



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**INDAGINE NUMERICA SUL COMPORTAMENTO  
MECCANICO DI SCHIUMA DI POLISTIROLO AL  
VARIARE DELLA VELOCITÀ DI IMPATTO**

*Candidato*

Matteo Meneghel

1111059

*Relatore*

Prof. Ugo Galvanetto

*Correlatore*

Dr. Siamak Farajzadeh Khosroshahi

---

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

*"Una volta, secondo Sir George H. Darwin, la Luna era molto vicina alla Terra.  
Furono le maree che a poco a poco la spinsero lontano: le maree che lei Luna  
provoca nelle acque terrestri e in cui la Terra perde lentamente energia. Lo so  
bene! - esclamò il vecchio Qfufq - voi non ve ne potete ricordare ma io sì.  
L'avevamo sempre addosso, la Luna, smisurata [...]. Se non abbiamo mai provato  
a salirci? E come no? Bastava andarci proprio sotto con la barca, appoggiarci una  
scala a pioli e montar su."  
Italo Calvino*



# Abstract

The following master thesis elaborate is dedicated to the study of the mechanical behavior of polystyrene foams (EPS), which are used as absorbing liner in motorcyclist's helmets, to absorb the impact energy. Thanks to its mechanical properties, EPS foams are very efficient to reduce the risk of head injury. The finite elements method (FEM) is employed to investigate the phenomenon thanks to LSDYNA<sup>®</sup> software. This thesis presents a brief description of the motorcyclist's helmet, its parts and their tasks. An entire chapter focuses on the deformation mechanism of the EPS foam thanks to which the EPS foam is able to absorb impact energy. A description of the impact tests and efficiency parameters defined by the standardization agencies follows, with particular reference to the ECE 22 normative. The main part of this thesis is dedicated to the description of the FEM models of the helmet and the simulations. In particular, two designs of helmets are investigated, the first one with a single absorbing liner and the second one with a double liner. The simulations reproduce the impact test required by the regulations for a given impact velocities range. Last, the results of the impact simulations are reported and the best designs of absorbing liner is indicated.



# Sommario

Il seguente lavoro di tesi magistrale riguarda lo studio del comportamento meccanico di schiume di polistirolo (EPS) utilizzate nei caschi al fine di assorbire l'energia d'impatto, andando quindi a ridurre i rischi di infortunio alla testa del motociclista. L'indagine numerica è stata svolta grazie al metodo agli elementi finiti (FEM) ed è stata eseguita attraverso il programma LSDYNA<sup>®</sup>. La presente tesi comprende una breve presentazione del casco motociclistico come strumento di protezione individuale, delle parti che lo compongono e relative funzioni. Segue una breve trattazione del comportamento meccanico delle schiume di polistirolo espanso (EPS) e una descrizione dei parametri utilizzati dagli standards emanati da vari enti, governativi e non, per testare l'efficacia del solido cellulare, implementato nel casco, nell'assorbire l'energia di impatto. Infine vengono descritti i modelli FEM realizzati di casco semplificato e le simulazioni svolte a riprodurre le dinamiche del test di impatto previsto dalla normativa ECE 22. Il modello FEM di casco prevede due design differenti per il liner di assorbimento, il primo design presenta un'unica schiuma di polistirolo, mentre il secondo presenta un'imbottitura realizzata con due schiume aventi caratteristiche differenti. Vengono quindi riportati i risultati delle simulazioni e individuati i design migliori al variare della velocità di impatto.





# Ringraziamenti

Questi anni da studente universitario a Padova hanno sicuramente rappresentato un periodo importante e stimolante della mia vita. Sarà perchè sono coincisi con i vent'anni? "A vent'anni è tutto un chi lo sa..." diceva una canzoncina, "io a vent'anni avevo sonno". Alla luce ciò, in prossimità della conclusione di tale periodo, urge ed è necessario andare a ringraziare un po' di persone. Iniziando dalla famiglia. Ringrazio il babbo Valter per tutti i sacrifici fatti per mandarmi a studiare fuori casa. Mio fratello Marco per avermi fatto conoscere in giovane età Ken il gurriero, l'uomo tigre e Sampei, anche se, onestamente, non so cosa c'è di meritevole in questo. Ringrazio quindi a cascata tutti i parenti e affini: zii, nonni, zie e nonni, cugini e cugine di vario grado, cognata e nipotine. La famiglia è stata per me fondamentale per rispondere alle grandi domande della vita, del tipo "Da dove veniamo? dove andiamo?". Grazie a loro la risposta a tali quesiti fondamentali è sempre stata scontata: veniamo dalla mamma e andiamo dai nonni, specialmente di domenica. Negli ultimi anni ho condiviso gran parte del mio tempo con un numero enorme di persone, nella certezza che solo attraverso la conoscenza degli altri è possibile dare forma a se stessi e tenendo ben presenti le parole del buon Calvino "Se alzi un muro, pensa a cosa lasci fuori". Colgo quindi quest'occasione al balzo per ringraziarne qualcuna. Un grazie quindi a Francesco, Mattia, Teo e i Giordano, con i quali, ormai tanti anni fa, iniziai questa avventura patavina. Ringrazio il Ciuffo per le varie partite del Milan viste insieme e per il countdown in vista dell'esame di aerodinamica. Il Fado che ormai mi è impossibile dissociare dalla figura del delfino. Un grazie ad Alberto, big boss di Autoport, per i weekend in Pollaio. A tutto il gruppo di Operazione Marmellata, composto da Alex, Arthur, Cenz, il Conte, Duzzo, Enrico, Gigi, Giulia e Curling un enorme grazie, per il tempo libero passato assieme, i consigli e il supporto, anche mentre scrivo questi ringraziamenti. La Psicoborsa per i motivi più disparati, quando faccio ritorno a Belluno, grazie quindi ad Alvisè, DB, Dino, Ema, Gas, Lele-san, Lucio, Sante, Pagnu e Umbe. Ai conquilini di Via Sabatucci, in particolare Yiwei, Lara e Lorenzo e a quelli di Via Marzolo. A tutti voi grazie, sappiate che difficilmente vi ringrazierò nuovamente in quanto devo dire che la cosa mi mette discretamente in imbarazzo. Un sentito ringraziamento al Prof. Ugo Galvanetto e al Dr. Siamak Farajzadeh Khosroshahi per avermi seguito durante questo lavoro di tesi. Infine un breve pensiero per le persone a cui questa tesi è dedicata. Un pensiero ai miei nonni. Mi è difficile dimenticare il nonno salire in bici la salita verso casa con le borse rosse e blu piene della spesa. Soprattutto mi è impossibile dimenticare quando la nonna capitava a casa di prima mattina durante le vacanze estive svegliando, a colpi di cannone, me e mio fratello. Un pensiero a mia Zia Maria che per anni ha combatutto contro la mia indolenza come

Don Chisciotte contro i mulini a vento, con metodi anche da Telefono Azzurro. Come quando vedendomi sul divano spaparanzato durante le vacanze estive delle elementari mi contrinse a salire con lei al rifugio Settimo Alpini, dove il telefono prendeva a stento. A mia Mamma che immagino ancora in giro a scorrazzare a tutto gas con la sua Autobianchi a112 Junior blu elettrico.

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Il casco, dispositivo di protezione individuale</b>	<b>5</b>
1.1 La funzione del casco motociclistico . . . . .	5
1.2 Tipologie di caschi . . . . .	6
1.2.1 Casco integrale . . . . .	6
1.2.2 Casco integrale apribile o modulare . . . . .	7
1.2.3 Casco jet . . . . .	7
1.3 Componenti del casco e loro funzioni . . . . .	8
1.3.1 Calotta esterna . . . . .	8
1.3.2 Imbottitura di protezione . . . . .	9
1.3.3 Rivestimento interno . . . . .	9
1.3.4 Cinturino sottogola . . . . .	10
1.3.5 Sistema di ventilazione . . . . .	10
1.3.6 Visiera . . . . .	10
<b>2 La schiuma di polistirolo come sistema di assorbimento di energia</b>	<b>11</b>
2.1 Le strutture solide cellulari . . . . .	11
2.2 Le caratteristiche meccaniche della schiuma di EPS . . . . .	12
2.2.1 parametri caratteristici . . . . .	13
2.3 meccanismi di deformazione . . . . .	14
2.4 EPS foam come sistema di dissipazione dell'energia . . . . .	18
<b>3 Standards e Criteri di infortunio</b>	<b>21</b>
3.1 Standards di sicurezza . . . . .	21
3.2 Principali criteri di infortunio . . . . .	22
3.2.1 Pick Load Acceleration PLA . . . . .	22
3.2.2 Head Injury Criterion HIC . . . . .	22
3.3 La normativa europea . . . . .	22
3.3.1 Il test di impatto . . . . .	23
<b>4 Investigazione numerica della schiuma di EPS: descrizione modelli</b>	<b>29</b>
4.1 Modelli FEM del casco . . . . .	29
4.1.1 Modello A: single absorbing liner . . . . .	30
4.1.2 Modello B: doppio layer di assorbimento . . . . .	35
4.2 Definizione dei contatti . . . . .	36
4.3 Descrizione delle simulazioni . . . . .	38

<b>5</b>	<b>Investigazione numerica della schiuma di EPS: risultati</b>	<b>41</b>
5.1	Risultati modelli A . . . . .	41
5.2	Risultati modello B . . . . .	52
5.3	Confronto tra i modelli di casco . . . . .	68
	<b>Conclusione</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Tabelle riassuntive di PLA e HIC</b>	<b>79</b>

# Elenco delle tabelle

1	Infortunio vs velocità d’impatto per categoria L1 . . . . .	3
2	Infortunio vs velocità d’impatto per categoria L3 . . . . .	3
3	Infortunio vs velocità d’impatto per categoria mofa . . . . .	3
1.1	Dati relativi alla California 2012-2013, severità infortunio alla testa in funzione della tipologia di casco . . . . .	7
3.1	False teste impiegate nei test di impatto . . . . .	25
3.2	Confronto degli standard ECE22.05 EU con altri enti . . . . .	26
4.1	Proprietà outershell del modello di casco semplificato . . . . .	31
4.2	Elenco modelli A: imbottitura singola . . . . .	31
4.3	Proprietà . . . . .	33
4.4	Proprietà chin. . . . .	34
4.5	Proprietà headform. . . . .	34
4.6	Proprietà at anvil. . . . .	35
4.7	Elenco Modelli B con definizione proprietà. . . . .	36
4.8	Elenco delle simulazioni per modelli A e B. . . . .	39
5.1	Valori di HIC e PLA per i modelli A, velocità d’imapptto di $5.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	42
5.2	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $5.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	43
5.3	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $6.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	44
5.4	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $6.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	45
5.5	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $7.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	46
5.6	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	47
5.7	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $8.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	48
5.8	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $8.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	49
5.9	Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d’impatto di $9.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	50
5.10	Valori di HIC e PLA per i modelli B1 per velocità d’impatto di $5 \frac{m}{s}$ . . . . .	53
5.11	Valori di HIC e PLA per i modelli B1 per velocità d’impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	54
5.12	Valori di HIC e PLA per i modelli B1 per velocità d’impatto di $9.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	55
5.13	Valori di HIC e PLA per i modelli B2 per velocità d’impatto di $5.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	56
5.14	Valori di HIC e PLA per i modelli B2 per velocità d’impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	57
5.15	Valori di HIC e PLA per i modelli B2 per velocità d’impatto di $9.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	58
5.16	Valori di HIC e PLA per i modelli B3 per velocità d’impatto di $5.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	59
5.17	Valori di HIC e PLA per i modelli B3 per velocità d’impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	60
5.18	Valori di HIC e PLA per i modelli B3 per velocità d’impatto di $9.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	61
5.19	Valori di HIC e PLA per i modelli B4 per velocità d’impatto di $5.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	62

5.20	Valori di HIC e PLA per i modelli B4 per velocità d'impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ .	63
5.21	Valori di HIC e PLA per i modelli B4 per velocità d'impatto di $9.0 \frac{m}{s}$ .	64
5.22	Valori di HIC e PLA per i modelli B5 per velocità d'impatto di $5.0 \frac{m}{s}$ .	65
5.23	Valori di HIC e PLA per i modelli B5 per velocità d'impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ .	66
5.24	Valori di HIC e PLA per i modelli B5 una velocità d'impatto di $9.0 \frac{m}{s}$ .	67
A.1	tabella riassuntiva valori di PLA e HIC per i modelli A . . . . .	79
A.2	tabella riassuntiva valori di PLA e HIC per i modelli A . . . . .	80
A.3	tabella riassuntiva valori di PLA e HIC per i modelli B . . . . .	81

# Elenco delle figure

1.1	Esempio di casco motociclistico, fonte Wikipedia . . . . .	5
1.2	Tipologie di casco motociclistico più comuni presenti sul mercato [2]	6
1.3	Componenti di un casco moderno, con riferimento alla tipologia di casco integrale [2] . . . . .	8
2.1	Varietà di strutture di solidi cellulari [11] . . . . .	12
2.2	Andamento della curva deformazione-stress per una schiuma di polistirolo soggetta a compressione . . . . .	14
2.3	Andamento della curva deformazione-stress di compressione al variare della densità della schiuma di EPS [14] . . . . .	15
2.4	Modello di cella elementare della schiuma . . . . .	16
2.5	Struttura interna di una schiuma di polistirolo [13] . . . . .	17
2.6	Confronto energia assorbita da due schiume di EPS di densità diversa, la schiuma più efficiente risulta essere quella che lavora più in prossimità del limite della zone di <i>plateau</i> . . . . .	18
3.1	Apparato per il test di impatto [18] . . . . .	23
3.2	Esempio di casco montato su falsatesta per test di omologazione [19]	25
3.3	Punti di impatto individuati dalla normativa ECE 22/05 [18] . . . . .	26
4.1	Modello A da diverse angolazioni . . . . .	30
4.2	Curva deformazione-tensione per la proprietà $\rho_{25}$ . . . . .	31
4.3	Curva deformazione-tensione per la proprietà $\rho_{50}$ . . . . .	32
4.4	Curva deformazione-tensione per la proprietà $\rho_{55}$ . . . . .	32
4.5	Curva deformazione-tensione per la proprietà $\rho_{64}$ . . . . .	33
4.6	Curva deformazione-tensione per la proprietà $\rho_{80}$ . . . . .	33
4.7	Particolare del modello con imbottitura e cinturino montati sulla falsa testa . . . . .	34
4.8	Modello B: dettagli . . . . .	36
4.9	Nodo slave e segmento master all'interfaccia di contatto [20] . . . . .	38
4.10	Disposizione del casco pronto all'impatto nel punto B . . . . .	39
5.1	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di $5.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	42
5.2	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di $5.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	43
5.3	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di $6.0 \frac{m}{s}$ . . . . .	44

5.4	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di 6.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	45
5.5	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di 7.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	46
5.6	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di 7.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	47
5.7	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di 8.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	48
5.8	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di 8.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	49
5.9	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di 9.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	50
5.10	Andamento di PLA e HIC per i modelli A al variare della velocità d'impatto . . . . .	51
5.11	sezione del modello A, deformazioni massime al variare della proprietà della schiuma di EPS per velocità d'impatto di 8.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	52
5.12	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B1, velocità d'impatto di 5.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	53
5.13	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B1, velocità d'impatto di 7.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	54
5.14	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B1, velocità d'impatto di 9.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	55
5.15	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B2, velocità d'impatto di 5.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	56
5.16	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B2, velocità d'impatto di 7.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	57
5.17	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B2, velocità d'impatto di 9.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	58
5.18	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B3, velocità d'impatto di 5.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	59
5.19	Accelerazione in funzione del tempo per il modello B3, velocità d'impatto di 7.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	60
5.20	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B3, velocità d'impatto di 9.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	61
5.21	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B4, velocità d'impatto di 5.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	62
5.22	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B4, velocità d'impatto di 7.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	63
5.23	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B4, velocità d'impatto di 9.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	64
5.24	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B5, velocità d'impatto di 5.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	65
5.25	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B5, velocità d'impatto di 7.5 $\frac{m}{s}$ . . . . .	66
5.26	Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B5, velocità d'impatto di 9.0 $\frac{m}{s}$ . . . . .	67



5.27	Grafici riassuntivi di PLA e HIC in funzione del pattern di schiume di EPS per velocità d'impatto di $5 \frac{m}{s}$ . . . . .	68
5.28	Grafici riassuntivi di PLA e HIC in funzione del pattern di schiume di EPS per velocità d'impatto di $7.5 \frac{m}{s}$ . . . . .	69
5.29	Grafici riassuntivi di PLA e HIC in funzione del pattern di schiume di EPS per velocità d'impatto di $9 \frac{m}{s}$ . . . . .	70



# Introduzione

Gli incidenti stradali sono una delle maggiori cause di morte nel mondo, ogni anno circa 31 mila persone muoiono all'interno dell'Unione Europea e oltre un milione di persone incorrono in infortuni direttamente riconducibili a incidenti stradali. Negli US, nel 2015, gli incidenti mortali a motociclisti sono risultati essere più del 15.5% del totale delle mortalità su veicoli stradali. Tutto ciò a dispetto del fatto che solo il 3.3% dei veicoli stradali registrati è costituito da moto. Ne consegue che l'incidenza da incidenti mortali in moto risulta essere cinque volte superiore di quella degli utilizzatori di automobile[1]. Nel 2010 la percentuale di decessi su strada alla guida di due ruote corrispose al 18% del totale nei paesi dell'Unione Europea. La maggior parte degli incidenti riguarda una fascia di età molto bassa, tra i 16 e i 18 anni di età, mentre l'età media si aggira attorno ai 26 anni. Nella maggior parte dei casi gli incidenti che riguardano motociclisti sono causati da disattenzione da parte di uno dei soggetti coinvolti e solo nel 23% da fattori esterni. Gli infortuni riportati da un motociclista a seguito di un incidente e la gravità di questi dipendono fortemente dalle dinamiche dell'incidente ovvero dalla configurazione di impatto e dalla velocità con cui questo avviene. La velocità riveste un ruolo importante negli incidenti. Più alte sono le velocità, maggiore sarà l'energia cinetica coinvolta nell'impatto e di conseguenza la probabilità di infortunio grave. Studi rivelano come spesso la velocità d'impatto sia legata alla tipologia di mezzo utilizzato. Se si fa distinzione tra le tre diverse categorie di motociclette secondo la classificazione internazionale (L1,L3,mofa) si possono individuare le tre velocità medie di impatto:

- L1  $v = 32 \pm 11$  km/h
- L3  $v = 53 \pm 18$  km/h
- mofa  $v = 24$  km/h

L'importanza della velocità d'impatto è evidente dai dati riportati nelle tabelle 1, 2 e 3. [3] Un altro dato che balza all'occhio è come a seguito di incidente stradale che coinvolge un motociclista, sia necessario il più delle volte il trattamento ospedaliero.

E' quindi evidente, alla luce di tali dati, al fine di tutelare l'incolumità del motociclista, la necessità di andare a realizzare dispositivi in grado di prevenire, per quanto possibile, le conseguenze più gravi nel caso di incidente motociclistico. Rientrano quindi in questa categoria dispositivi di protezione individuale quali i caschi. I caschi rappresentano il dispositivo di protezione individuale per eccellenza per quel che riguarda il motociclista. La testa rappresenta una delle aree maggiormente soggette

a severi, e a volte fatali, infortuni. Lo scopo del casco è quindi quello di prevenire infortuni alla testa, per fare ciò è necessario che esso sia in grado di svolgere essenzialmente due compiti:

- Evitare la perforazione da parte di oggetti esterni
- Assorbire l'energia dell'impatto, al fine di evitare trasmissioni di elevate accelerazioni alla testa

Diversi studi hanno dimostrato come l'uso del casco riduca il rischio di morte, nel caso di collisioni in cui sono coinvolti motociclisti, del 42% e di infortuni generici alla testa del 69%[2].

L'inizio dello sviluppo dell'attuale concetto di casco si può far risalire ai primi anni del '900, con l'inizio di una larga diffusione tra la popolazione della moto come mezzo di trasporto. I primi modelli di casco compaiono all'interno delle competizioni motociclistiche ed erano di fatto una derivazione dei modelli già utilizzati in campo aeronautico, il loro unico scopo era quello di garantire un certo comfort e di fatto non garantivano alcun tipo di protezione alla testa dell'utilizzatore, essi erano infatti realizzati in cuoio morbido. Furono le corse a dare un forte impulso alla ricerca di dispositivi di protezione sempre più efficienti a seguito di incidenti di enorme gravità che coinvolsero negli anni diversi piloti. Si iniziò a indagare quali fossero i reali meccanismi coinvolti nella dinamica dell'impatto. Tali indagini portarono alla realizzazione nel corso degli anni trenta del primo casco dotato di un rigido guscio esterno, da prima realizzato con vari strati di cartone incollati e poi successivamente attraverso la polimerizzazione di lino impregnato di resine [5]. Il passo successivo, dovuto al fatto che si iniziò a comprendere come un casco non dovesse solo evitare la penetrazione ma anche assorbire l'energia dell'impatto, fu quello di introdurre nel casco un'imbottitura. Roth & Lombard nel 1953 realizzano i primi caschi di concezione moderna, costituiti da una calotta esterna rigida realizzata attraverso una serie di layer in fibra di vetro e diverse soluzioni di imbottitura, tra cui schiume in polistirolo espanso EPS e il poliuretano PU. Le prime diventarono nel corso degli anni la soluzione più utilizzata in quanto furono in grado di garantire un'elevata efficacia nell'assorbire l'energia dell'urto e bassi costi. Nel corso degli anni sono state proposte anche nuove soluzioni sia per quel che riguarda la calotta esterna sia per l'imbottitura [16] [17]. Ad esempio sta prendendo sempre più piede la calotta realizzata in laminato la quale garantirebbe una serie di vantaggi ma allo stesso tempo ha un costo superiore alla classica calotta in ABS. Da qui in avanti, grazie alla definizione di standard sempre più stringenti, si sono sviluppati caschi sempre più sicuri in grado di garantire sempre una maggiore protezione. Anche se negli anni la definizione di standard da parte di governi o fondazioni private hanno aiutato notevolmente la realizzazione di design sempre più efficaci nello svolgere le proprie funzioni, allo stato attuale questi risultano essere in parte obsoleti non tenendo conto dell'evoluzione nella comprensione dei meccanismi di impatto avvenuta negli ultimi anni. Questo ha fatto sì che l'evoluzione di molti caschi, invece di seguire la comprensione della dinamica dell'impatto, seguano l'evoluzione degli standard di sicurezza. Ciò ha portato alla realizzazione di caschi il cui scopo principale è quello di superare i test imposti i quali però non rispettano le reali circostanze di un incidente [2].

