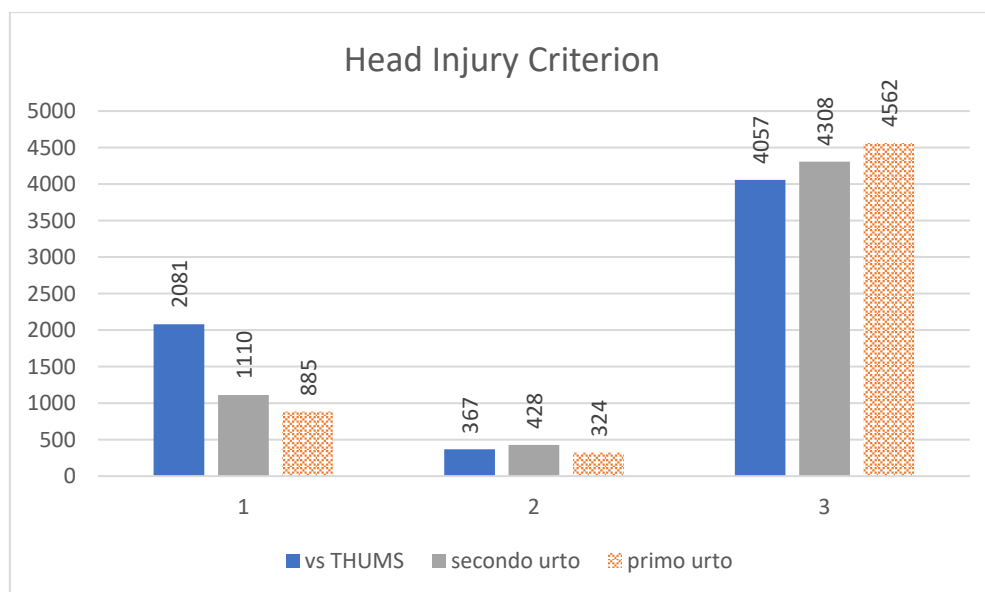


Figura 88. Confronto dei valori di HIC, veicolo Honda Accord

Dall'analisi dei risultati valori elevati di HIC si riscontrano nella zona del montante anteriore (caso 3), zona dove la rigidità è maggiore per tutti gli impatti simulati, mentre valori più bassi caratterizzano le altre due zone (caso 1 e caso 2), con impatti in corrispondenza del parabrezza. La tendenza del THUMS è di avere valori più bassi di HIC rispetto l'impattore testa in tutti gli scenari; si nota un'eccezione riguardo il caso 1 per l'Honda Accord (figura 87), dove la geometria del veicolo e la dinamica del THUMS fa sì che la sua testa vada ad impattare nella

zona specifica della vasca dei pesci³ che presenta una rigidità maggiore rispetto quella del parabrezza e dunque comporta valori di HIC più elevati. Questo fenomeno non è adeguatamente riproducibile con l'impattore testa che è stato posizionato nella posizione più vicina raggiungibile (come visibile in figura 73). Questo caso è stato escluso dalle valutazioni complessive di confronto.

I risultati del primo urto dell'impattore testa omologativo sono coerenti con i valori attesi in quanto, come descritto nel paragrafo 1.2.2.3, il protocollo Euro NCAP, nel dichiarare la protezione offerta dal veicolo nei punti di impatto della griglia, definisce la zona del parabrezza (caso 1 e caso 2) come zona verde, dunque, zona in cui l'HIC non deve assumere valore maggiore di 650 e la zona del montante anteriore (caso 3) zona rossa, dove il valore di HIC probabilmente è superiore a 1700.

In tutte le simulazioni si nota che il valore di HIC è sovrastimato dall'impattore testa. L'impattore testa presenta una rigidità maggiore rispetto al THUMS in quanto è costituito solo da un sottile strato di schiuma e, dunque, la decelerazione dell'impattore al momento dell'urto è elevata il che fa sì che l'HIC risulti elevato. Al contrario, il THUMS è costituito da strati di materiale comprimibili che si deformano assorbendo energia e causano un'accelerazione minore da cui un valore di HIC minore. Fenomeno diverso si verifica in corrispondenza del caso 1 per l'Honda Accord dove, il valore di HIC rilevato dal THUMS è maggiore. La motivazione è connessa alla dinamica dell'urto, il THUMS in seguito all'urto della testa ha un rimbalzo influenzato dai muscoli del collo ed anche dal torace che contribuisce con la sua inerzia facendo in modo che la testa ruoti e vada ad impattare la struttura rigida della vasca dei pesci in una zona dove l'impattore testa a causa della sua geometria non riesce a raggiungere.