**Tabella 1:** Infortunio vs velocità d’impatto per categoria L1

velocità impatto [km/h]	no infortunio	soccorso sul luogo	trattamento ospedaliero	ricovero < 24h	ricovero	disabilità	fatale
0 – 25	0	2	25	16	27	0	3
26 – 50	0	6	75	23	94	0	14
51 – 75	1	3	19	3	76	1	23
76 – 100	0	0	2	1	45	1	15
101+	0	0	4	0	17	0	20

**Tabella 2:** Infortunio vs velocità d’impatto per categoria L3

velocità impatto [km/h]	no infortunio	soccorso sul luogo	trattamento ospedaliero	ricovero < 24h	ricovero	disabilità	fatale
0 – 25	0	2	6	3	7	0	0
26 – 50	0	0	3	2	2	0	3

**Tabella 3:** Infortunio vs velocità d’impatto per categoria mofa

velocità impatto [km/h]	no infortunio	soccorso sul luogo	trattamento ospedaliero	ricovero < 24h	ricovero	disabilità	fatale
0 – 25	2	3	70	17	31	0	1
26 – 50	0	6	99	16	67	1	15
51 – 75	0	0	11	4	18	1	5
76 – 100	0	0	0	0	0	0	1

Nello specifico lo scopo di questa tesi è quello di andare a indagare, attraverso un'indagine numerica con il metodo degli elementi finiti, il comportamento di diverse schiume di EPS, caratterizzate da proprietà meccaniche differenti, utilizzate come imbottitura del casco, al variare di una delle molteplici variabili coinvolte in un impatto: la velocità.

# Capitolo 1

## Il casco, dispositivo di protezione individuale

Nel seguente capitolo si presentano i compiti cui deve assolvere il casco motociclistico, quali sono le componenti fondamentali che lo costituiscono e le loro funzioni ed infine una breve panoramica sulle tipologie di caschi comunemente disponibili sul mercato.

### 1.1 La funzione del casco motociclistico

Il casco rappresenta il dispositivo di protezione individuale per eccellenza per quel che riguarda il motociclista. Il suo scopo è preservare il capo da gravi infortuni, i quali purtroppo possono rivelarsi anche fatali. Tali infortuni sono la rottura della scatola cranica e le lesioni cerebrali da trauma cranico. Queste ultime sono dovute al moto relativo tra il cervello e la scatola cranica a seguito di violente decelerazioni del capo. Per prevenire tali infortuni il casco deve evitare quindi la perforazione da parte di un oggetto esterno del casco stesso e deve essere in grado di assorbire l'energia dell'impatto al fine di trasferire il minor carico possibile alla testa in termini di accelerazioni.



**Figura 1.1:** Esempio di casco motociclistico, fonte Wikipedia

## 1.2 Tipologie di caschi

Sul mercato sono presenti diverse tipologie di casco i quali presentano caratteristiche differenti, determinando, per il motociclista che li indossa, livelli di comfort differenti ma anche differenti capacità di prevenire infortuni. Le tipologie di caschi motociclistici più comuni sono rappresentati da:

- Casco integrale
- Casco integrale apribile o modulare
- Casco jet



**Figura 1.2:** Tipologie di casco motociclistico più comuni presenti sul mercato [2]

### 1.2.1 Casco integrale

E' il casco più comune tra quelli in circolazione. La sua caratteristica principale è quella di avvolgere completamente la testa di chi lo indossa, garantendo una copertura che parte dalla parte superiore del collo fino alla zona del mento. Tale caratteristica lo rende il casco in assoluto più sicuro. Ovviamente rispetto ad un



casco jet offre un comfort inferiore, in quanto risulta più difficoltoso garantire un'opportuna ventilazione in grado di mantenere una temperatura adeguata per la testa. Questo ed altri fattori, contribuiscono a generare, per il motociclista che lo indossa, la sensazione di isolamento dall'ambiente esterno, la visione periferica risulta inoltre ridotta e il suo peso può causare affaticamento del collo qualora indossato in maniera continuativa per periodi prolungati.

### 1.2.2 Casco integrale apribile o modulare

E' una soluzione che cerca di combinare la sicurezza di un casco integrale con il comfort di un casco jet. Da aperto garantisce una maggior aereazione mentre da chiuso risulta essere di fatto un casco integrale, andando a coprire completamente il capo. La protezione laterale, però, risulta più esibile a causa della struttura aperta rispetto alla soluzione integrale ma a differenza del casco jet è presente una mentoniera, anche se sottile. Tutto ciò fa sì che il casco modulare risulti leggermente inferiore a quello integrale in termini di sicurezza. Inoltre la reale efficacia della mentoniera è ancora oggetto di studi. Il maggior svantaggio costituito da questo tipo di casco è il suo peso. A causa della sua natura intrinseca esso presenta un maggior peso e un maggior ingombro. Questo porta ad un maggior affaticamento del collo, e in caso di impatto aumentano le probabilità di infotunio al collo.

**Tabella 1.1:** Dati relativi alla California 2012-2013, severità infortunio alla testa in funzione della tipologia di casco .

	Tipologia di casco		
	Integrale	Modulare	Jet
infortunio alla testa	%	%	%
no	88.7	86.8	79.5
si	11.3	13.2	20.5
severità infortunio	%	%	%
fatale	2.5	3.2	2.8
severo	15.3	17.0	15.7
other visible	38.8	37.5	40.1
dolore	19.0	19.9	16.1
no infortunio	23.7	22.1	24.5
sconosciuto	0.8	0.3	0.8

### 1.2.3 Casco jet

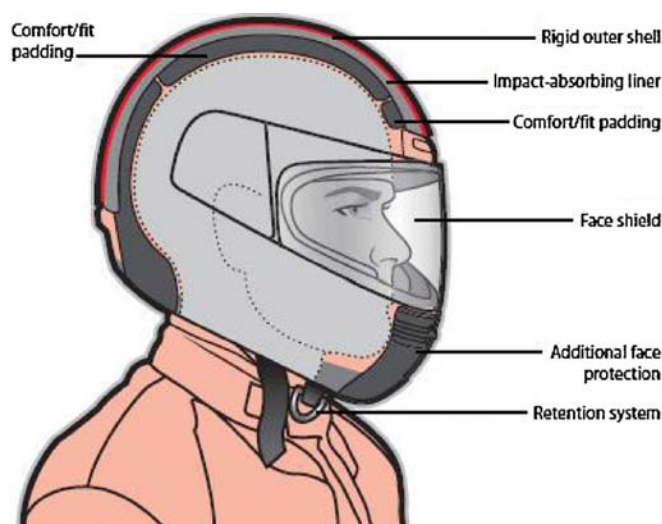
Questa tipologia di casco non offre protezione al volto, il quale risulta di conseguenza completamente vulnerabile in caso di incidente. E' un casco che dunque privilegia il comfort dell'utilizzatore, garantendo una migliore circolazione d'aria e un minor senso d'isolamento, il tutto però a discapito della sicurezza. Come si può notare

dalla tabella 1.1 che riporta i dati relativi agli incidenti motociclistici avvenuti in California [4], la percentuale di infortuni alla testa nel caso di utilizzatori di casco jet risulta essere più alta (20.5%) rispetto a agli utilizzatori di caschi integrali (11.3%) e modulari (13.2%).

### 1.3 Componenti del casco e loro funzioni

Come già accenato in precedenza, il casco è un sistema abbastanza complesso che si è evoluto negli anni grazie ad una migliore comprensione delle dinamiche coinvolte di un impatto. Il casco moderno è in genere composto da sei componenti aventi differenti funzione, come si può vedere nella figura 1.3, questi sono:

- Calotta esterna
- Imbottitura di protezione
- Rivestimento interno
- Visiera
- Sistema di ventilazione
- Cinturino sottogola



**Figura 1.3:** Componenti di un casco moderno, con riferimento alla tipologia di casco integrale [2]

#### 1.3.1 Calotta esterna

Il guscio esterno rigido, che solitamente presenta uno spessore variabile tra i 3-5 mm, ha come scopo principe, quello di evitare la penetrazione di oggetti accuminati, l'esempio più tipico è rappresentato dagli spigoli di marciapiede, distribuire il carico dell'impatto su una vasta area del casco, in modo da ridurre le concentrazioni di stress

e al contempo aumentare la percentuale di area dell'imbottitura dedito all'assorbimento dell'energia coinvolta dall'urto. Ha inoltre il compito di assorbire lo shock iniziale, stando ad alcuni studi è in grado di assorbire tra 10-30% dell'energia totale coinvolta nell'impatto [6] [7] [8], le capacità di assorbire lo shock iniziale variano significativamente a seconda del materiale che costituisce il guscio esterno.

Tipicamente la calotta è realizzata con materiali polimerici come policarbonato (PC) e Acrilonitrile-Butadiene-Stirene (ABS). Negli ultimi anni stanno iniziando a prendere sempre più piede gusci realizzati in materiali composito a matrice polimerica con rinforzi in fibra di varia natura, come ad esempio fibra di vetro, fibra di carbonio e Kevlar®. Ovviamente l'utilizzo di materiale composito determina un aumento dei costi di produzione, ciò fa sì che l'utilizzo di materiale polimerico sia ancora lo standard per quel che riguarda i caschi motociclistici commerciali da strada. C'è da sottolineare, però, che una calotta realizzata in materiale composito garantisce una serie di vantaggi meccanici rispetto ad una realizzata con materiale termoplastico. Il maggiore di questi vantaggi sta nella maggior capacità di assorbire l'energia dell'impatto. Un materiale composito laminato con rinforzi in fibra infatti è in grado di assorbire l'energia dell'impatto tramite diversi meccanismi di rottura quali: rottura delle fibre, rottura della matrice e delaminazione, oltre che per deformazione plastica come un qualsiasi materiale polimerico. Tali fenomeni di rottura consentirebbero di trasmettere un minor picco di accelerazione alla testa, in particolare viene suggerito che tale fenomeno sia particolarmente significativo nel caso in cui l'energia d'impatto sia sufficientemente alta da innescare in meccanismo di rottura della fibre presenti nel laminato [9]. Inoltre risulterebbe possibile, a parità d'energia d'impatto, ridurre lo spessore dell'imbottitura dedita all'assorbimento con conseguente riduzione di peso e ingombro. Tali vantaggi fanno sì che tale soluzione, oggi, venga sempre più studiata e applicata.

### 1.3.2 Imbottitura di protezione

Il compito principale di tale sottosistema del casco è quello di assorbire la maggior percentuale di energia dell'impatto andando a ridurre il carico trasmesso alla testa. Il materiale più usato, a livello di caschi commerciali, è quello della schiuma di polistirolo (EPS), argomento di questa tesi, che verrà discusso ampiamente nei capitoli successivi. Un grande limite della EPS è legata al fatto che le sue prestazioni calano notevolmente se soggetta ad un secondo impatto, per ovviare a questo problema nel corso degli anni sono state suggerite diverse opzioni alternative quali, schiuma di polipropilene espanso (EPP) e micro agglomerati di sughero (MAC) [2].

### 1.3.3 Rivestimento interno

E' la parte del casco a diretto contatto con la testa, costituita da schiuma molto leggera a celle aperte, serve a garantire il giusto comfort del capo all'interno del casco. Può essere di spessore variabile a seconda della taglia del casco, essa deve vestire perfettamente la testa al fine di evitare accelerazioni indesiderate in caso di impatto. Tali accelerazioni sono soprattutto rotazionali, dovute alla rotazione della testa all'interno del casco.

### 1.3.4 Cinturino sottogola

Il suo scopo è quello di garantire che il casco rimanga attaccato alla testa in qualsiasi situazione, deve essere regolato in maniera opportuna al fine di in uenzare il meno possibile la rotazione del capo all'interno del casco, al fine di evitare anche in questo caso la generazione di accelezaioni indesiderate. E' solitamente costituito da una cinghia

### 1.3.5 Sistema di ventilazione

E' evidente che all'interno del casco si voglia garantire il più alto comfort possibile. Oltre che avvolgere bene la testa del motociclista, il casco deve essere in grado di garantire un certo benessere, in termini di giusta temperatura e controllo dell'umidità all'interno del dispositivo di sicurezza. Tutto ciò viene garantito attraverso un apposito sistema di ventilazione, il quale ha il compito di apportare un opportuno usso d'aria all'interno del casco.

### 1.3.6 Visiera

La visiera deve garantire un visione ottimale al motociclista e deve preservare il volto da eventuali impatti. A tali fini la visiera è costituita da PC trasparente idrorepellente e anti nebbia.

\* \* \*

## Capitolo 2

# La schiuma di polistirolo come sistema di assorbimento di energia

Il polistirolo è un polimero aromatico sintetico costituito dal succedersi del monomero stirene, in chimica è indicato con  $(C_8H_8)_n$ . Dal polimero è possibile ottenere una schiuma rigida a celle chiuse, ovvero la schiuma di polistirolo espanso (EPS). Si ottiene quindi una struttura cellulare solida. Grazie alle sue proprietà meccaniche, fisiche e tecnologiche, come rigidità, leggerezza, e bassa conducibilità, la schiuma di polistirolo possiede un vasto range di applicazioni. Tra queste applicazioni c'è anche l'imbottitura dei caschi motociclistici, dove la schiuma di EPS viene usata per assorbire l'energia dell'impatto. Di seguito in questo capitolo vengono illustrate brevemente le sue caratteristiche meccaniche, i meccanismi di deformazione e dissipazione dell'energia.

### 2.1 Le strutture solide cellulari

La schiuma di polistirolo è una struttura solida cellulare. In genere un solido cellulare è un assemblamento di celle con spigoli o facce solide impacchettate assieme. Tali tipologie di materiale non sono esclusivamente di tipo artificiale ma si trovano comunemente in natura, un esempio tipico è rappresentato dal legno oppure dalle spugne. Le strutture cellulari più diffuse sono le schiume ottenute dai polimeri, come la schiuma di EPS ma si possono ottenere schiume anche da materiali metallici e ceramici. Il fatto di potere ottenere solidi cellulari da materiali con caratteristiche tanto differenti fa sì che il range di applicazione dei solidi cellulari sia estremamente ampio. Vengono infatti usate per:

- Isolamento termico
- Funzioni strutturali
- Ammortizzazione
- Membrane idrorepellenti

e altri utilizzi ancora. Il parametro fondamentale di un solido cellulare è rappresentato dalla sua densità relativa  $\frac{\rho}{\rho_b}$ , ovvero il rapporto tra la densità del solido

cellulare  $\rho$ , e la densità del materiale dal quale è ottenuto  $\rho_b$ . Anche se la dimensione delle celle è importante, un parametro più importante ancora è rappresentato dalla loro forma. La forma delle celle in uenzerà il solido, il cui comportamento potrà essere isotropo o anisotropo a seconda dei casi. Un importante distinzione tra i solidi cellulari è rappresentata da:

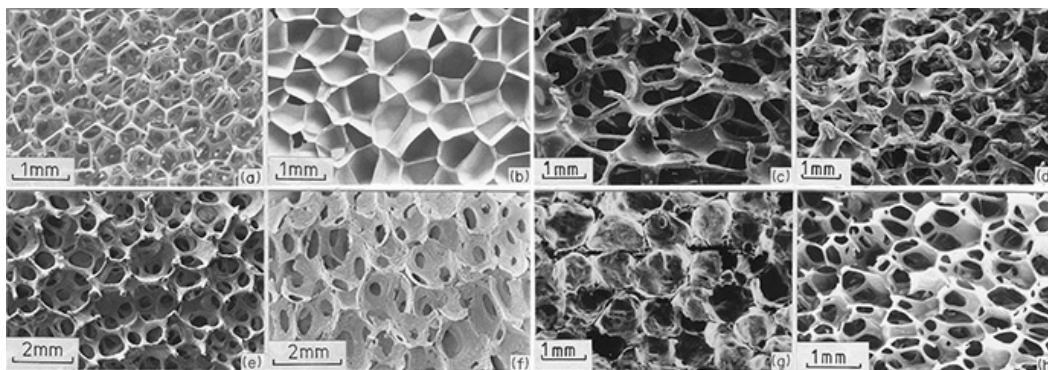
- solidi cellulari tridimensionali
- solidi cellulari bidimensionali

Una altra importante distinzione riguarda i solidi cellulari tridimensionali, i quali possono essere distinti in:

- solidi cellulari a celle aperte
- solidi cellulari a celle chiuse

Come si può facilmente intuire, questi ultimi sono caratterizzate da celle separate l'una dalle altre da pareti divisive più o meno spesse a seconda dei casi. Ovviamente tale caratteristica andrà ad in uenzerare il comportamento meccanico della schiuma, come viene illustrato nel paragrafo 2.3 La schiuma di polistirolo ricade in questa categoria. In genere una schiuma a celle chiuse può presentare le forme di disparate, dal tetraedro al prisma rettangolare o esagonale. Da un punto di vista geometrico è comodo pensare una cella come un insieme di vertici uniti da spigoli e avvolti da facce che delimitano la cella stessa.

Esistono diverse metodologie per ottenere un solido cellulare. In genere una schiuma formata da un polimero è ottenuta introducendo bolle di gas all'interno del monomero liquido o del polimero caldo. Vengono quindi fatte crescere fin quando non si stabilizzano. Infine l'intero composto viene fatto reticolare. In particolare la schiuma di EPS è ottenuta unendo assieme delle sfere precedentemente espanse di stirene attraverso un processo di sentirizzazione.



**Figura 2.1:** Varietà di strutture di solidi cellulari [11]

## 2.2 Le caratteristiche meccaniche della schiuma di EPS

Uno dei test più utili per ricavare informazioni sulle proprietà meccaniche della schiuma di polistirolo è il test di compressione, tale test è di tipo quasi statico. Si

sottopone un provino cilindrico di schiuma EPS a compressione e si ricavano quindi i valori di deformazione e stress. quello che si ottiene è una curva il cui andamento presenta caratteristiche analoghe a quelle riportate in figura 2.2 Tale curva presenta tre zone ben distinte:

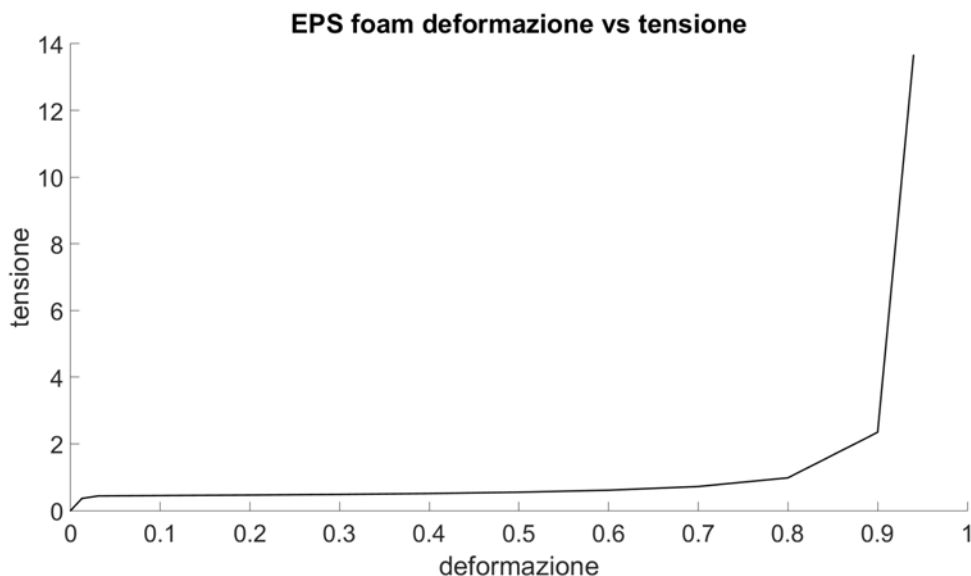
- Zona elastica, lineare il più delle volte
- Zona plastica, indicata con termine plateau
- Zona di densificazione o compattamento

La zona di comportamento elastico è limitata alle piccole deformazioni, solitamente inferiori al 5% e dipendente della tipo di solido cellulare, il più delle volte è lineare, se si toglie il carico al provino non rimane deformazione residua. La pendenza della curva corrisponde al valore del modulo elastico di compressione  $E$ . L'area di maggior interesse per quel che riguarda l'utilizzo della schiuma di EPS per l'assorbimento di energia, è rappresentata dalla zona plastica detta *plateau*. Infine nella terza zona, detta di densificazione, si ha che la tensione nel provino aumenta vertiginosamente per piccole variazioni di deformazione a seguito dell'addensamento delle celle ormai completamente collassate. Di fatto nella zona di densificazione il solido cellulare si comporterà come il materiale pieno. I meccanismi di deformazione saranno approfonditi nel paragrafo 2.3.

Come appena accenato i diagrammi di tensione e deformazione sono ottenuti da test di compressione i quali sono test quasi statici. Negli ultimi anni sono stati condotti però anche test di natura dinamica, andando ad incrementare la velocità di deformazione del provino a compressione. Quello che risalta da tali studi è che l'andamento della curva risulta essere sempre lo stesso, nel senso che continuano a presentarsi in modo ben distinto le tre aree: elastica, plastica e di addensamento. Anche il modulo di elasticità  $E$  rimane sostanzialmente invariato anche se alcuni studi hanno evidenziato però piccole variazioni del modulo di compressione elastica  $E$  per velocità di deformazione molto elevate ( $\dot{\epsilon} \geq 390s^{-1}$ ). Quello che varia nei test dinamici è invece la tensione che tende ad aumentare all'aumentare della velocità di deformazione, cosa che determina un innalzamento della curva e quindi del *plateau* con conseguente aumento di energia assorbita dal provino di polistirolo [12]. Tale innalzamento della curva di compressione determina però allo stesso tempo uno spostamento per punto per cui si ha collasso delle celle verso valori di deformazione inferiori.