Per quanto riguarda il caso 2 per le due vetture si osservano valori di HIC differenti dovuti alla geometria diversa dei veicoli che porta il THUMS ad impattare in punti della griglia a diversa Wrap Around Distance (WAD).

Nel caso 3 del veicolo Yaris il THUMS presenta un valore di molto inferiore rispetto agli impattori questo perché in seguito all'urto sul montante anteriore i muscoli del collo e del torace causano una rotazione della testa che va ad impattare sul parabrezza, molto meno rigido del montante anteriore con conseguente attenuazione del fenomeno. Questo non avviene per l'impattore che, dopo aver impattato il montante anteriore con una decelerazione significativa, rimbalza via. Dunque, per verificare se si riscontra la stessa tendenza evidenziata nei casi 1 e 2, è stata replicata la simulazione con l'impattore nel caso del secondo urto ("secondo urto check") spostando il punto di impatto nella zona che successivamente impatta la testa del THUMS. Come si può notare in figura 87, in questo modo, la tendenza è conservata anche nel caso 3.

Nel caso del veicolo Toyota Yaris, l'impattore testa presenta una sovrastima media di +145% circa rispetto al THUMS mentre nel caso del veicolo Honda Accord la sovrastima media è di circa il +9% (il caso 1 non è stato considerato significativo nel calcolo della sovrastima). La differenza della sovrastima è dovuta alla diversa geometria delle autovetture, nel caso della Toyota Yaris il THUMS in tutti i casi impatta dapprima con il braccio destro causando nei primi due casi la rottura del parabrezza che quindi al momento dell'impatto della testa presenta una

³ Termine tecnico usato nel campo automobilistico per indicare la zona tra il cofano e il parabrezza che è adibita al contenimento dei tergicristalli e delle determinate aperture che favoriscono all'interno dell'abitacolo il riciclo dell'aria.

minore rigidezza che comporta una stima di HIC minore. Nel caso 3 il braccio destro impatta sul montante anteriore influenzando la traiettoria della testa che successivamente impatta il parabrezza come precedentemente descritto. Nel caso del veicolo Honda Accord questo evento non avviene, nel caso 2 si nota che il braccio impatta sul cofano (figura 74), zona non significativa per la testa, mentre nel caso 3 il braccio impatta il parabrezza e non il montante anteriore, perciò, non influenza la dinamica della testa che impatta sul montante anteriore a cui non segue una rotazione sul parabrezza.

Le differenti velocità iniziali negli urti dell'impattore comportano lievi scostamenti del punto di impatto che quindi influiscono sulla dinamica a causa delle possibili differenze riguardo l'angolo che si forma tra la normale alla superficie urtata e la direzione della velocità risultante al momento dell'impatto e questo, quindi, genera i diversi valori di output.

Questo aspetto influisce anche sulle velocità angolari da cui è calcolato il parametro BrIC come si può notare dalle figure 89 e 90.