### 2.2.1 parametri caratteristici

Se si analizza il comportamento della schiuma di EPS da un punto di vista macroscopico si può notare come i due parametri principali che influenzano il suo comportamento siano la densità  $\rho$  e il modulo elastico  $E$ . In particolare la densità influenza l'altezza della curva deformazione-tensione, a densità maggiori corrispondono tensioni di compressione maggiori, vedi figura 2.3. Ciò ha come conseguenza il fatto che la schiuma è in grado di assorbire un maggiore ammontare di energia, questo però a discapito di una peggiore distribuzione del carico. Andare a variare questi parametri, da un punto di vista microscopico significa andare a variare la struttura



**Figura 2.2:** Andamento della curva deformazione-stress per una schiuma di polistirolo soggetta a compressione

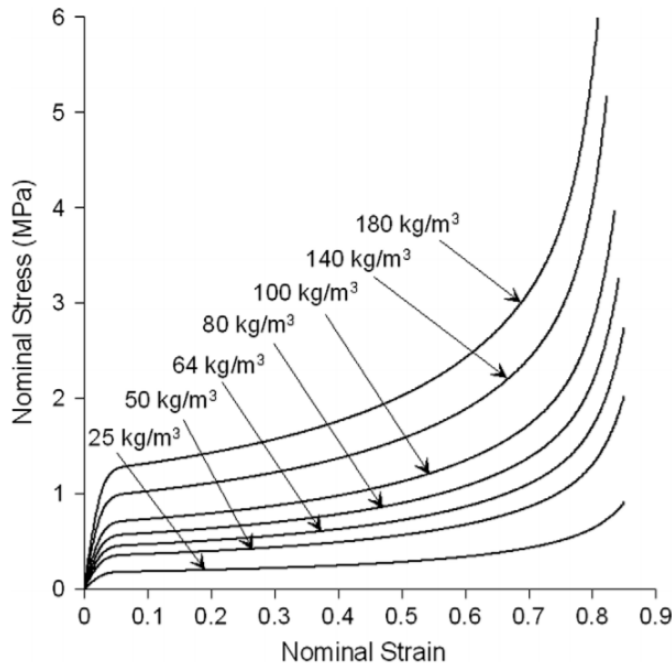
interna della schiuma la quale è costituita da una serie di celle, caratterizzate da un certo ingombro e un certo spessore delle pareti. Per quel che riguarda le simulazioni FEM al computer svolte per quella tesi l'approccio che si adotterà sarà di tipo macroscopico, nel senso che si studierà il comportamento meccanico di schiume caratterizzate da un certo modulo elastico e da una certa densità. Ciò detto, risulta molto importante lo studio microscopico per indagare su quali sono i fenomeni coinvolti nei meccanismi di deformazione.

### 2.3 meccanismi di deformazione

La schiuma di EPS altro non è che un solido costituito da tante celle elementari chiuse. E' quindi evidente come le sue caratteristiche meccaniche dipendano essenzialmente dalle caratteristiche intrinseche del materiale che la costituiscono e dalla struttura della schiuma stessa, in termini di dimensione, forma, distribuzione del materiale e spessore delle pareti delle celle [10]. Si è accennato nel paragrafo precedente come la densità relativa  $\frac{\rho}{\rho_b}$  sia uno dei parametri fondamentali che caratterizza la schiuma, essa infatti riveste un ruolo importante nei meccanismi di deformazione. Come evidenziato in precedenza, si considera l'andamento tipico di una curva rappresentata tensione-deformazione di una schiuma di polistirolo, si possono individuare tre macro aree. Il diverso comportamento della schiuma è dovuto ai diversi meccanismi di deformazione che intervengono nel corso della sollecitazione a compressione. Di seguito vengono descritti i meccanismi di deformazione che si verificano a seconda della zona del grafico di deformazione-tensione.

**zona elastica** Per descrivere il comportamento lineare elastico a compressione di una schiuma isotropa come quella di EPS sono necessari due parametri. Solita-





**Figura 2.3:** Andamento della curva deformazione-stress di compressione al variare della densità della schiuma di EPS [14]

mente scelti tra modulo di Young  $E$ , modulo di taglio  $G$  e coefficiente di Poisson  $\nu$ . Tale zona ha un'ampiezza che solitamente per schiume di EPS varia tra il 3-5% della deformazione totale, sono tre i meccanismi di deformazione che entrano in gioco in tale e sono:

- essione dei bordi della cella;
- deformazione delle pareti delle celle chiuse;
- compressione del gas intrappolato nella cella;

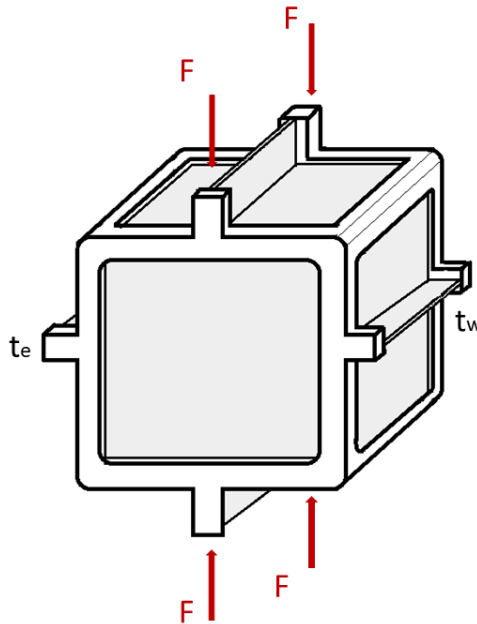
Con riferimento alla figura 2.4, se la cella viene sottoposta ad un carico di compressione i suoi spigoli andranno incontro a fenomeni di *bending* esattamente come accade per una trave incernierata agli estremi, a seguito di ciò le pareti andranno incontro a fenomeni di stiratura e il gas infine risulterà compresso. Tenuto conto di questi tre fenomeni la pendenza della curva nel tratto elastico, che coincide con il modulo di elasticità è dato dalla seguente equazione (2.1)

$$\frac{E}{E_b} = \frac{E_e}{E_b} + \frac{E_g}{E_b} + \frac{E_w}{E_b} = \phi^2 \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_b} \right)^2 + \frac{p_o \cdot (1 - 2\nu)}{\left( 1 - \frac{\rho}{\rho_b} \right) \cdot E_b} + (1 - \phi) \cdot \frac{\rho}{\rho_b} \quad (2.1)$$

dove:

- $E_e$  è il contributo degli spigoli al modulo elastico;

- $E_g$  è il contributo del gas al modulo elastico;
- $E_w$  contributo delle pareti al modulo elastico;
- $P_o$  è la pressione del gas presente nella cella;
- $\phi$  la frazione di massa piena negli spigoli
- $\nu$  il coefficiente di Poisson
- $E_b$  il modulo di elasticità del materiale da cui si è ottenuta la schiuma



**Figura 2.4:** Modello di cella elementare della schiuma

Per il modulo di taglio si ottiene invece la seguente equazione:

$$\frac{G}{E_b} = \frac{3}{8} \left( \phi^2 \left( \frac{\rho}{\rho_b} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho}{\rho_b} \right) \quad (2.2)$$

Il coefficiente di Poisson viene invece preso solitamente uguale a  $\nu = \frac{1}{3}$ , infatti quest'ultimo risulta non dipendere in maniera significativa dalla densità relativa, al contrario di quanto avviene per il modulo di Young e il modulo di taglio. Il termine di densità relativa può essere espresso attraverso lo spessore delle pareti  $t_w$  e degli spigoli  $t_e$  dalla seguente equazione (3.2)

$$\frac{\rho}{\rho_b} = 1.2 \cdot \left( \left( \frac{t_e}{l} \right)^2 + 0.7 \cdot \left( \frac{t_w}{l} \right)^2 \right) \quad (2.3)$$

**plateau** Finita la zona elastica, si verifica all'interno della schiuma il collasso delle celle, tale collasso è di tipo plastico per la schiuma di polistirolo e quindi irreversibile, di fatto questa zona della curva è la responsabile dell'assorbimento dell'energia di deformazione. L'energia per unità di volume vale (2.4)

$$u = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (2.4)$$

L'energia specifica quindi altro non è che l'area sottesa dal grafico deformazione-tensione. Il valore di tensione per cui si ha collasso della cella è dato dall'equazione (2.5).

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{yb}} = \frac{\sigma_c^h}{\sigma_{yb}} + \frac{\sigma_c^w}{\sigma_{yb}} + \frac{\sigma_c^g}{\sigma_{yb}} = 0.3 \cdot \phi^{3/2} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_b} \right)^{3/2} + (1 + \phi) \frac{\rho}{\rho_b} + \frac{(P - P_o)}{\sigma_{yb}} \quad (2.5)$$

- $\sigma_c^h$  contributo di tensione dei bordi, considerati come incastri;
- $\sigma_c^w$  contributo di tensione delle pareti;
- $\sigma_c^g$  contributo di tensione del gas compresso;

C'è da sottolineare che non tutti i solidi cellulari presentano un plateau plastico come il polistirolo espanso, esistono anche schiume non plateau elastico come ad esempio

**addensamento** In questa zona del grafico deformazione-tensione le celle chiuse risultano completamente collassate, le pareti giungono a contatto tra loro e il materiale base risulta compresso. Le caratteristiche meccaniche della schiuma tendono a quelle del materiale base, questo determina un'impennata della curva deformazione-tensione

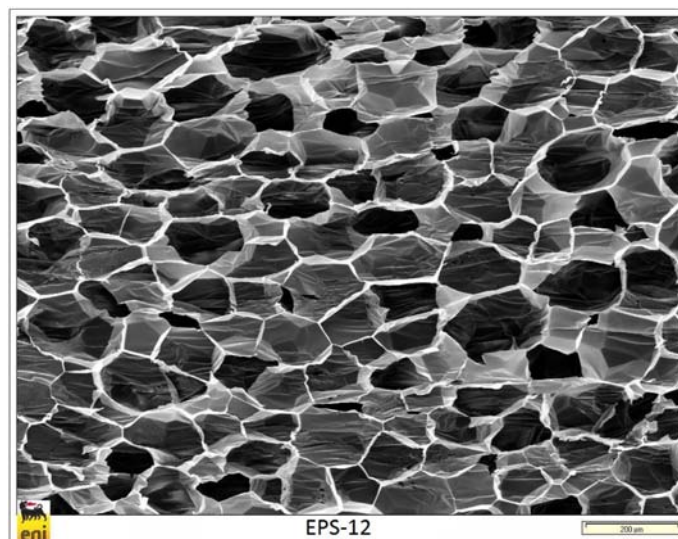
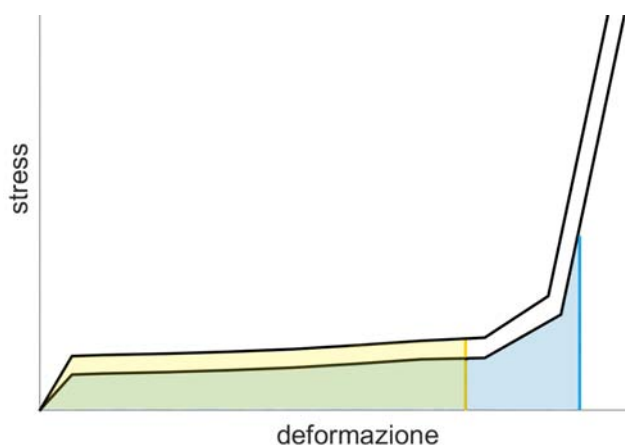


Figura 2.5: Struttura interna di una schiuma di polistirolo [13]

## 2.4 EPS foam come sistema di dissipazione dell'energia

Uno degli utilizzi principali della schiuma di EPS è quello di dissipare l'energia generata dagli urti. Per una data configurazione trovare la schiuma che meglio assorbe un'impatto significa trovare quella schiuma in grado di assorbire l'energia cinetica con il minor trasferimento di carico. E' quindi evidente che la schiuma ideale è caratterizzata da  $\sigma_c$  appena al di sotto della tensione critica di danno nel caso specifico e raggiunge un valore di deformazione massima pari al limite di deformazione che caratterizza la zona del plateau.



**Figura 2.6:** Confronto energia assorbita da due schiume di EPS di densità diversa, la schiuma più efficiente risulta essere quella che lavora più in prossimità del limite della zone di *plateau*

Esistono diversi metodi per determinare l'efficacia di una schiuma, di seguito vengono accenati i principali.

**Janssen factor** Tale metodo, al fine di determinare l'efficacia con la quale un urto viene assorbito da una data schiuma, compara il picco di decellazione massima  $a_p$  risultante da test dinamico con pendolo, con un decellazione ideale. La decellazione ideale è definita come l'accelerazione costante  $a_i$  e vale quindi:

$$a_i = \frac{v^2}{2t} \quad (2.6)$$

Pertanto il fattore di Janssen è definito come:

$$J = \frac{a_p}{a_i} \quad (2.7)$$

Dipende quindi dall'energia dell'impatto. Risulta molto utile per comparare la capacità di assorbire energia da parte di differenti schiume

**Cushion factor** Data l'esistenza di un enorme ammasso dati relativi alle curve deformazione stress a compressione, risulta comodo correlare l'efficienza con cui l'energia viene assorbita, con tali curve. Viene quindi definito il *Cushion Factor* per una data schiuma definito come il picco di stress diviso per l'energia assorbita:

$$C = \frac{\sigma_p}{u} \quad (2.8)$$

**Curve di Rusch** La curva stress-deformazione può essere definita attraverso un fattore di forma  $\psi(\epsilon)$ , che per una data schiuma è definita empiricamente da quattro costanti empiriche:

$$\psi(\epsilon) = m\epsilon^n + r\epsilon^s \quad (2.9)$$

Pertanto la curva può essere definita attraverso equazione:

$$\sigma = E\psi(\epsilon)\epsilon \quad (2.10)$$

Rusch definisce K come l'inverso di del Janssen factor. Se con I si indica l'energia dell'impatto normalizzata per E, il rapporto I/K fornisce il picco di stress generato dalla schiuma, il tutto normalizzato per E, difatti:

$$\frac{I}{K} = \frac{mv^2}{2AtE} \cdot \frac{2ta_p}{AE} = \frac{ma_p}{AE} = \frac{\sigma_p}{E} \quad (2.11)$$

Sia I che K risultano legati al fattore di forma  $\psi(\epsilon)$  [11]

Come già accennato nel paragrafo 1.2.2 lo scopo dell'imbottitura nei caschi è quella di assorbire la maggior parte dell'energia che scaturisce dall'impatto. Il che significa che l'energia cinetica deve essere convertita in energia di deformazione della schiuma. Tale energia viene trasmessa allo strato di imbottitura dal guscio esterno, che ha seconda del materiale che lo costituisce, è in grado di assorbire una quantità più o meno grande di energia ma comunque inferiore al 30%. Il materiale più utilizzato a livello commerciale per realizzare il sottosistema dedito all'assorbimento di energia è appunto la schiuma di polistirolo (EPS), la quale attraverso opportuni meccanismi di deformazione plastica, illustrati precedentemente, è in grado di assorbire l'energia dell'urto. Come evidenziato da numerosi studi [2], schiume con densità maggiore sono in grado di assorbire una maggiore quantità di energia ma trasmettono alla testa carichi maggiori. Schiume con densità minori invece potenzialmente possono assorbire energie minori ma sono in grado di distribuire il carico su una superficie maggiore, per cui la quantità di schiuma che effettivamente partecipa all'assorbimento di energia risulta essere maggiore e di conseguenza i carichi di accelerazione trasferiti alla testa del motociclista sono inferiori

\* \* \*



## Capitolo 3

# Standards e Criteri di infortunio

Un casco affinché possa essere messo in commercio deve essere in grado di rispettare una serie di standard di sicurezza, e non solo, emanati da differenti enti, governativi o meno, nei vari stati

### 3.1 Standards di sicurezza

La normativa in fatto di standards, non esclusivamente, di sicurezza varia di paese in paese. All'interno dell'Unione Europea e degli Stati Uniti di America gli standards sono rilasciati dai governi, in altri paesi, invece, sono organizzazioni private e non governative ad occuparsi della materia. Pur variando di stato in stato, lo scopo degli standards, per quel che concerne la sicurezza, è quello di riuscire ad associare al casco un valore che identifichi la capacità di assorbire l'energia dell'impatto e impedire la perforazione da parte di oggetti. Ovviamente le normative riguardano anche altri aspetti del casco come ad esempio: comfort, vestibilità, peso, ventilazione e etc. Nonostante presentino delle differenze tutti le normative si basano su tre principi fondamentali, che il casco deve rispettare, per definire i parametri di sicurezza:

- deve essere in grado di assorbire un determinato ammontare di energia di impatto
- deve rimanere allacciato alla testa per tutta la durata dell'urto
- deve resistere alla penetrazione di oggetti contundenti

Esempi di normativa in materia di standards di sicurezza dei caschi sono la ECE 22/0.5 in Europa, la DOT FMVSS218 e la Snell M2010 negli Stati Uniti. Da caratteristica che accomuna tutte le normative è quella di non tenere in considerazione dei parametri di valutazione di impatto delle accelerazioni rotazionali le quali sono ormai da tempo note come grave causa di infortuni al cervello. Altri studi ancora sono andati andati a stimare le probabilità di trauma cranico al variare delle accelerazioni

## 3.2 Principali criteri di infortunio

In questo paragrafo vengono illustrati quali sono i principali parametri ingegneristici di cui gli standards tengono conto al fine di quantificare l'efficienza del casco nell'assorbire l'energia cinetica dell'impatto e quale sia il loro significato.

### 3.2.1 Pick Load Acceleration PLA

Il Pick Load Acceleration (PLA) è il valore massimo della risultante delle accelerazioni traslazionali del centro di massa della falsatesta (3.1).

$$PLA = a(t)_{max} \quad (3.1)$$

E' espresso come un numero moltiplicato per g, dove g è l'accelerazione gravitazionale ( $9.81 \frac{m}{s^2}$ ). Di fatto quindi ha il solo significato fisico di accelerazione subita dal centro di massa della falsatesta a seguito dell'impatto avvenuto ad una data velocità e non tiene conto di nessun altro parametro quale ad esempio la durata dell'impatto. Il limite per tale valore imposto dalla normativa EU è di 275g. Diversi studi hanno evidenziato che per valori ben inferiori ci possono essere già possibilità di infortunio. Ad esempio si è stimato una probabilità del 5% di rischio di frattura cranica per valori di PLA pari a 180g, probabilità che sale al 40% per valori di PLA pari a 250g [2]. Altri studi ancora sono andati a stimare le probabilità di trauma cranico al variare delle accelerazioni traslazionali. Ne è risultato che già per valori di accelerazione di  $559 \frac{m}{s^2}$  del centro di massa del capo c'è una probabilità del 25% che riscontrare un trauma cranico.

### 3.2.2 Head Injury Criterion HIC

L' Head Injury Criterion HIC, letteralmente Criterio di infortunio della testa, è un altro parametro utilizzato per giudicare la bontà del casco nel assorbire l'energia d'impatto, è definito come da equazione (3.2)

$$HIC = \left( \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right)_{max} \quad (3.2)$$

dove  $a(t)$  è l'accelerazione del centro di massa della falsa testa,  $(t_2 - t_1)$  è la durata totale dell'impatto che deve essere  $\leq 36$  ms. A differenza del PLA questo indice tiene conto anche della durata dell'impatto. La normativa europea prevede un limite di HIC, per la conformità, pari a 2400, diversi studi sottolineano come già per un valore di 1000 ci possano essere infortuni anche severi alla testa con una probabilità di infortunio fatale del 8.5% [2]. Anche per tale parametro non vengono tenute da conto le accelerazioni rotazionali, ciononostante l' HIC risulta essere oggi il parametro di valutazione agli impatti più utilizzato dai vari standard

## 3.3 La normativa europea

All'interno dell'Unione Europea gli standards di sicurezza sono regolamentati dalla normativa ECE 22 del 1982, la quale nel corso degli anni ha subito numerose modifiche fino ad arrivare alla ECE 22/05 del 2000 che come novità principale ha inserito



i test sulla mentoniera del casco e l'attuale ECE 22/06 introdotta sul finire del 2017. Ciò si è reso necessario in quanto molti studi hanno evidenziato come elemento del casco sia il più soggetto ad impatti [15] La normativa prevede tutta una serie di test, i quali tengono conto sia dei criteri di sicurezza sia di altri parametri come il costo, la ventilazione, la visione, il comfort, etc.

### 3.3.1 Il test di impatto

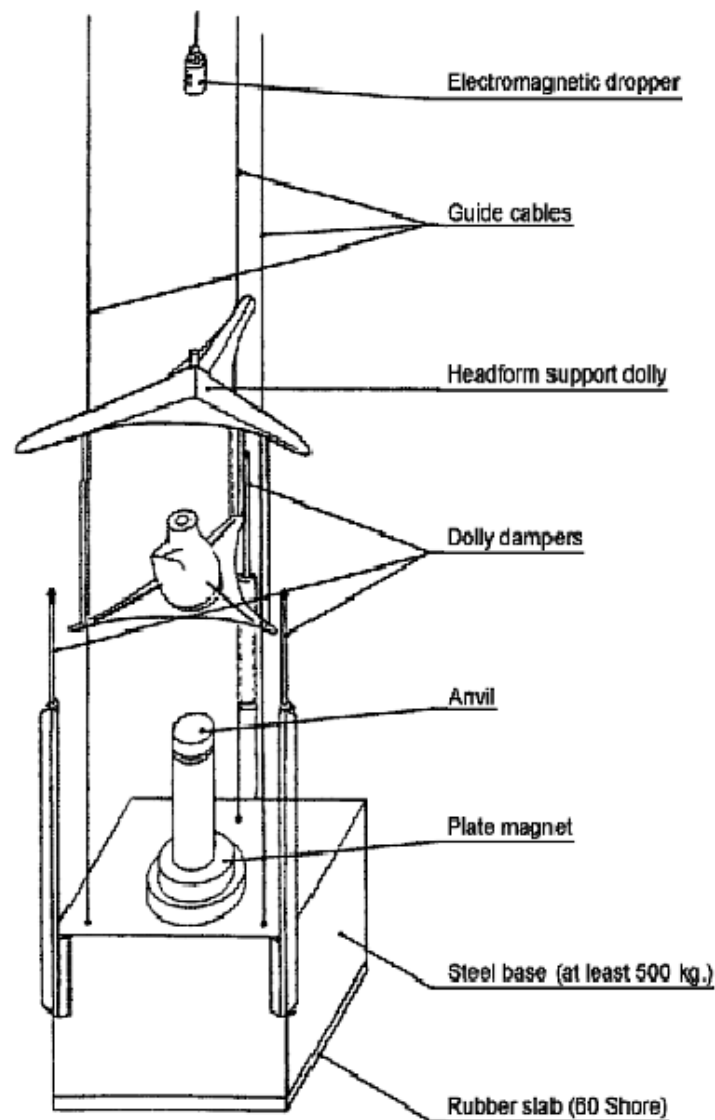


Figura 3.1: Apparato per il test di impatto [18]

Per quel che concerne i criteri di sicurezza un casco deve essere sottoposto ad una serie di test di omologazione. Tra questi vi è il test d'impatto. La normativa prevede di misurare la capacità del casco di assorbire energia, attraverso la registrazione di come varia nel tempo l'accelerazione del centro di massa della falsatesta inserita nel casco stesso e lasciata cadere attraverso un sistema guidato di caduta libera a una specifica velocità d'impatto contro un incudine fissata. L'apparato di test è riportato in figura 3.1 e comprende:

- incudine fissata alla base
- sistema guidato di caduta libera
- sistema mobile di supporto della falsatesta
- falsatesta con accelerometro tridimensionale
- sistema di centratura dell'incudine

Tale test prevedono per prima cosa una verifica della copertura e l'individuazione dei punti di impatto. La verifica della copertura prevede che si monti il casco sulla falsatesta e che questo copra l'area di superficie minima, tale area deve risultare coperta sia dalla calotta sia dall'imbottitura.

I punti d'impatto da individuare sul casco sono riportati nella figura 3.3 e in totale sono sei

- due punti laterali indicati con X
- punto frontale indicato con B
- punto posteriore indicato con R
- punto all'apice indicato con P
- punto al centro della mentoniera indicato con S

Prima della prova di omologazione i caschi vengono condizionati a temperature di  $50^{\circ}\text{C}$  -  $20^{\circ}\text{C}$  +  $25^{\circ}\text{C}$  per un periodo che varia dalle 4 alle 6 ore. Il casco viene quindi calzato sulla falsatesta, la normativa prevede una serie di falsateste in metallo con frequenza di risonanza superiore a 3000 Hz, al variare della taglia del casco, vedi tabella 3.1.

I caschi vengono quindi montati sul sistema guidato di caduta libera il quale li lascerà cadere ad una velocità compresa tra i  $7.5\frac{\text{m}}{\text{s}}$  e i  $7.65\frac{\text{m}}{\text{s}}$  (il sistema di caduta libera deve garantire il raggiungimento di una velocità minima pari al 95 % di quella prevista dalla norma) contro un incudine per le diverse posizioni di impatto. L'unica posizione per cui la velocità di impatto risulta essere differente e vale  $5.5\frac{\text{m}}{\text{s}}$  è la posizione S sulla mentoniera. Tali velocità vengono misurate a una distanza compresa tra 1 e 6 cm dalla zona di impatto con l'incudine. L'incudine può essere di due tipi: piatta o Kerbstone. L'incudine piatta ha una facciata circolare del diametro di 130 mm. L'incudine Kerbstone presenta uno spigolo, a differenza della prima, e dovrebbe simulare lo spigolo di un marciapiede. Le caratteristiche geometriche dell'incudine kerbstone sono specificate nella normativa. La determinazione



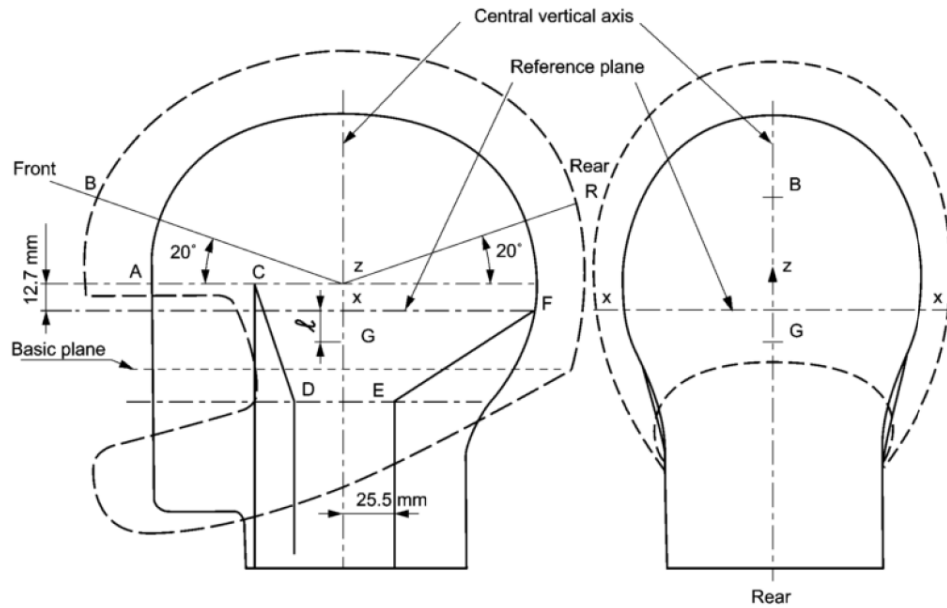
**Figura 3.2:** Esempio di casco montato su falsatesta per test di omologazione [19]

**Tabella 3.1:** False teste impiegate nei test di impatto .

falsetesta da test di impatto		
Simbolo	Taglia (cm)	Massa (kg)
A	50	3.1
E	54	4.1
J	57	4.7
M	60	5.6
O	62	6.1

dell'accelerazione del centro di gravità della falsatesta durante la prova di impatto è possibile grazie al montaggio di un accelerometro triassiale sulla falsatesta. Tale accelerometro può avere un peso massimo di 50 g, al fine di non influenzare la misura, ed deve essere in grado di misurare un valore di 2000g senza danneggiarsi. Un casco non risulta omologabile se raggiunge durante il test di impatto valori superiori a [18]:

- PLA = 275g
- HIC = 2400



**Figura 3.3:** Punti di impatto individuati dalla normativa ECE 22/05 [18]

Ovviamente la normativa include anche altri test che non riguardano esclusivamente gli impatti, tutte le componenti del casco sono soggette a collaudi specifici. Un esempio è il test di omologazione della visiera oppure il test di rigidità, dove il casco viene schiacciato tra due piastre parallele lungo l'asse longitudinale. Nella tabella 3.2 vengono messe a confronto i parametri valutati dagli enti che emanano le normative per quel che riguarda le prove di impatto[2].

**Tabella 3.2:** Confronto degli standard ECE22.05 EU con altri enti .

Standard	Confronto Standard			
	M2010 Velocità	DOT Velocità	BSI 6658 Velocità	ECE22.05 Velocità
Criterio impatto				
singolo	$7.75 \frac{m}{s}$	$6.0 \frac{m}{s}$	$7.5 \frac{m}{s}$ o $7.0 \frac{m}{s}$	$7.5 \frac{m}{s}$
doppio	$6.78 \frac{m}{s}$	$5.2 \frac{m}{s}$	$7.0 \frac{m}{s}$ o $5.0 \frac{m}{s}$	-
Criterio di Failure				
PLA	275g	400g	300g	275g
HIC	-	-	-	2400

E' interessante notare come le normative per quel che riguarda gli impatti siano molto differenti. Ad esempio tra quelle prese ad esempio la normativa ECE22.05 è l'unica che considera l'impatto singolo sul casco ma allo stesso tempo è l'unica a

tenere da conto il parametro HIC. Anche le velocità di impatto variano da ente a ente. Risulta difficile dire quale sia la migliore a livello di sicurezza, in quanto, dovendo per forza garantire una certa ripetibilità della procedura, nessuna normativa è in grado di andare a ricreare le esatte dinamiche di un impatto reale. Inoltre i parametri utilizzati per valutare le proprietà di assorbire energia da parte casco non tengono conto delle accelerazioni rotazionali, come già accennato, che sempre si verificano in caso di caduta del motociclista e che spesso si rivelano essere una delle maggiori cause di danni cerebrali.

\* \* \*



## Capitolo 4

# Investigazione numerica della schiuma di EPS: descrizione modelli

Lo scopo di questa tesi è quello di andare a studiare il comportamento della schiuma di polistirolo in un dato casco motociclistico al variare della velocità di impatto e qualora si possibile andare a indicare una soluzione di ottimo tra le vare configurazioni o comunque ottenere delle indicazioni al fine di poter designare un desing di casco in grado di prevenire nei limiti del possibile infortuni alla testa. Per lo studio di tale fenomeno si sono eseguite una serie di simulazioni numeriche attraverso modelli agli elementi finiti (FEM). Lo strumento FEM nel corso degli anni sta aquisendo sempre maggiore importanza in quanto permette di ridurre notevolmente i costi in fase di progettazione riducendo il lavoro di prototizzazione al minimo indispensabile. Di seguito in questo capitolo sono riportate la decrizione dei modelli utilizzati e delle simulazioni, i risultati saranno riportati nel capitolo 5. Il software utilizzato per le simulazioni è LSDYNA<sup>®</sup>, mentre per quel che concerne le operazioni pre-processing e post-processing si è utilizza il software LS-PrePost<sup>®</sup>.

### 4.1 Modelli FEM del casco

I modelli utilizzati per lo studio del comportamento della schiuma di polistirolo sono essenzialmente due e sono caratterizzati da un desing differente:

- casco semplificato con singolo liner di assorbimento energia (modello A)
- casco semplificato con doppio liner di assorbimento energia (modello B)

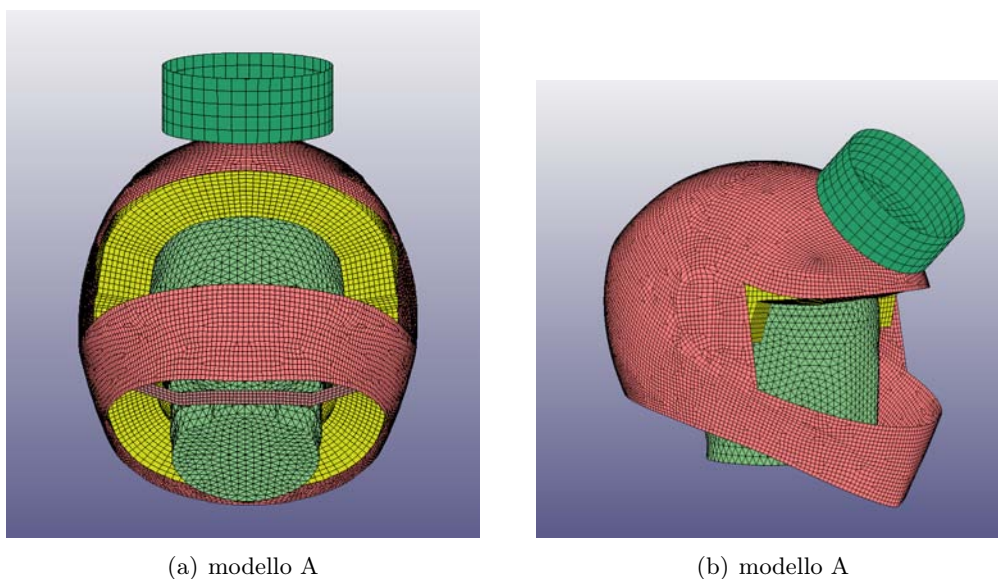
Lo spessore riservato al singolo liner del modello A, viene sostituito nel modello B, da un doppio liner di assorbimento caratterizzato da proprietà meccaniche differenti. Geometria e proprietà della calotta esterna rimangono invece le stesse.

### 4.1.1 Modello A: single absorbing liner

Questo modello è caratterizzato da un solo strato di imbottitura destinato ad assorbire l'energia dell'impatto. Il modello, nella sua interezza, è costituito dalle seguenti parti:

- Calotta esterna
- Imbottitura per assorbimento dell'energia dell'impatto
- Sistema di allacciatura
- Falsatesta rigida
- Incudine piatta

Il modello rappresenta un casco semplificato, questo significa che risultano assenti elementi tipici di ogni casco moderno, come il sistema di ventilazione e l'imbottitura a celle aperte destinata al miglioramento del comfort del capo del motociclista



**Figura 4.1:** Modello A da diverse angolazioni

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le varie parti che compongono il modello A di casco semplificato.

#### Calotta esterna

La calotta esterna, denominata *outershell* è realizzata con elementi shell, è caratterizzato da un comportamento lineare elastico implementato attraverso la proprietà *mat\_elastic* di LS-PrePost<sup>®</sup>. Tale proprietà è definita dai valori riportati nella tabella 4.1.



**Tabella 4.1:** Proprietà outershell del modello di casco sempliato .

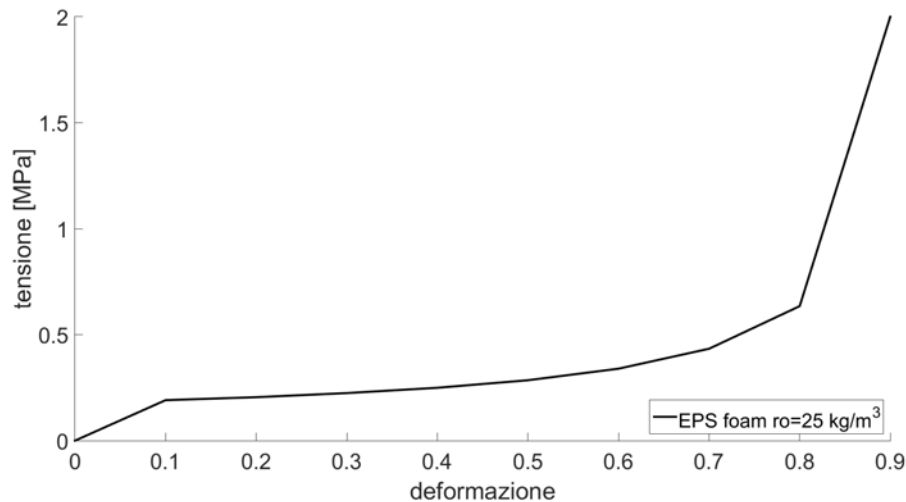
Proprietà		
densità $\rho$	modulo elastico E	coeff. Poisson $\nu$
$\frac{kg}{m^3}$	GPa	-
1200	7.25	0.3

### Imbottitura di schiuma di EPS

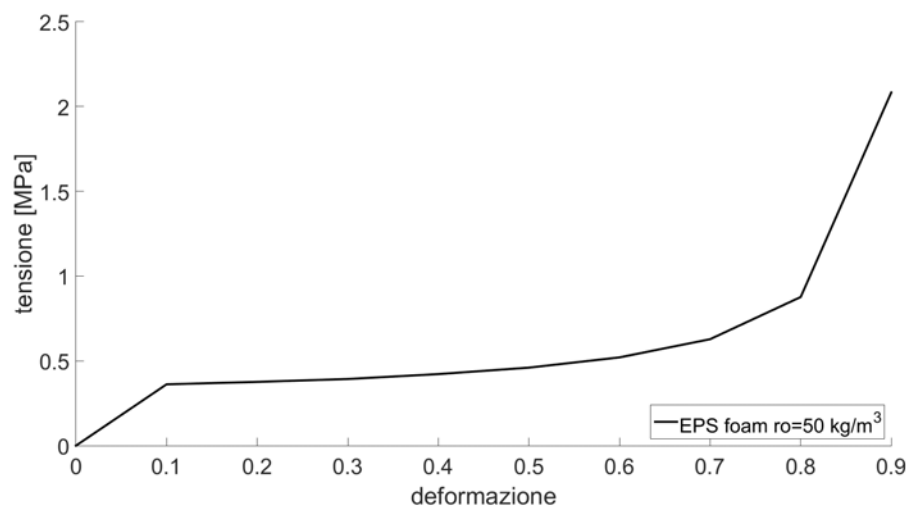
L'imbottitura in schiuma di polistirolo è realizzata con elementi tridimensionali caratterizzati dalla proprietà *mat\_crushable\_foam*. Tale proprietà è caratterizzata da un comportamento elastico perfettamente plastico. Per le simulazioni sono utilizzate cinque differenti schiume di polistirolo, il che ha portato alla realizzazione di cinque modelli differenti elencati in tabella 4.2.

**Tabella 4.2:** Elenco modelli A: imbottitura singola .

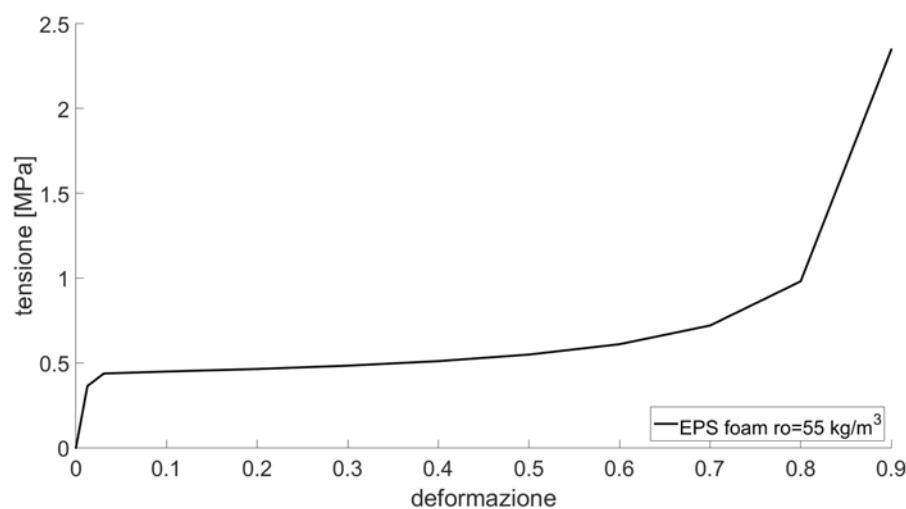
Proprietà	
modello	proprietà schiuma
A1	$\rho$ 25
A2	$\rho$ 50
A3	$\rho$ 55
A4	$\rho$ 64
A5	$\rho$ 80

**Figura 4.2:** Curva deformazione-tensione per la proprietà  $\rho 25$ 

Le varie proprietà schiume sono caratterizzate dai valori riportati in tabella 4.3, è inoltre necessario per le varie schiume andare a definire i valori delle rispettive curve deformazione-tensione a compressione. Le curve deformazione-tensione sono riportate nelle figure 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6. Da notare come la curva riportata nella figura 4.6, caratteristica della proprietà  $\rho 80$ , quella con la maggiore densità, sia la



**Figura 4.3:** Curva deformazione-tensione per la proprietà  $\rho_{50}$

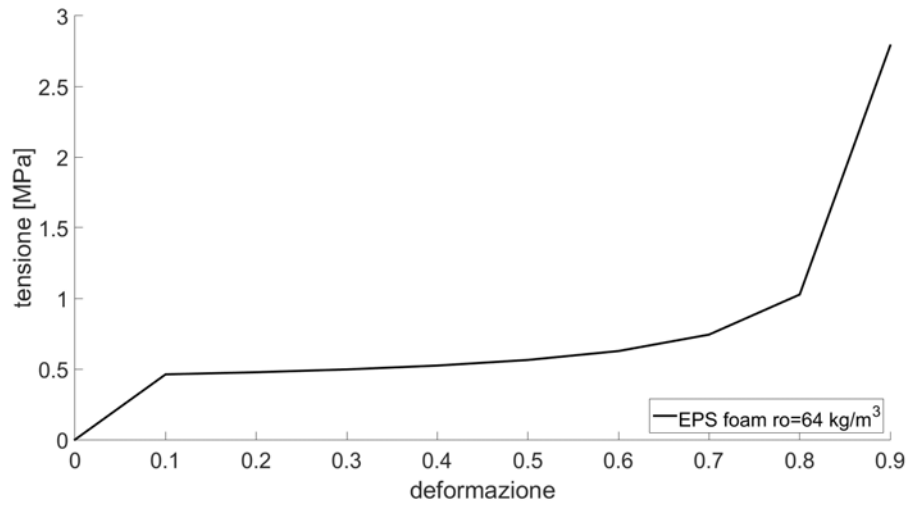


**Figura 4.4:** Curva deformazione-tensione per la proprietà  $\rho_{55}$

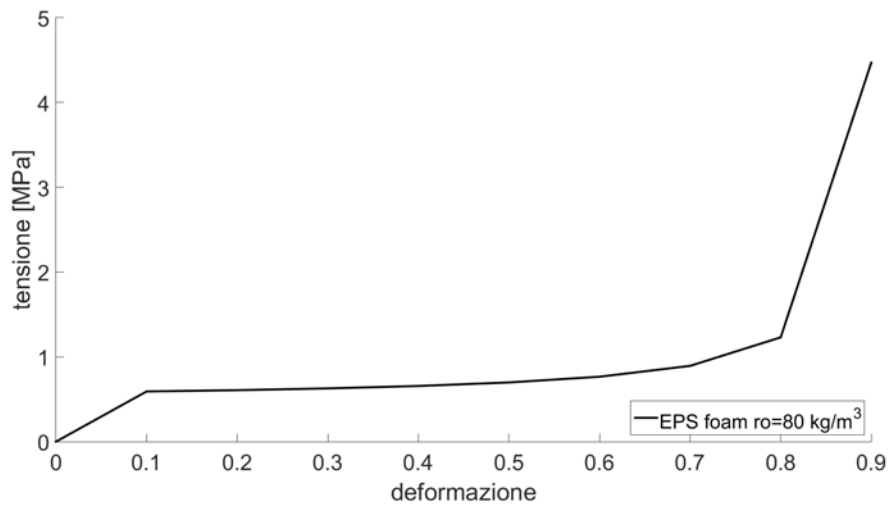
più alta di tutte. E' quindi potenzialmente quella in grado di assorbire il maggiore ammontare di energia sviluppata da un impatto. Al contrario la figura 4.2 rappresentante la proprietà  $\rho_{25}$ , è quella che potenzialmente può assorbire la minor quantità di energia e che in teoria dovrebbe trasferire il minor carico alla testa. Il valore del coefficiente di damping è assegnato di default pari a 0.05.