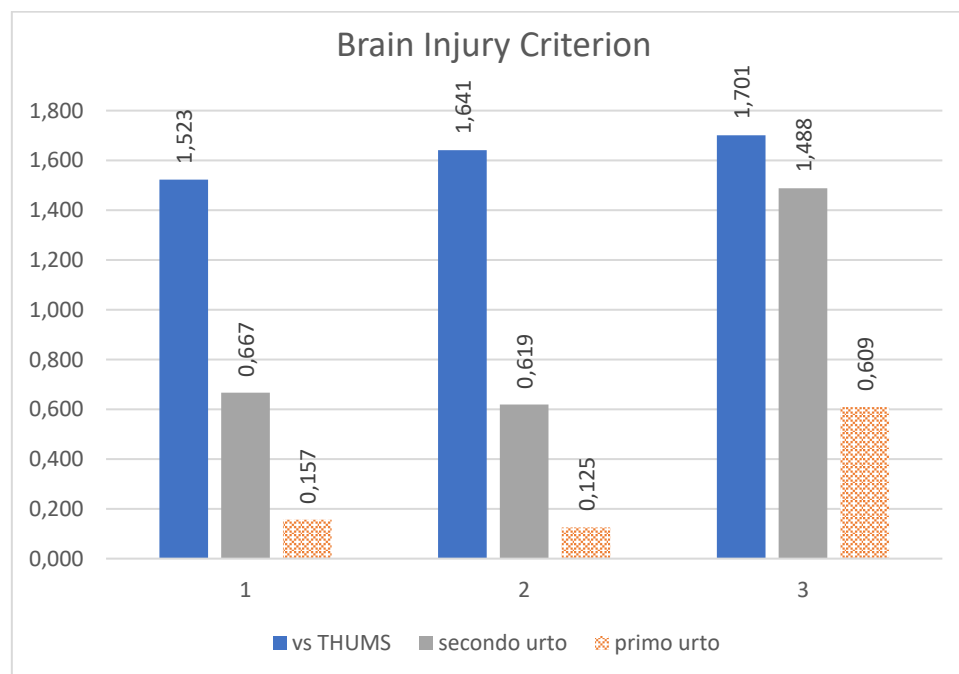


Figura 89. Confronto dei valori di BrIC, veicolo Toyota Yaris

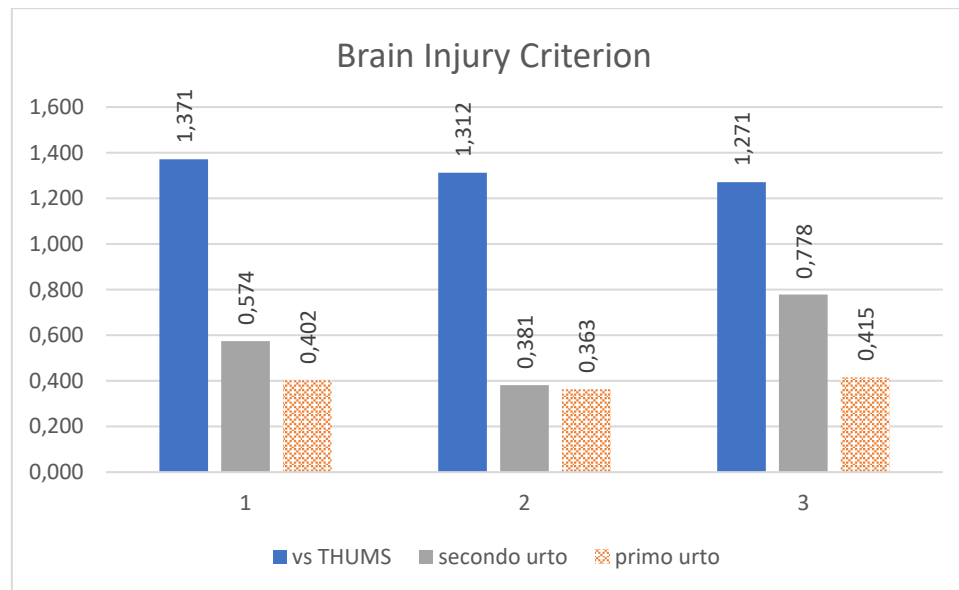


Figura 90. Confronto dei valori di BrIC, veicolo Honda Accord

Il THUMS nell'istante prima dell'impatto possiede una velocità angolare generatasi nella simulazione fino a quel momento, mentre l'impattore nello stesso istante è caratterizzato da una velocità angolare nulla, questo comporta e giustifica la sovrastima del valore di BrIC del THUMS.

Dai grafici (figure 89 e 90) si nota che più si impone una dinamica all'impattore simile a quella della testa del THUMS più il comportamento tra i due è comparabile.

Oggi dal punto di vista del protocollo Euro NCAP il BrIC non è ancora un indice standard, alla luce dei risultati ottenuti si può affermare che l'impatto testa risulta un fenomeno piuttosto complesso in cui anche la componente in Y della velocità iniziale svolge un ruolo importante, che attualmente non viene preso in considerazione. Inoltre, l'inerzia degli altri segmenti corporei sembra dare un'importante influenza nel condizionare la dinamica della testa in urto.