### Sistema di chiusura

Anche il cinturino del sistema di chiusura, denominato *chip*, è stato definito attraverso la proprietà *mat\_elastic*, come per il guscio esterno. I valori sono quelli riportati in tabella 4.4



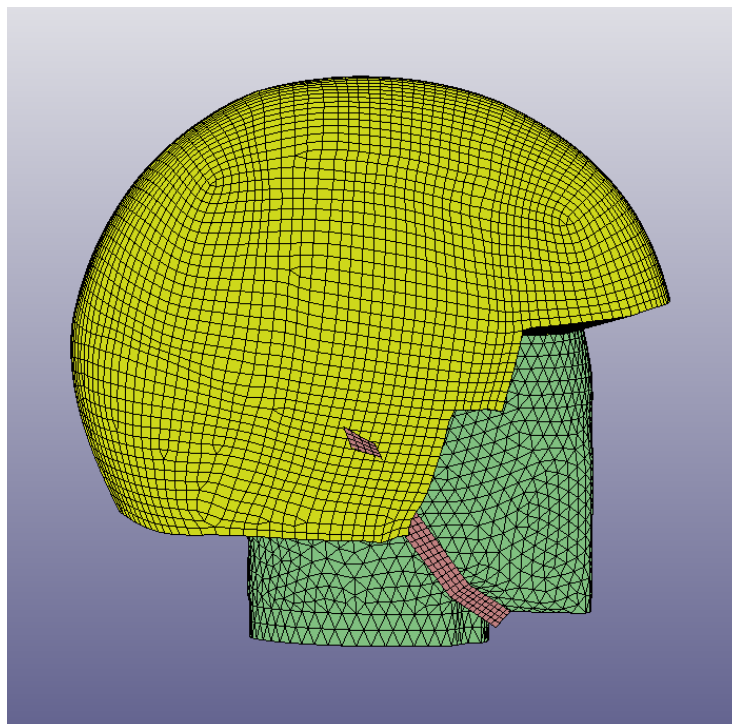
**Figura 4.5:** Curva deformazione-tensione per la proprietà  $\rho_{64}$



**Figura 4.6:** Curva deformazione-tensione per la proprietà  $\rho_{80}$

**Tabella 4.3:** Proprietà .

Proprietà				
Schiuma	Densità $\rho$ $\frac{kg}{m^3}$	Modulo elastico E MPa	Coef. Poisson	Ten. limite elastico MPa
$\rho_{25}$	25	4.45	0.001	0.191
$\rho_{50}$	50	16.58	0.001	0.362
$\rho_{55}$	55	19.94	0.001	0.440
$\rho_{64}$	64	26.72	0.001	0.460
$\rho_{80}$	80	41.27	0.001	0.592



**Figura 4.7:** Particolare del modello con imbottitura e cinturino montati sulla falsa testa

**Tabella 4.4:** Proprietà chin.

Proprietà		
densità $\rho$	modulo elastico E	coeff. Poisson $\nu$
$\frac{kg}{m^3}$	GPa	-
870	1	0.3

### Falsatesta rigida

la falsatesta, denominata *headform*, è stata definita attraverso la proprietà *mat\_rigid*. Tale proprietà fanno sì che la parte in esame viene trattata come un corpo rigido, la definizione del modulo elastico E, del coefficiente di Poisson sono essenziali al fine della determinazione di parametri all'interfaccia nel caso di contatto con altri corpi. I valori sono quelli riportati in tabella 4.5

**Tabella 4.5:** Proprietà headform.

Proprietà		
densità $\rho$	modulo elastico E	coeff. Poisson $\nu$
$\frac{kg}{m^3}$	MPa	-
1173	45	0.3

### Incudine Piatta

l'incudine piatta, denominata *at anvil*, è stata definita attraverso la proprietà *mat\_rigid*. Anche in questo caso vale quanto detto sopra, la definizione di  $E$  e  $\nu$  è fondamentale per la determinazione dei parametri di interfaccia in caso di contatto. I valori sono quelli riportati in tabella 4.6

**Tabella 4.6:** Proprietà *at anvil*.

Proprietà		
densità $\rho$	modulo elastico $E$	coeff. Poisson $\nu$
$\frac{kg}{m^3}$	MPa	-
7800	200	0.3

#### 4.1.2 Modello B: doppio layer di assorbimento

Questo modello è caratterizzato da un doppio strato di imbottitura destinato ad assorbire l'energia dell'impatto, costituito da due differenti proprietà *crushable foam*. Il modello è costituito dalle seguenti parti:

- Calotta esterna
- Imbottitura esterna per assorbimento dell'energia dell'impatto
- Imbottitura interna per assorbimento dell'energia dell'impatto
- Sistema di chiusura
- Falsatesta rigida
- Anvil piatto

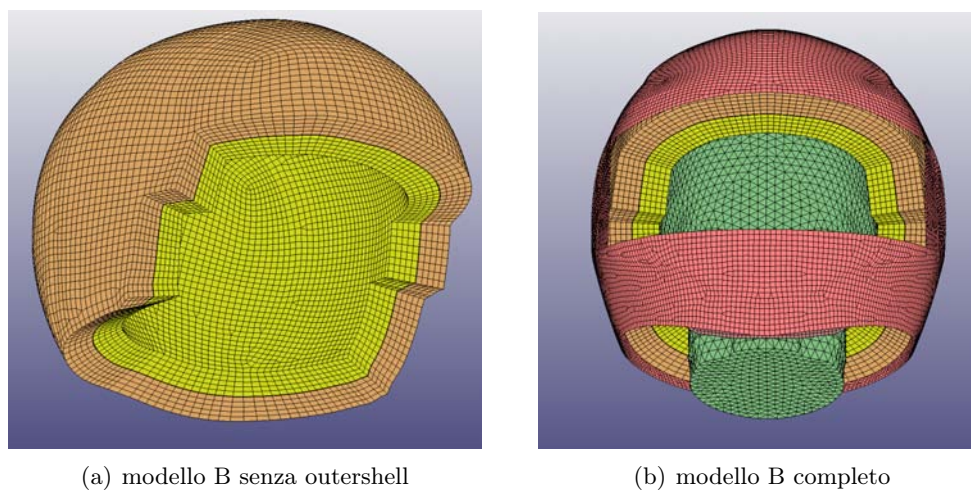
Alle quali vengono associate le seguenti proprietà, nell'ordine:

- *mat\_elastic*
- *mat\_crushable foam*
- *mat\_crushable foam*
- *mat\_elastic*
- *mat\_rigid*
- *mat\_rigid*

Le proprietà presentano gli stessi valori del paragrafo precedente. Il singolo strato di imbottitura del modello A viene quindi diviso in due parti di uguale spessore caratterizzate da due proprietà differenti. Il resto rimane invariato. Vengono quindi realizzati 20 modelli B facendo variare le proprietà *crushable foam* definite nel paragrafo precedente. I 20 modelli realizzati sono riportati nella tabella 4.7

**Tabella 4.7:** Elenco Modelli B con definizione proprietà.

Modelli		
modello	imbottitura interna	imbottitura esterna
<i>B1.1</i>	$\rho$ 25	$\rho$ 50
<i>B1.2</i>	$\rho$ 25	$\rho$ 55
<i>B1.3</i>	$\rho$ 25	$\rho$ 64
<i>B1.4</i>	$\rho$ 25	$\rho$ 80
<i>B2.1</i>	$\rho$ 50	$\rho$ 25
<i>B2.2</i>	$\rho$ 50	$\rho$ 55
<i>B2.3</i>	$\rho$ 50	$\rho$ 64
<i>B2.4</i>	$\rho$ 50	$\rho$ 80
<i>B3.1</i>	$\rho$ 55	$\rho$ 25
<i>B3.2</i>	$\rho$ 55	$\rho$ 50
<i>B3.3</i>	$\rho$ 55	$\rho$ 64
<i>B3.4</i>	$\rho$ 55	$\rho$ 80
<i>B4.1</i>	$\rho$ 64	$\rho$ 25
<i>B4.2</i>	$\rho$ 64	$\rho$ 50
<i>B4.3</i>	$\rho$ 64	$\rho$ 55
<i>B4.4</i>	$\rho$ 64	$\rho$ 80
<i>B5.1</i>	$\rho$ 80	$\rho$ 25
<i>B5.2</i>	$\rho$ 80	$\rho$ 50
<i>B5.3</i>	$\rho$ 80	$\rho$ 55
<i>B5.4</i>	$\rho$ 80	$\rho$ 64

**Figura 4.8:** Modello B: dettagli

## 4.2 Definizione dei contatti

Essendo il modello del casco caratterizzato da diverse parti, è necessario andare a definire come tali parti interagiscano tra loro, in particolare durante l'impatto. Nello specifico questo è stato eseguito attraverso il comando *Automatic Surface*

to Surface. E' il tipo di contatto consigliato dato che nelle simulazioni di crash frequentemente non è possibile prevedere l'orientamento delle parti l'una rispetto l'altra in quanto sono in gioco grandi deformazioni. Tale tipologia di contatto si basa un approccio basato sul *Penalty Method*, solitamente è fissato un limite di penetrazione tra i nodi presenti all'interfaccia di contatto, inoltre tale metodo è simmetrico e non fa distinzione tra nodi *slave* e *master* all'interfaccia. Per tale motivo viene definito *two way*, il controllo di penetrazioni tra i nodi delle due superfici a contatto viene eseguita in entrambe le direzioni, ovvero viene controllata sia penetrazione di *slave nodes* verso il segmento master, sia il vicesa. Per segmento si intende l'elemento individuato da almeno tre nodi con quale il nodo slave è previsto entri in contatto. Viene individuato attraverso opportuno algoritmo di prossimità. Diversamente nel metodo *one way* il check di penetrazione viene eseguito solo sui nodi *slave* preselezionati. Qualora venga superato il limite di penetrazione la forza all'interfaccia è settata a zero. La forza di contatto all'interfaccia viene trattata come una serie di molle lineari tra i nodi *slave* e il più vicino segmento *master*. Ne segue che la forza di contatto all'interfaccia tra le parti dipende della rigidezza della molla interposta. Tale rigidezza viene calcolata come segue. Per prima cosa l'algoritmo individua nodi *slave* e i corrispettivi segmenti *master* per vicinanza. All'interno di quest'ultimo viene individuato il punto di contatto, il quale deve soddisfare le condizioni imposte dalle equazioni 4.1 4.2:

$$\frac{\partial r}{\partial \xi}(\xi_c, \eta_c) \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \eta}(\xi_c, \eta_c) \cdot [t - r(\xi_c, \eta_c)] = 0 \quad (4.2)$$

Con riferimento alla figura 4.9, la condizione di penetrazione del nodo *slave*  $n_s$  nel segmento *master*  $s_i$  contenente il punto di contatto di coordinate locali  $(\xi_c, \eta_c)$  si verifica quando:

$$l = n_i [t - r(\xi_c, \eta_c)] < 0 \quad (4.3)$$

dove  $n_i = n_i(\xi_c, \eta_c)$  è la normale al segmento *master* nel punto di contatto. Quando la condizione di contatto si verifica all'interfaccia viene aggiunta una forza:

$$\mathbf{f}_s = -lk_i \mathbf{n}_i \quad (4.4)$$

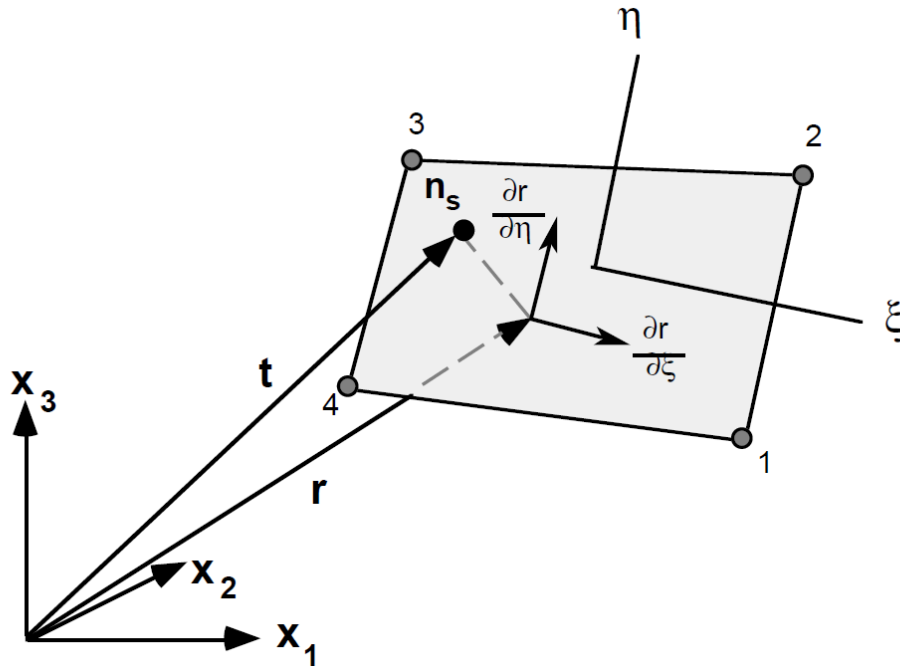
rispetto ai gradi di libertà del nodo *slave*, mentre rispetto ai nodi  $i$  del segmento *master* vale:

$$f_m^i = \phi_i(\xi_c, \eta_c) f_s \quad (4.5)$$

Il coefficiente di rigidezza del segmento *master*  $k_i$  dipende delle proprietà dell'elemento che contiene  $s_i$ , ovvero la rigidezza  $K_i$ , il volume  $V_i$  e l'area  $A_i$  e vale:

$$k_i = \frac{f_{si} K_i A_i^2}{V_i} \quad (4.6)$$

nel caso di elementi tridimensionali, mentre nel caso di elementi *shell*:



**Figura 4.9:** Nodo slave e segmento master all'interfaccia di contatto [20]

$$k_i = \frac{f_{si} K_i A_i}{\max(\text{shell\_diagonal})} \quad (4.7)$$

$f_{si}$  è un fattore di scala per la rigidezza dell'interfaccia e normalmente ha un valore di default pari a 0.1. Nell'ambiente di LS-DYNA<sup>®</sup> esistono varie opzioni per configurare tale valore. Questo si rende necessario tipicamente quando ci sono in gioco contatti che riguardano parti con proprietà meccaniche molto differenti. [20, 21]

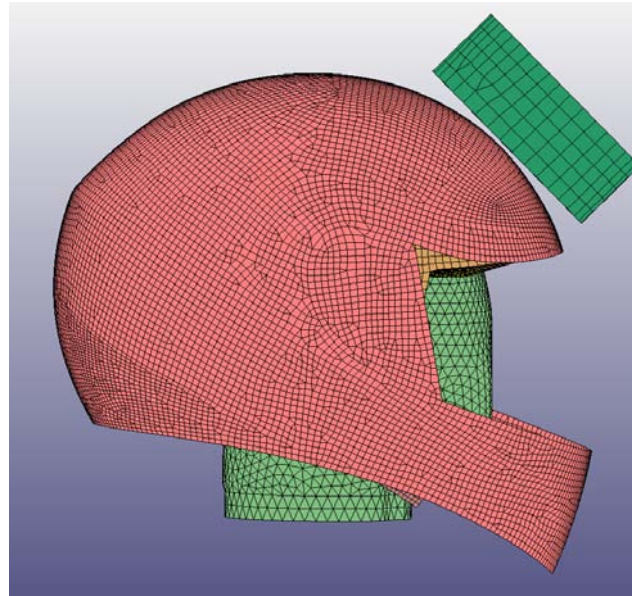
### 4.3 Descrizione delle simulazioni

Lo scopo delle simulazioni è quello di andare a studiare il comportamento della schiuma di EPS presente nel modello, al fine di capire come varia il comportamento meccanico del casco, a diverse velocità di impatto e, se possibile, andare a suggerire una soluzione di ottimo. Per fare questo si è andati a simulare il test di impatto previsto dalla normativa ECE, le simulazioni riguardano esclusivamente l'impatto, di tipo diretto, nel punto B, inclinato di 20 gradi, contro un'incudine piatta. Dato che lo scopo è quello di studiare il comportamento meccanico della schiuma non ci si è limitati esclusivamente alla velocità di impatto di  $7,5 \frac{m}{s}$ , ma si studiato il fenomeno per un range di velocità più ampio. I range di velocità d'impatto sono riportati nella tabella 4.8 per i vari modelli, per un totale di 105 simulazioni. Svolte le simulazioni attraverso il programma LS-DYNA<sup>®</sup>, in postprocessing si sono andate a ricavare le accelerazioni del centro di massa della falsa testa e Head Injury Criterion (HIC).



**Tabella 4.8:** Elenco delle simulazioni per modelli A e B.

Modello	Simulazioni	
	Velocità di impatto $\frac{m}{s}$	
A	5.0 - 5.5 - 6.0 - 6.5 - 7.0 - 7.5 - 8.0 - 8.5 - 9.0	
B	5.0 - 7.5 - 9.0	

**Figura 4.10:** Disposizione del casco pronto all'impatto nel punto B

\* \* \*



## Capitolo 5

# Investigazione numerica della schiuma di EPS: risultati

I parametri che si sono andati a ricavare in fase di postprocessing e che costituiscono i risultati di questa tesi sono:

- l'accelerazione traslazionale nel tempo del centro di massa della falsatesta
- il PLA, ovvero il picco di accelerazione traslazionale, espresso in g
- HIC, head injury criterion

Tali risultati di postprocessing sono stati ricavati grazie al programma LS-PrePost.

### 5.1 Risultati modelli A

I parametri elencati sopra, sono stati calcolati per i modelli A riportati nella tabella 4.2, per i valori di velocità d'impatto riportati nella tabella 4.8.

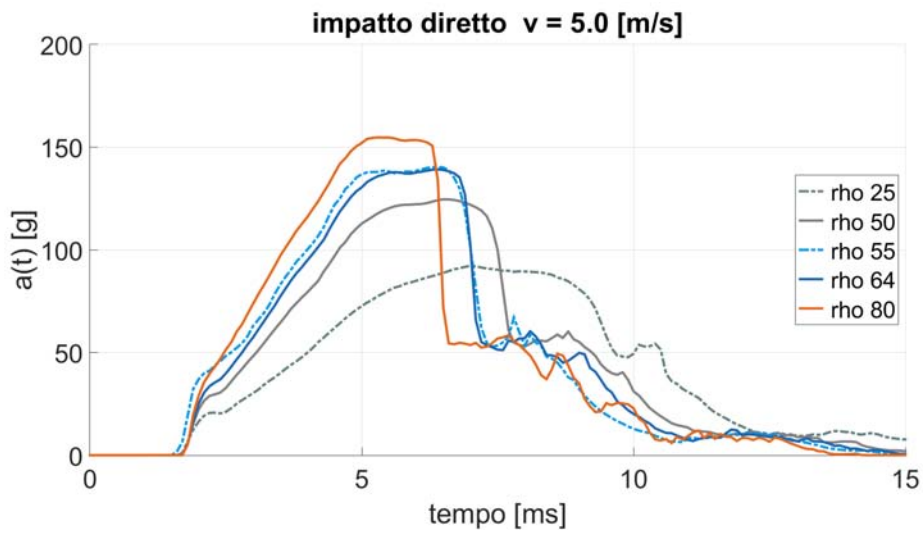
In figura 5.1(a) è riportato l'andamento dell'accelerazione traslazionale risultante del centro di massa della falsatesta per la durata dell'impatto. Filtrando tali valori è stato possibile determinare HIC riportato in tabella 5.1 insieme al valore del PLA. Tale procedimento viene ripetuto per tutte le velocità d'impatto precedentemente elencate. Quello che è subito evidente, come è logico aspettarsi, è che all'aumentare dell'energia dell'impatto, a parità di proprietà della schiuma di EPS, sia HIC che PLA aumentano, a seguito dell'aumentp di energia cinetica in gioco.

Come risulta evidente dalle tabelle 5.1-5.9, tutti i modelli risultano essere in grado di rispettare la norma europea ECE. il modello A1, fino alla velocità di  $7.5 \frac{m}{s}$ , risulta essere quello in grado di assorbire in maniera più efficace l'energia dell'impatto, difatti presenta valori di HIC e PLA minori. A partire dalla velocità d'impatto di  $8.0 \frac{m}{s}$  (siamo quindi a velocità maggiori di quelle prevesti della normativa ECE 2.5, si veda capitolo 2), questo non è più vero, difatti il modello A2 inizia a presentare PLA e HIC inferiori a partire da tale valore, si veda tabella 5.7.