In entrambi i casi il THUMS presenta una sovrastima media di +159% circa rispetto all'impattore.

7. Conclusioni

Al giorno d'oggi, i modelli FEM vantano un'ampia applicazione per le simulazioni di crash test. È importante disporre sia di un valido modello di veicolo ma anche di modelli biofedeli che possano riprodurre il rischio di lesione tramite soglie su indici opportunamente dimensionati. Il modello computazionale THUMS è stato sviluppato per ricreare in dettaglio il comportamento del corpo umano. Lo scopo è quello di prevedere meglio gli infortuni rispetto ai classici manichini rigidi.

In questo lavoro di tesi è stato simulato un urto pedone con riferimento al protocollo tecnico Euro NCAP. Come fase preliminare si è verificato che il modello di corpo umano, THUMS, fosse conforme ai requisiti del protocollo.

Una volta effettuata questa verifica, sono stati allestiti i modelli completi, utilizzando l'ambiente Altair Hypermesh e fatte le simulazioni numeriche tramite il solutore Ansys LS-DYNA. È stato riprodotto l'urto tra due veicoli family car, Toyota Yaris e Honda Accord, ed il THUMS in tre diversi scenari di collisione: il centro della testa del THUMS allineato alla mezzeria del veicolo, il centro della testa del THUMS allineato al montante anteriore del veicolo e, l'ultimo, una posizione intermedia tra le due, allo scopo di esplorare punti d'impatto con diverse rigidità verso il manichino. Simulazioni analoghe in termini di punti di impatto sono state eseguite sostituendo il THUMS con l'impattore testa omologativo in due configurazioni differenti: la prima conforme ai requisiti del protocollo Euro NCAP mentre la seconda cercando di replicare le condizioni del THUMS al momento della collisione con le parti del veicolo.

I modelli completi finali sono stati eseguiti tramite le risorse computazionali dell'azienda AMET.

I risultati ottenuti sono stati visualizzati utilizzando i software di post-processing Altair HyperView/HyperGraph 2D con cui sono stati calcolati i criteri di lesione su testa per effettuare un confronto.

In base al confronto è emerso che per quanto riguarda l'indice HIC vi è una sovrastima media da parte dell'impattore rispetto al THUMS rispettivamente pari a +145% rispetto alla Toyota Yaris e circa +9% rispetto al veicolo Honda Accord, differenza da ricondurre alla diversa geometria dei veicoli che causano una dinamica del THUMS differente. La sovrastima dell'impattore è dovuta alla struttura dei modelli: l'impattore testa presenta una rigidità elevata che riduce la comprimibilità dei tessuti, non riuscendo a dissipare efficientemente l'energia mentre il THUMS è costituito da strati di materiale che si deformano attenuando il fenomeno e risultando in accelerazioni minori e dunque HIC misurati minori.

L'andamento dell'indice BrIC si discosta da quello dell'HIC presentando valori elevati misurati dal THUMS, questo è dovuto alle diverse condizioni iniziali dei modelli: l'impattore nell'istante iniziale presenta una velocità angolare nulla, il THUMS nello stesso istante ha già effettuato parte temporale della simulazione acquisendo una velocità angolare generatasi dalla collisione fino a quel momento. La sovrastima media riportata dal THUMS è pari al +159% per entrambe le vetture.

L'attività potrebbe essere estesa effettuando simulazioni su più modelli di veicolo, anche appartenenti ad altre categorie, in modo da ampliare il numero di test per poter effettuare un'indagine statistica accurata.

Inoltre, si potrebbe effettuare il confronto tra il modello del THUMS bambino con l'impattore testa omologativo bambino.

Infine, si potrebbe confrontare il comportamento del THUMS rispetto agli altri impattori di bacino e gamba, presenti nelle norme omologative e di rating pedone Euro NCAP.