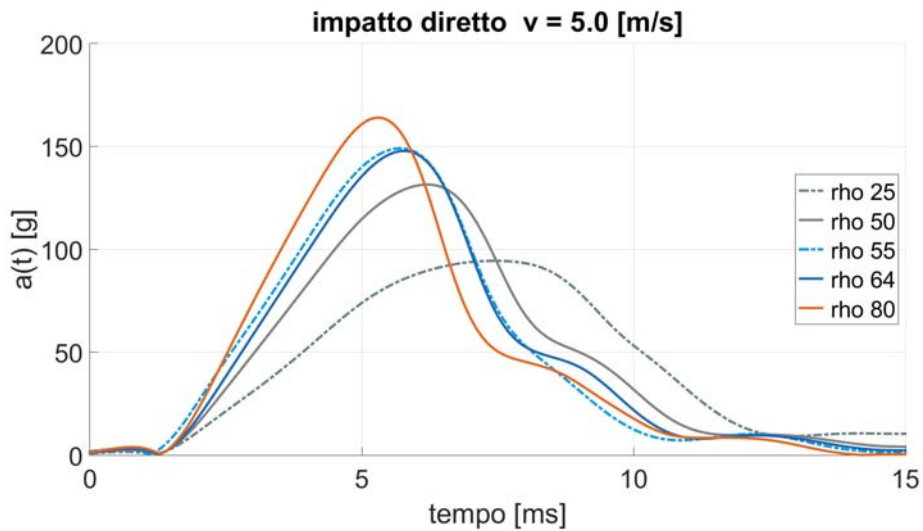
Le altre schiume risultano invece meno efficaci nel dissipare l'energia dell'urto. In particolare PLA e HIC continuano ad aumentare con l'aumentare della densità della schiuma presente nei modelli, raggiungendo i valori massimi per il modello A5,

**Tabella 5.1:** Valori di HIC e PLA per i modelli A, velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	430	92.19
A2	568	124.57
A3	667	140.35
A4	632	139.14
A5	707	154.76



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

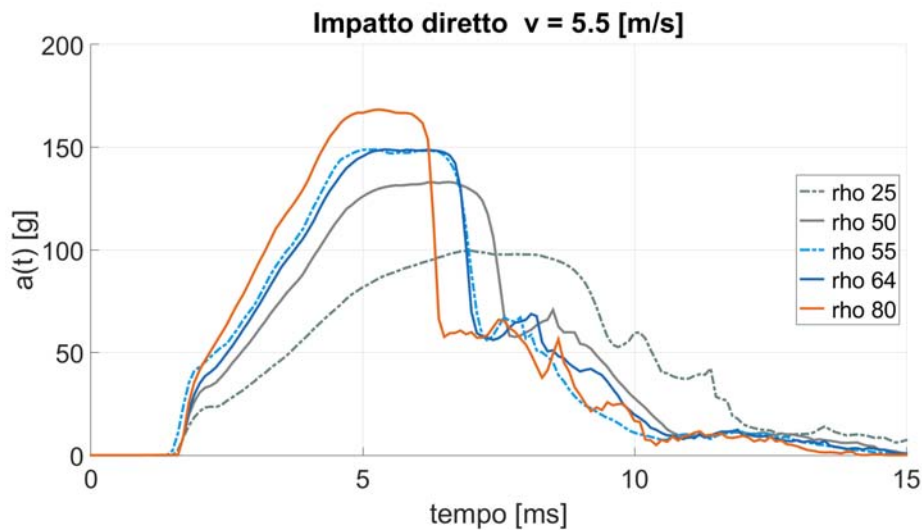


(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

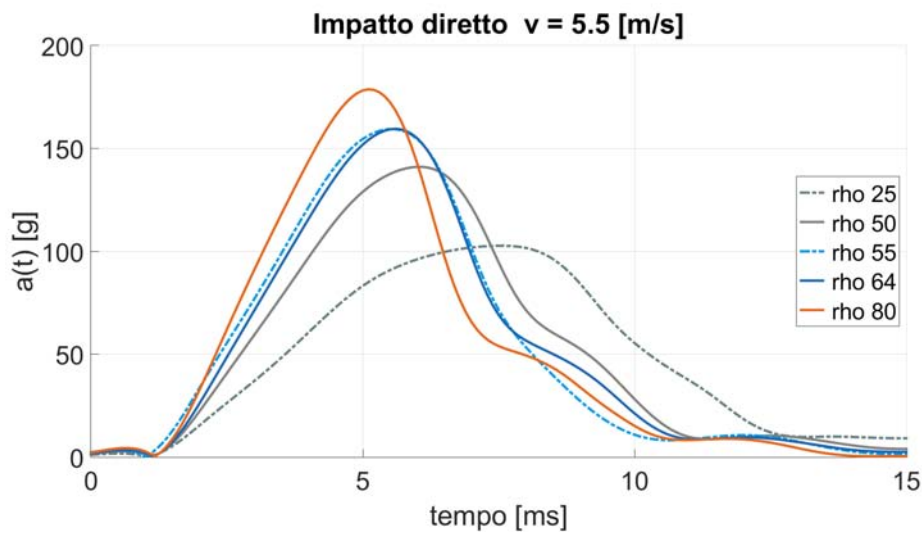
**Figura 5.1:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.2:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $5.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	470	99.61
A2	665	132.99
A3	782	148.93
A4	746	148.87
A5	843	168.33



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

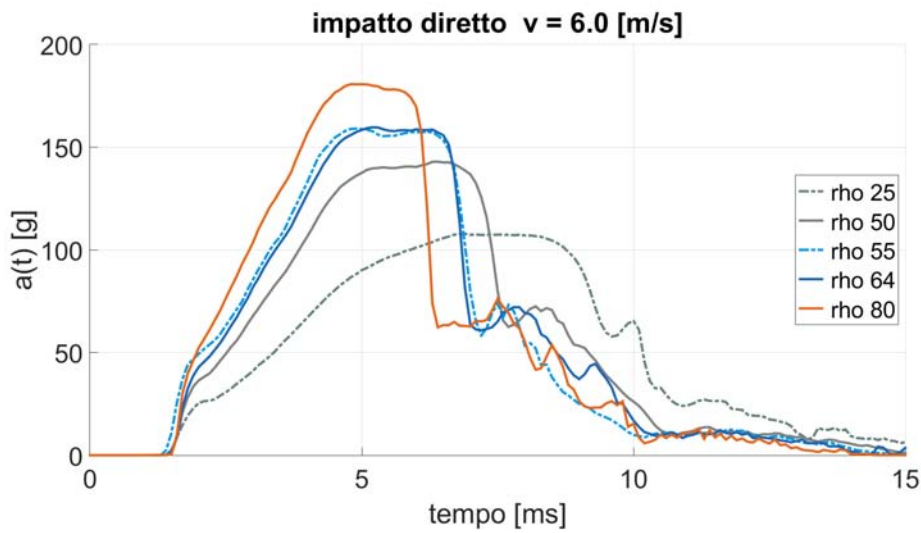


(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

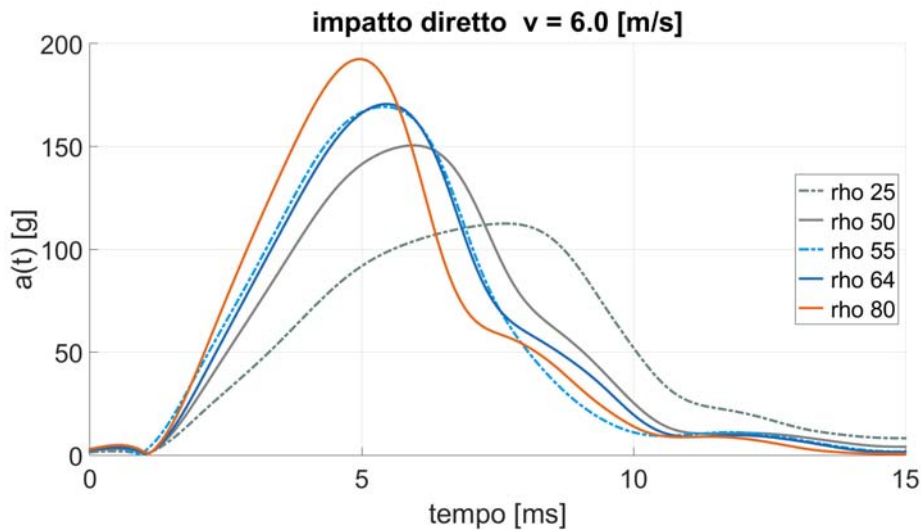
**Figura 5.2:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $5.5 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.3:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $6.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $6.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	576	107.85
A2	776	142.92
A3	909	159.07
A4	872	159.68
A5	994	180.67



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

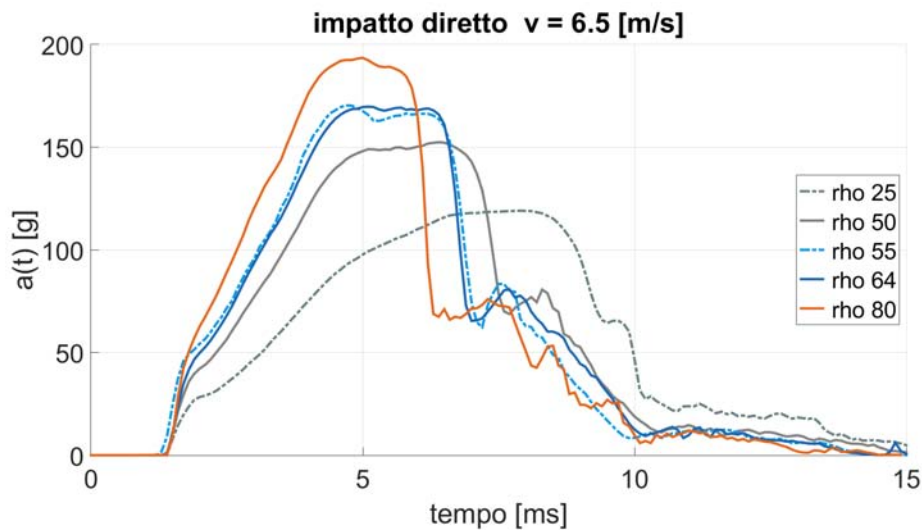


(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

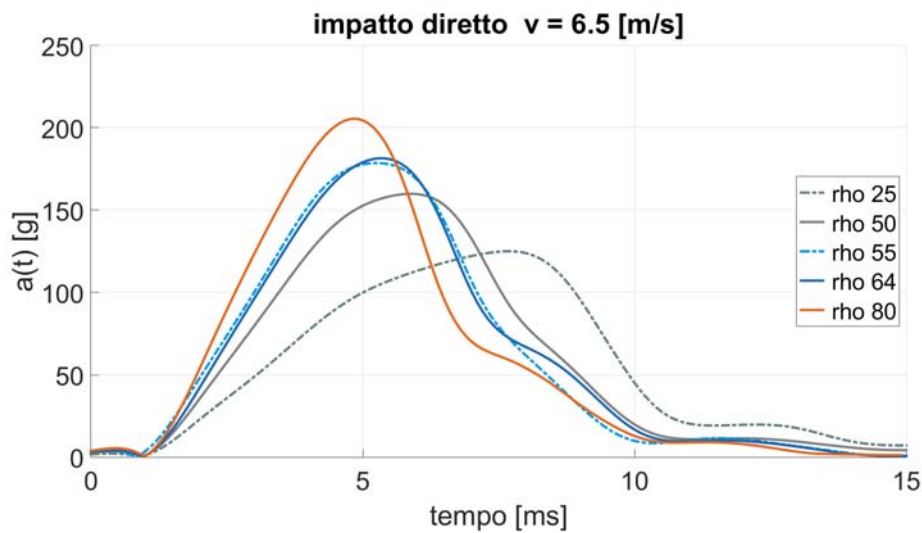
**Figura 5.3:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $6.0 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.4:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $6.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $6.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	672	119.01
A2	902	152.44
A3	1047	170.33
A4	1024	169.70
A5	1164	193.50



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

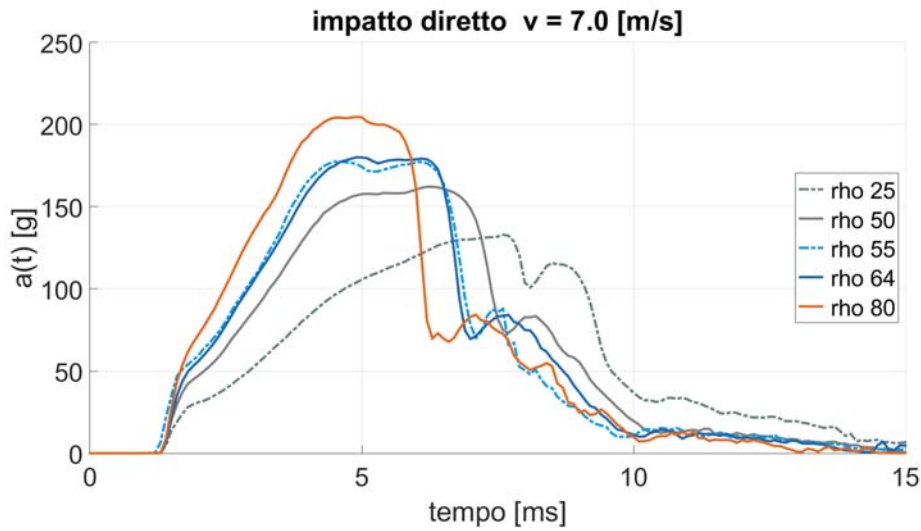


(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

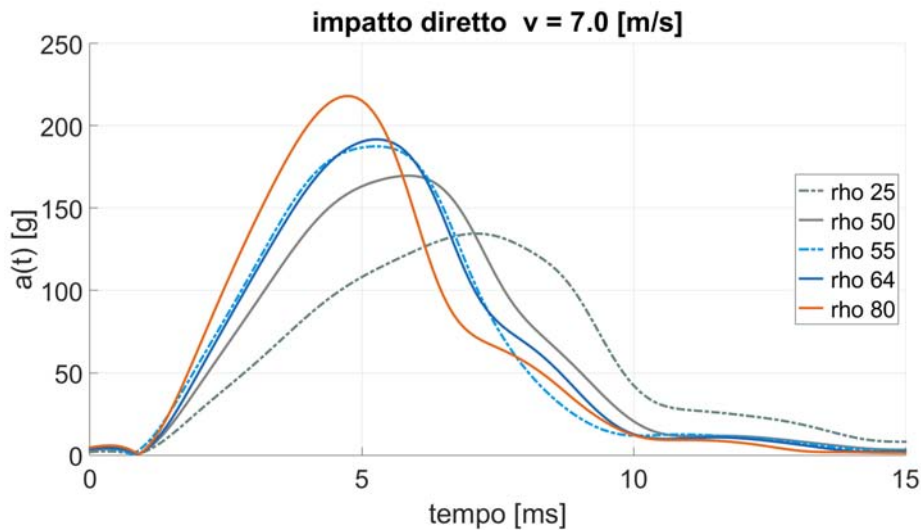
**Figura 5.4:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $6.5 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.5:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $7.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	756	132.69
A2	1039	162.22
A3	1202	177.48
A4	1171	180.14
A5	1349	204.69



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



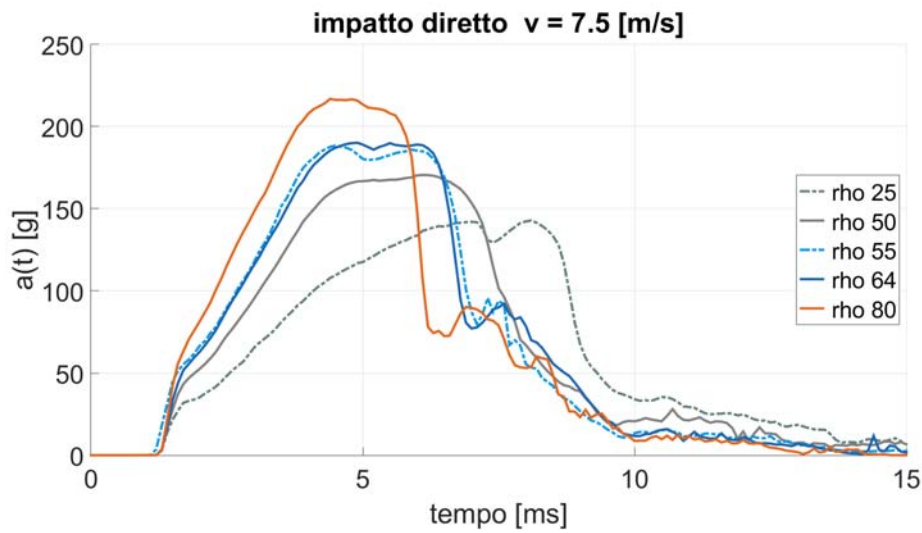
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.5:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $7.0 \frac{m}{s}$

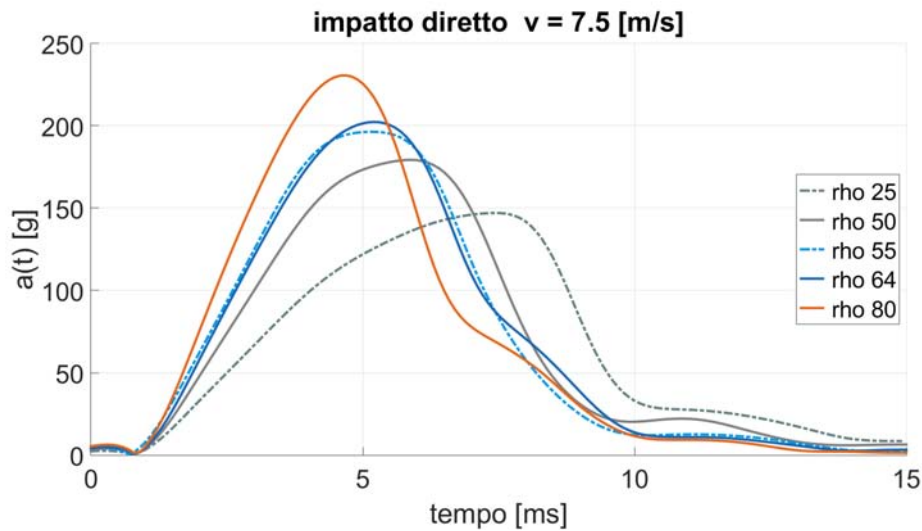


**Tabella 5.6:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	905	147.02
A2	1168	170.57
A3	1379	188.44
A4	1345	190.16
A5	1553	216.89



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

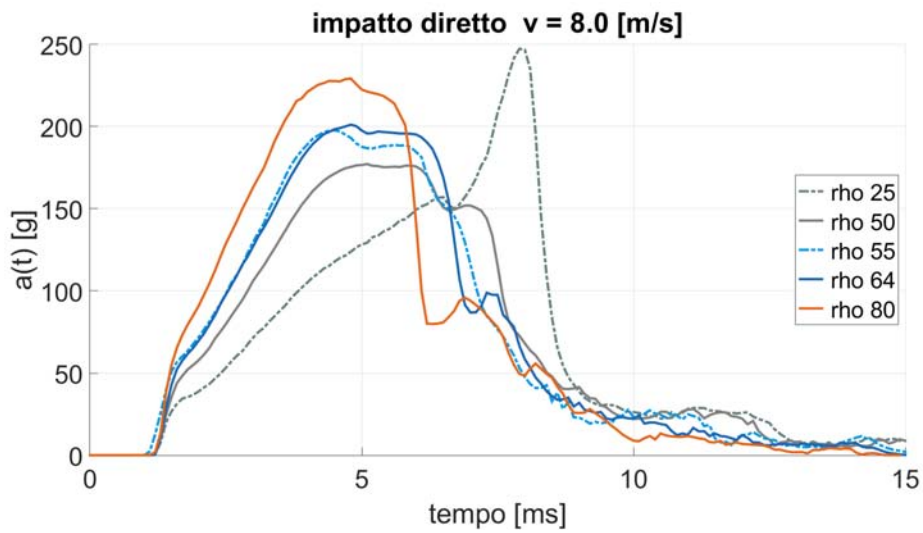


(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

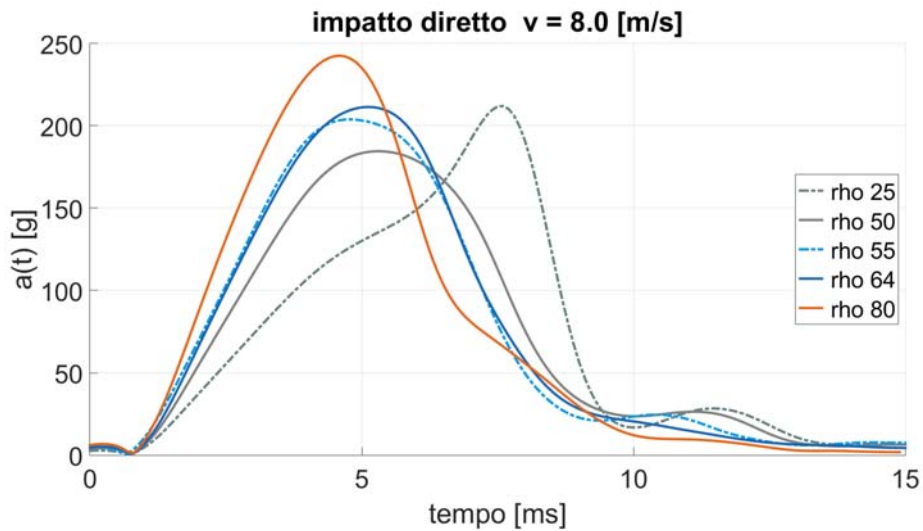
**Figura 5.6:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.7:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $8.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $8.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	1245	212.02
A2	1293	177.22
A3	1499	197.73
A4	1539	201.21
A5	1775	229.30



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

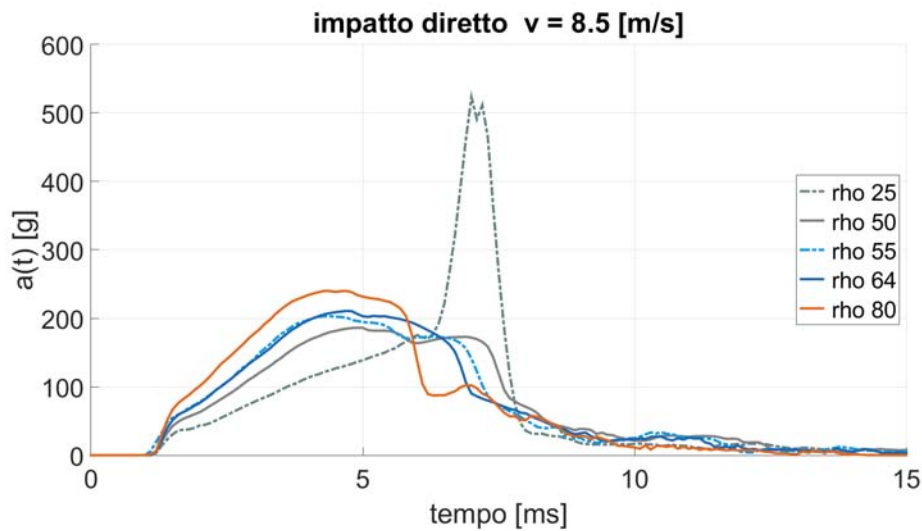


(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

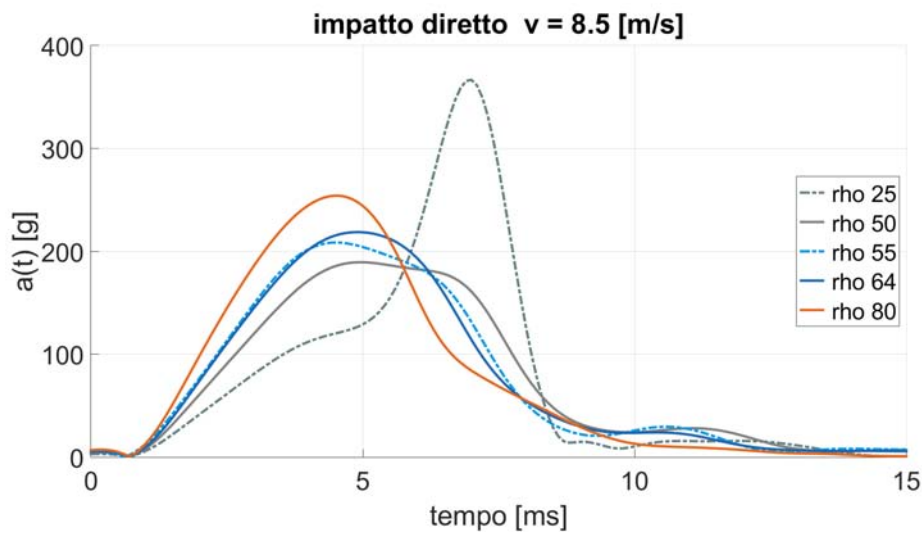
**Figura 5.7:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $8.0 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.8:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $8.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $8.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	2368	366.64
A2	1463	186.187
A3	1648	203.151
A4	1678	210.82
A5	2014	240.11



(a) accelerazione in funzione del tempo non trattata del centro di massa della falsatesta

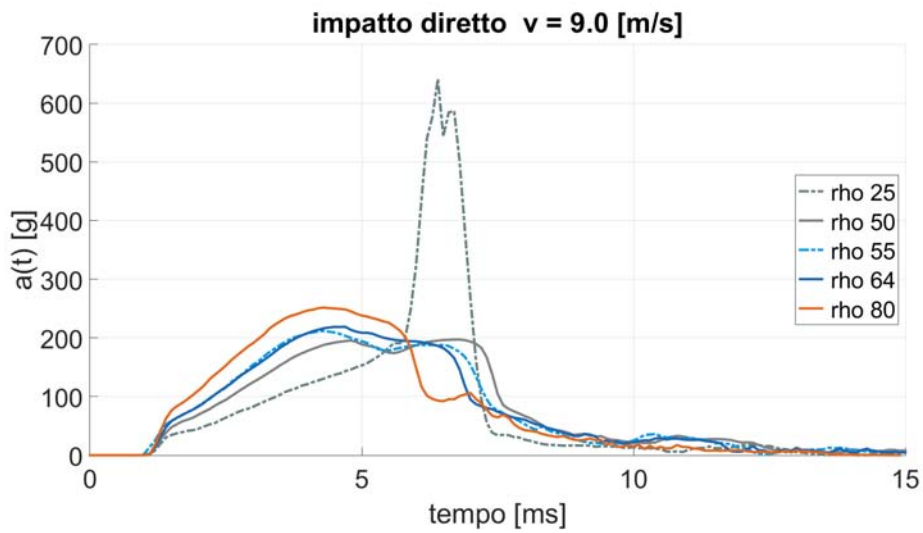


(b) accelerazione in funzione del tempo risultante trattata del centro di massa della falsatesta

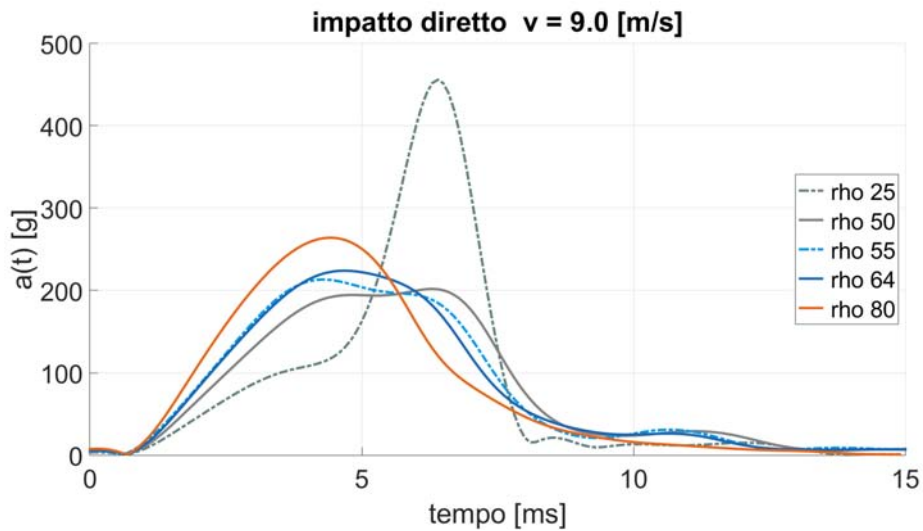
**Figura 5.8:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $8.5 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.9:** Valori di HIC e PLA per i modelli A per velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $9.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
A1	3736	455.97
A2	1694	197.236
A3	1834	211.70
A4	1851	218.80
A5	2257	251.56



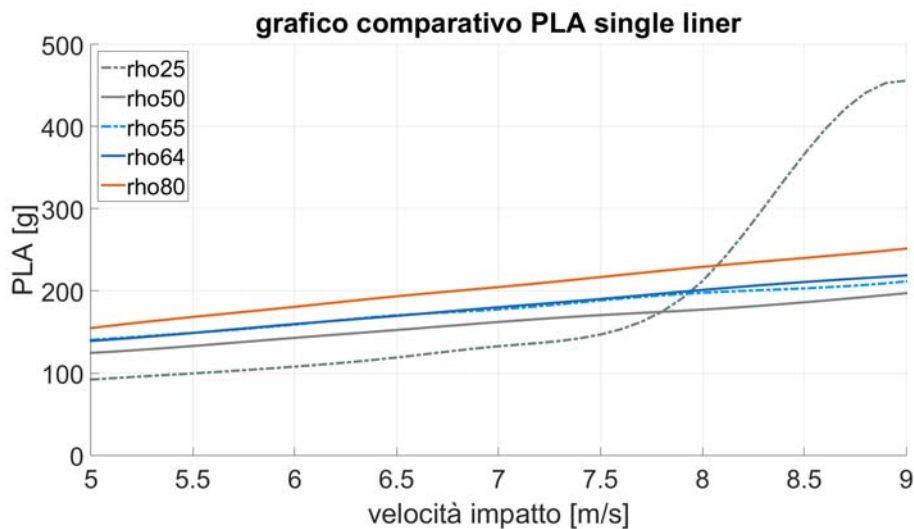
(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



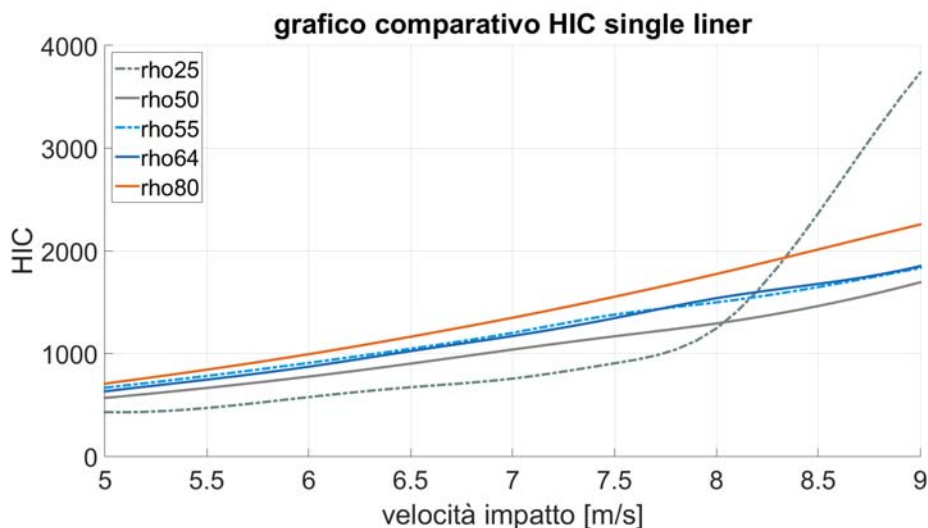
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.9:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli A per velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$

il quale presenta una densità di  $80 \frac{Kg}{m^3}$ . Tutte le schiume lavorano all'interno del *plateau* ad eccezione del modello A1 che a partire dalla velocità di  $8.0 \frac{m}{s}$  lavora in zona di densificazione e diventa di fatto incapace di assorbire ulteriore energia trasferendo quindi un maggior carico di accelerazione alla falsa testa. In figura 5.11 si può notare il completo collasso delle celle per il modello A1, situazione che corrisponde alla situazione appena descritta. Sempre da figura 5.11, si può notare invece come i modelli A3 e A5 sono lontani dall'avere celle completamente collassate, a significare come esse lavorino ancora all'interno del *plateau*.



(a) accelerazione traslazionale risultante trattata del centro di massa della falsatesta

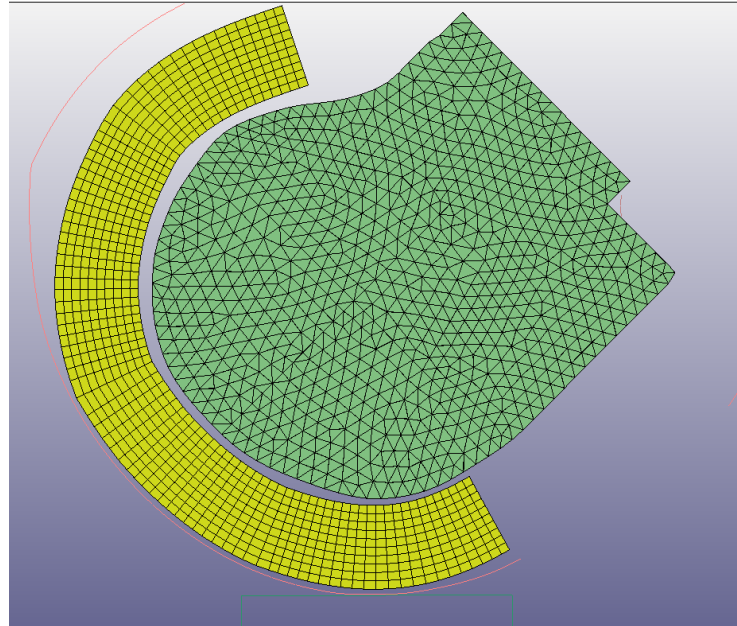


(b) accelerazione traslazionale risultante trattata del centro di massa della falsatesta

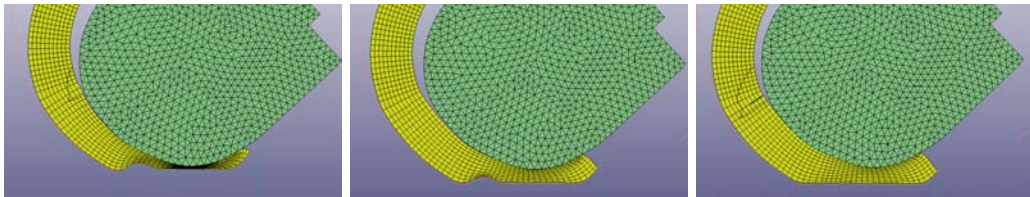
**Figura 5.10:** Andamento di PLA e HIC per i modelli A al variare della velocità d'impatto

Ciò detto, tutte le schiume di EPS prese in considerazione sono in grado di rispettare i valori di PLA e HIC previsti dalla norma ECE 22/05, anche per velocità d'impatto superiori, in alcuni casi, a quella prevista per l'impatto diretto di  $7.5 \frac{m}{s}$ ,

di 274 g di PLA e 2400 di HIC.



(a) sezione del modello A indeformata



(b) sezione modello A1 con proprietà  $\rho$  25, massima deformazione

(c) sezione modello A3 con proprietà  $\rho$  55, massima deformazione

(d) sezione modello A5 con proprietà  $\rho$  80, massima deformazione

**Figura 5.11:** sezione del modello A, deformazioni massime al variare della proprietà della schiuma di EPS per velocità d'impatto di  $8.0 \frac{m}{s}$

## 5.2 Risultati modello B

Anche per i modelli B i parametri di cui si tiene conto per la valutazione del comportamento meccanico della schiuma di polistirolo sono i medesi visti in precedenza:

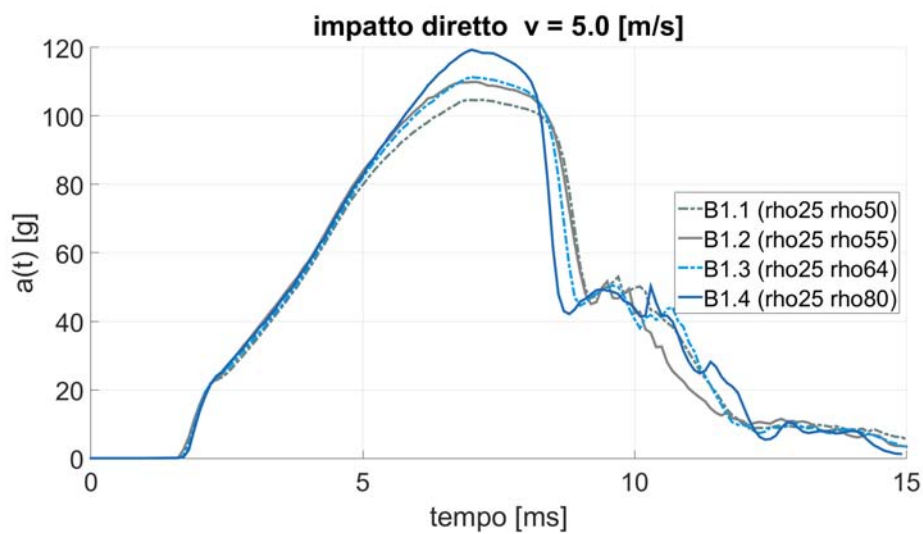
- l'accelerazione del centro di massa della falsatesta  $a(t)$
- PLA, ovvero il picco di accelerazione traslazionale
- HIC, head injury creterion

I risultati vengono presentati tenendo costante la proprietà sulla schiuma interna e facendo variare quella esterna, mettendo infine a confronto i valori ottenuti dalle simulazioni.

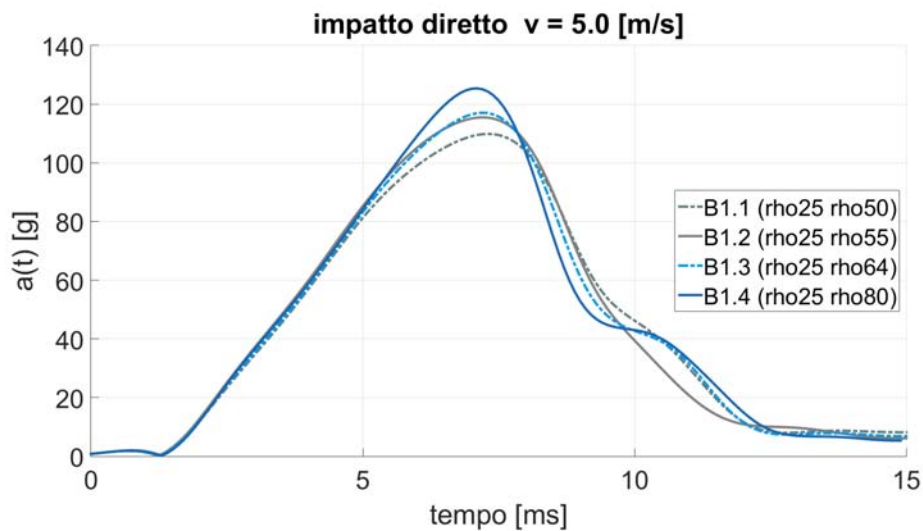


**Tabella 5.10:** Valori di HIC e PLA per i modelli B1 per velocità d'impatto di  $5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B1.1	479	104.71
B1.2	511	109.95
B1.3	495	111.35
B1.4	509	119.35



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



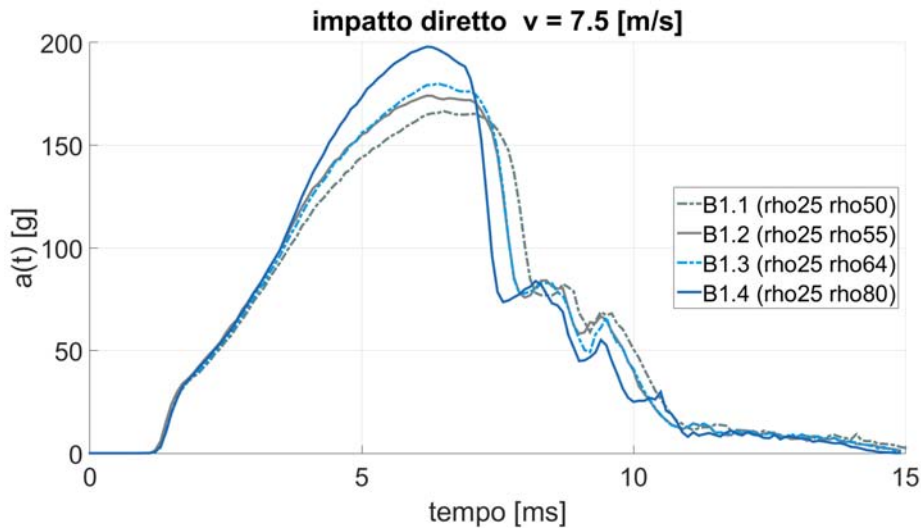
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa falsatesta

**Figura 5.12:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B1, velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ 

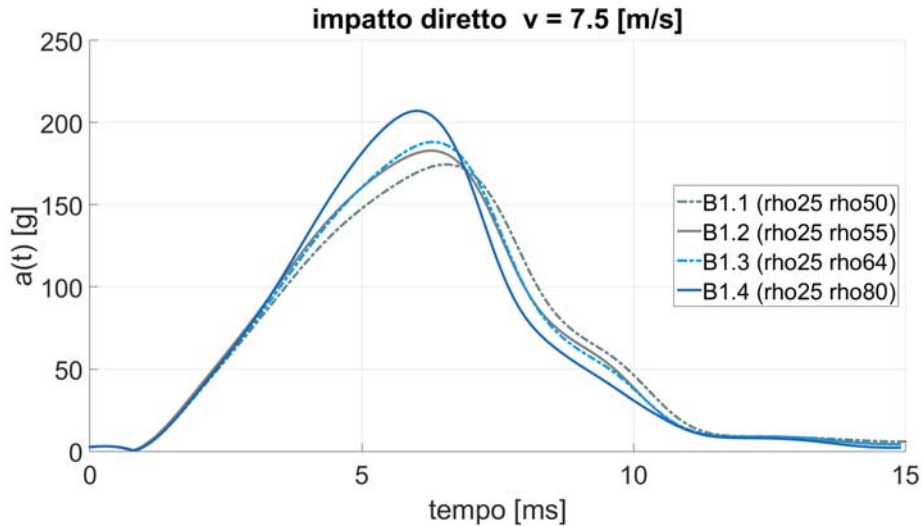
**risultati modelli B1** I modelli B1 risultano da simulazione conformi alla normativa ECE 22/05. L'efficacia dell'assorbimento di energia aumenta al diminuire

**Tabella 5.11:** Valori di HIC e PLA per i modelli B1 per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B1.1	1085	166.57
B1.2	1147	174.1
B1.3	1170	180.04
B1.4	1290	197.94



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

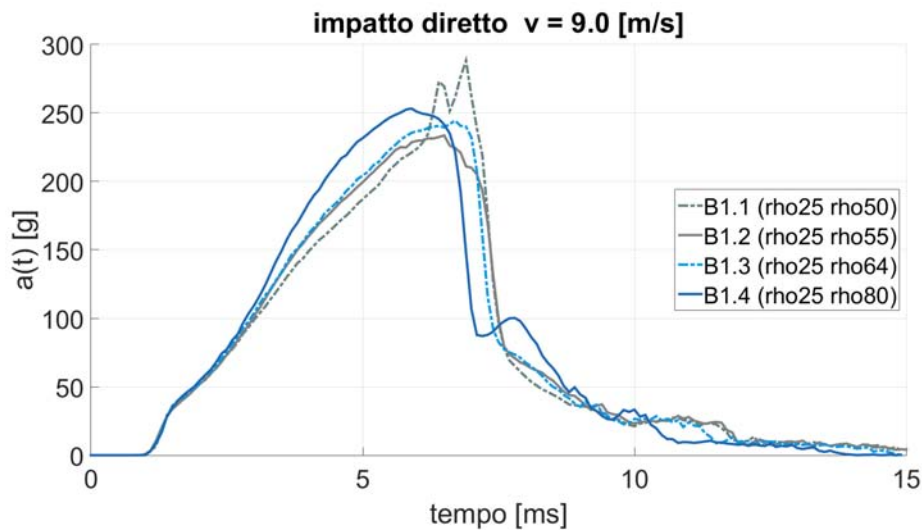
**Figura 5.13:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B1, velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ 

della densità media della configurazione di schiume in esame per quel che riguarda velocità d'impatto pari a  $5.0$  e  $7.5 \frac{m}{s}$ , ne risulta pertanto che il modello B1.1 sia il

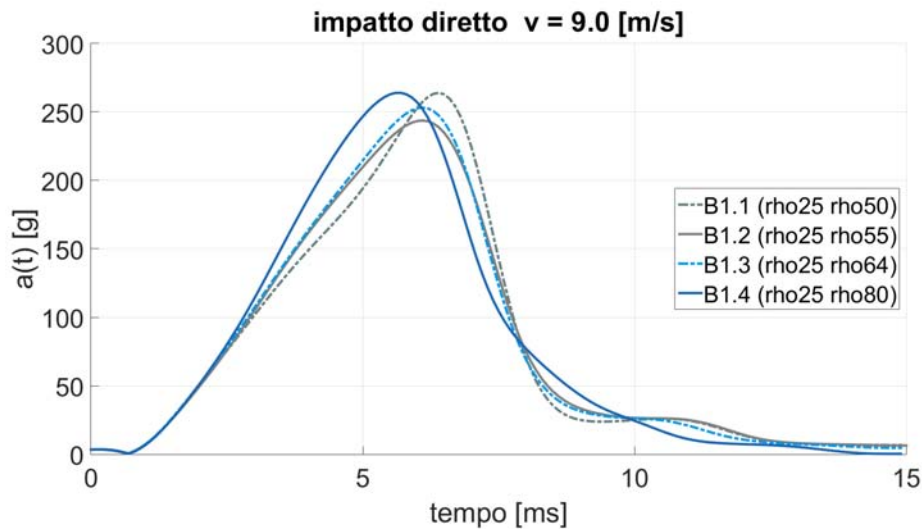


**Tabella 5.12:** Valori di HIC e PLA per i modelli B1 per velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $9.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B1.1	1924	288.25
B1.2	1879	233.50
B1.3	1960	244.34
B1.4	2118	253.20



(a) accelerazione traslazionale risultante trattata del centro di massa della falsatesta



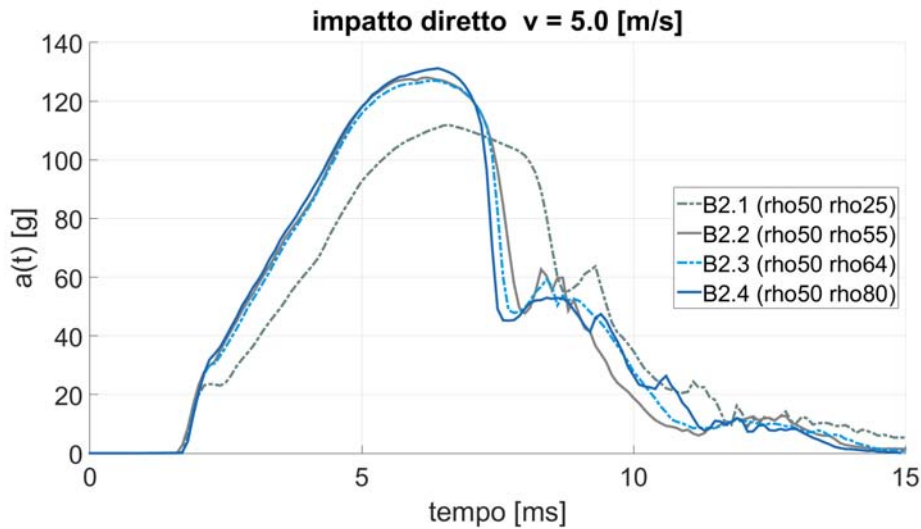
(b) accelerazione traslazionale risultante trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.14:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B1, velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ 

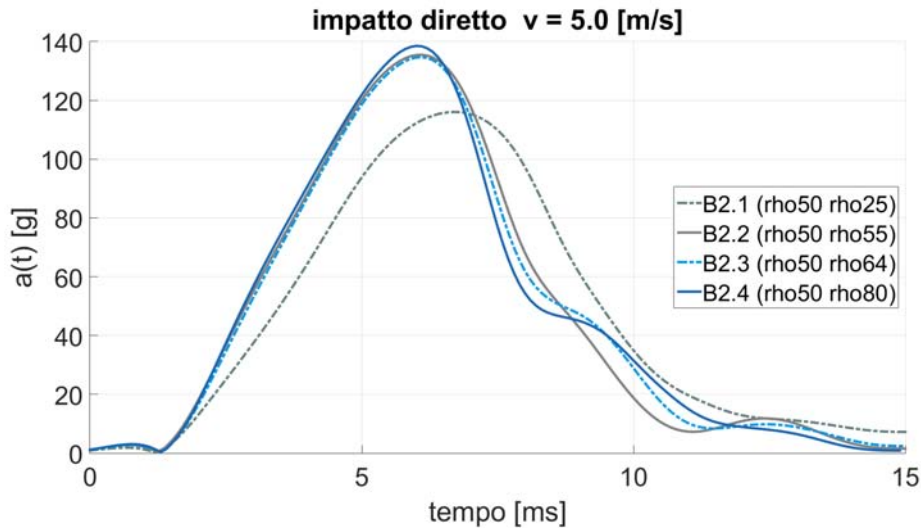
più efficace in assoluto. Questo non vale più per una velocità di  $9.0 \frac{m}{s}$ , dove si ha il verificarsi del collasso completo di diverse celle del design di schiume.