Bibliografia

- [1] Istat, «[istat.it](https://www.istat.it),» 18 novembre 2022. [Online]. Available: https://www.istat.it/it/files/2022/11/REPORT_INCIDENTI-STRADALI_PRIMO-SEMESTRE-2022.pdf.
- [2] C. Bignardi, *materiale del corso "bioingegneria meccanica"*, Torino, 2018.
- [3] Automobile Club d'Italia, [Online]. Available: <https://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-attiva-e-preventiva/sistemi-per-la-correzione-automatica-degli-errori-di-guida.html>.
- [4] Automobile Club d'Italia, [Online]. Available: <https://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-passiva.html>.
- [5] TÜV SÜD, [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/it-it/settori/mobilita-e-automotive/automotive-e-oem/omologazione-e-accesso-al-mercato-globale/regolamenti-internazionali-ece>.
- [6] United Nations, *Addendum 126: UN Regulation No. 127 Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance*, 2018.
- [7] EuroNCAP, [Online]. Available: <https://euroncap.newsmarket.com/images-and-videos/video/euro-ncap---pedestrian-safety/a/881a9846-b376-4ba5-a2c6-c5eb797f2618>.
- [8] Global NCAP, [Online]. Available: <https://www.globalncap.org/ncaps>.
- [9] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/it/info-su-euro-ncap/come-leggere-le-stelle/>.
- [10] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/>.
- [11] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/>.
- [12] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/head-impact/>.
- [13] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/upper-leg-impact/>.
- [14] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/lower-leg-impact/>.
- [15] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/aeb-pedestrian/>.

- [16] Euro NCAP, [Online]. Available: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/aeb-cyclist/>.
- [17] Euro NCAP, «vulnerable road user testing protocol,» novembre 2022. [Online].
- [18] Euro NCAP, «assessment protocol vulnerable road user protection,» gennaio 2023. [Online].
- [19] Euro NCAP, «TB 024 Pedestrian Human Model Certification,» novembre 2021. [Online].
- [20] C. Klug, F. Feist, B. Schneider, W. Sinz, J. Ellway e M. van Ratingen, «Development of a Certification Procedure for Numerical Pedestrian Models,» Eindhoven, Netherlands, 2019.
- [21] D. A. Bini, 30 ottobre 2013. [Online]. Available: <https://poisson.phc.dm.unipi.it/~lbruni/Appunti/AnalisiNumerica.pdf>.
- [22] R. Bevilacqua e O. Menchi, «appunti di calcolo numerico,» [Online]. Available: <http://pages.di.unipi.it/bevilacq/Dispensa11-12.pdf>.
- [23] M. Dave, «introduzione al CAE - Computer Aided Engineering,» 26 luglio 2022. [Online]. Available: <https://www.ptc.com/it/blogs/cad/what-is-cae>.
- [24] Altair University eBook, Practical Aspects of Finite Element Simulation, 5th Edition, 2019.
- [25] E. Rizzi, «Alcune nozioni fondamentali sul metodo degli elementi finiti in meccanica dei solidi,» 20 giugno 2003. [Online]. Available: <https://dinamico2.unibg.it/erizzi/CV/ERizziEFBG03.pdf>.
- [26] Altair, «Altair University Certification,» [Online]. Available: <https://certification.altairuniversity.com>.
- [27] R. Nobile, «Calcolo e progetto di macchine, Elementi bidimensionali,» [Online]. Available: <https://www.unisalento.it>.
- [28] A. Gugliotta, Elementi finiti, Politecnico di Torino, Torino: Otto editore, 2002.
- [29] Ansys, «Ansys LS-DYNA,» [Online]. Available: <https://www.ansys.com/it-it/products/structures/ansys-ls-dyna>.
- [30] LS-DYNA Support, «LS-DYNA Manual R9.0 - Vol. I,» 29 agosto 2016. [Online]. Available: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals>.
- [31] National Highway Traffic Safety Administration, «Crash Simulation Vehicle Models,» [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>.
- [32] Toyota Motor Corporation, «Toyota - Total HUMAN Model for Safety,» [Online]. Available: <https://www.toyota.co.jp/thums/>.
- [33] E. G. Takhounts, M. J. Craig, K. Moorhouse e J. McFadden, «Development of Brain Injury Criteria (BrIC),» *Stapp Car Crash Journal*, vol. 57, pp. 243-266, novembre 2013.
- [34] D. M. Shojaati, «Correlation between injury risk and impact,» Monte Verità Ascona, 2003.