**Tabella 5.13:** Valori di HIC e PLA per i modelli B2 per velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B2.1	518	111.90
B2.2	602	128.04
B2.3	577	126.98
B2.4	587	131.21



(a) accelerazione in funzione del tempo non trattata del centro di massa della falsatesta



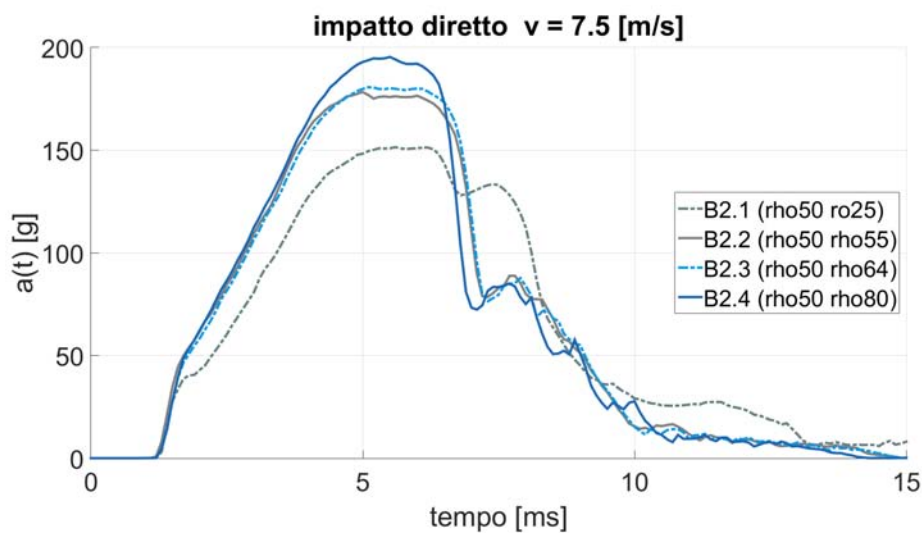
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.15:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B2, velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ 

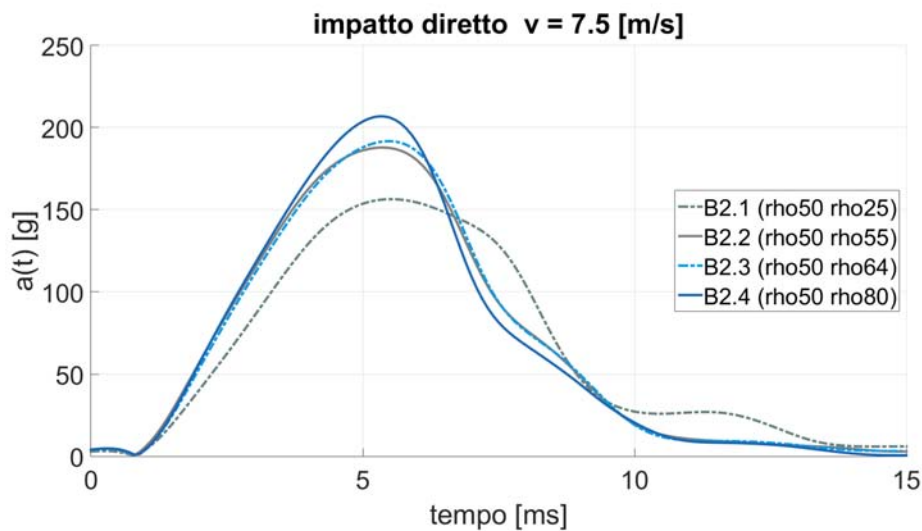
**risultati modelli B2** Anche questi modelli rispettano la normativa, analogamente al caso precedente l'efficacia dell'assorbimento di energia aumenta al diminuire

**Tabella 5.14:** Valori di HIC e PLA per i modelli B2 per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B2.1	994	151.45
B2.2	1241	178.31
B2.3	1256	180.70
B2.4	1339	195.5



(a) accelerazione in funzione del tempo non trattata del centro di massa della falsatesta



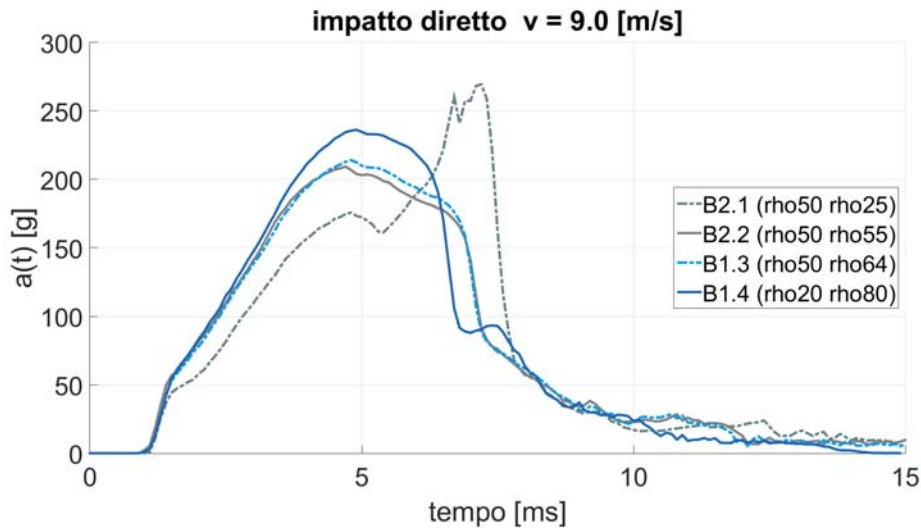
(b) accelerazione in funzione del tempo risultante trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.16:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B2, velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ 

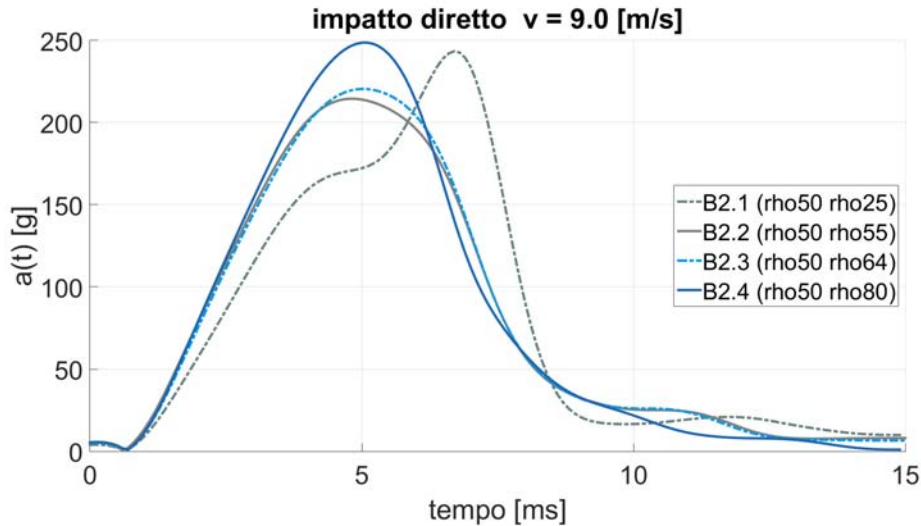
della densità media della configurazione di schiume. Anche in questo caso il modello B2.1 che per velocità fino a  $7.5 \frac{m}{s}$  è stato il più efficace, per velocità di  $9.0 \frac{m}{s}$

**Tabella 5.15:** Valori di HIC e PLA per i modelli B2 per velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $9.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B2.1	1776	269.5
B2.2	1738	209.34
B2.3	1786	214.14
B2.4	2037	236.2



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



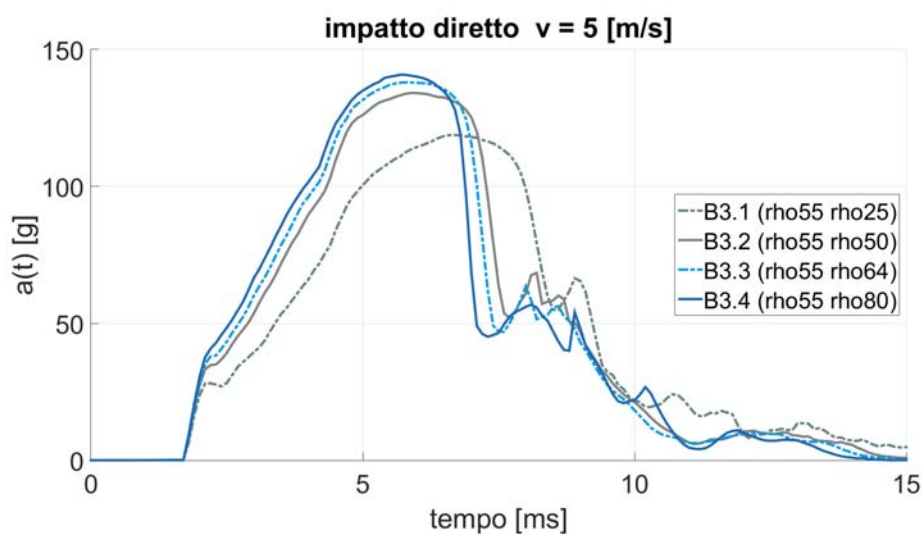
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.17:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B2, velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ 

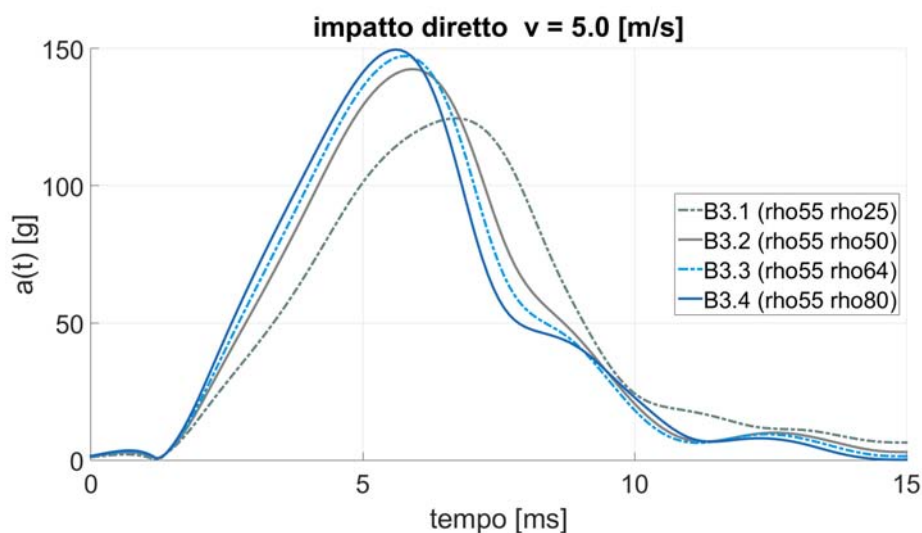
presenta il collasso completo delle celle che compongono la schiuma con conseguente perdita di efficacia nell'assorbire l'urto.

**Tabella 5.16:** Valori di HIC e PLA per i modelli B3 per velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B3.1	557	118.76
B3.2	631	164.13
B3.3	650	137.99
B3.4	645	140.82



(a) accelerazione in funzione del tempo non trattata del centro di massa della falsatesta



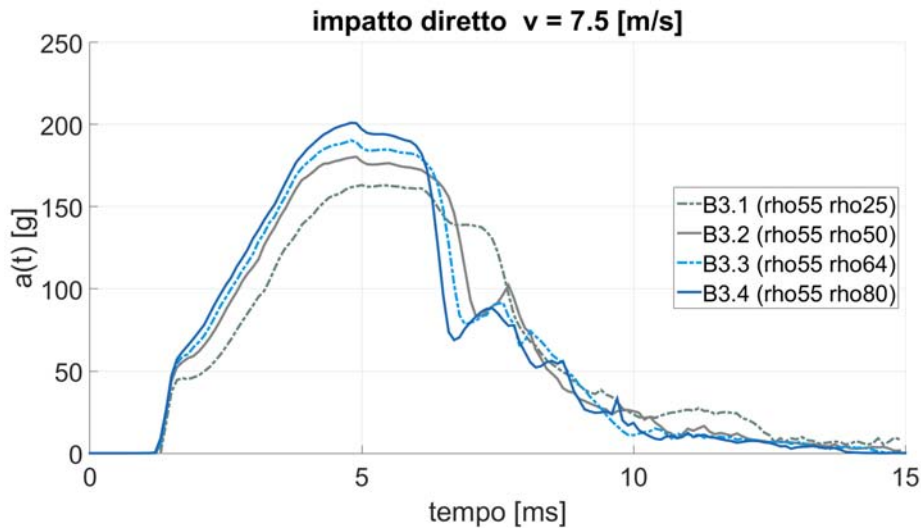
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.18:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B3, velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ 

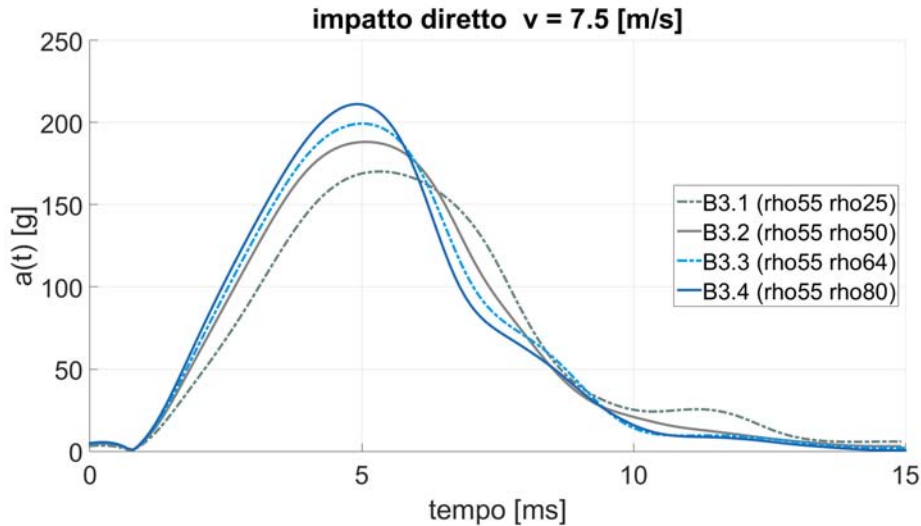
**risultati modelli B3** I modelli B3 sono conformi alla norma, in questo caso l'efficacia di assorbimento dell'energia di impatto cresce sempre al diminuire della

**Tabella 5.17:** Valori di HIC e PLA per i modelli B3 per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B3.1	1092	163.20
B3.2	180.40	1272
B3.3	1326	190.40
B3.4	1390	201.10



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



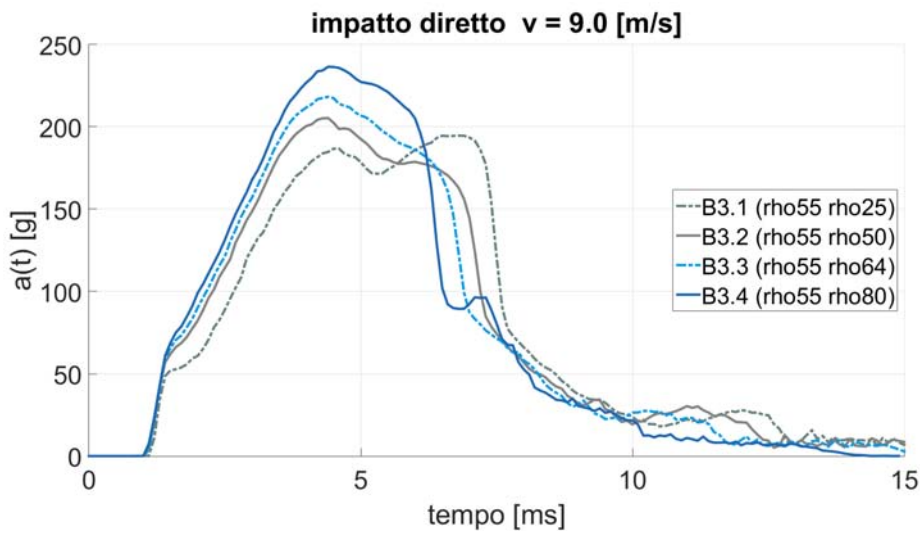
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.19:** Accelerazione in funzione del tempo per il modello B3, velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ 

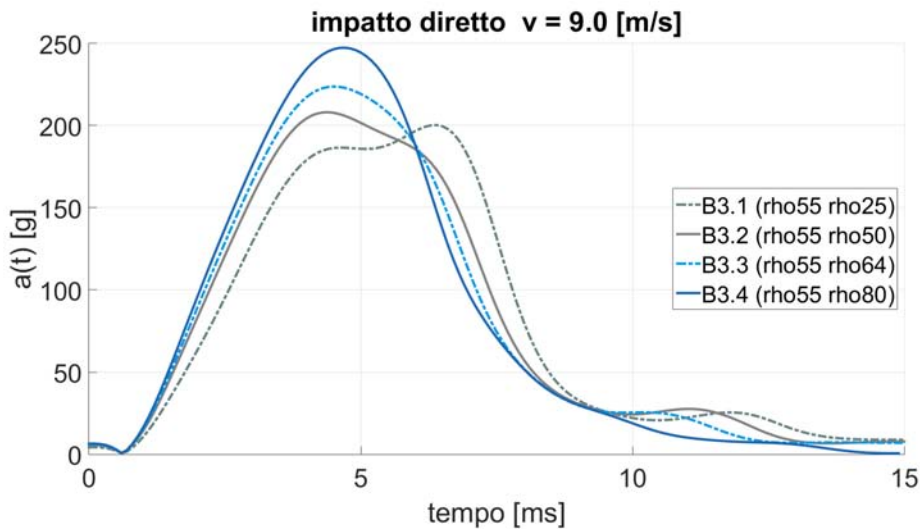
densità media del pattern di schiume in esame e questo vale per tutte le velocità analizzate. Ne consegue che il modello che meglio si comporta è il B3.1 caratterizzato

**Tabella 5.18:** Valori di HIC e PLA per i modelli B3 per velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $9.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B3.1	1645	194.7
B3.2	1694	205.3
B3.3	1829	218.3
B3.4	2064	236.5



(a) accelerazione in funzione del tempo non trattata del centro di massa della falsatesta



(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

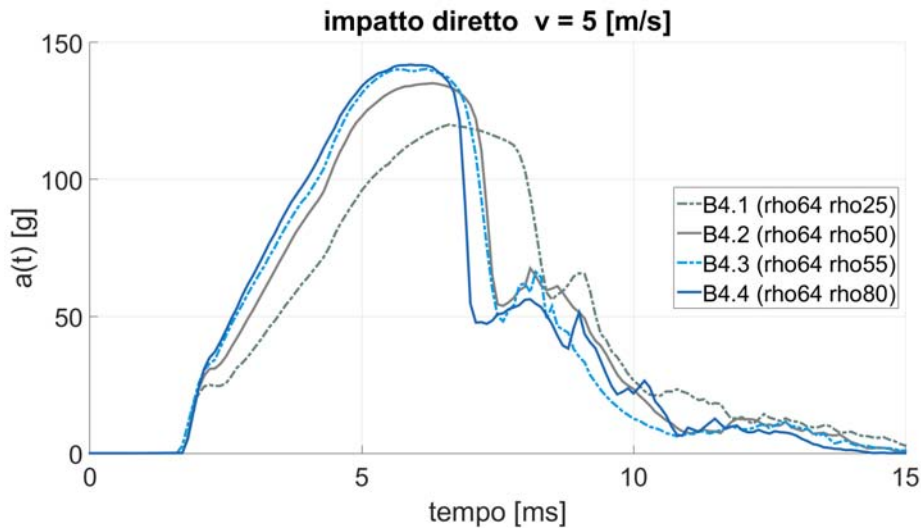
**Figura 5.20:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B3, velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ 

delle schiume con proprietà  $\rho_{55}$  internamente e  $\rho_{25}$  esternamente.

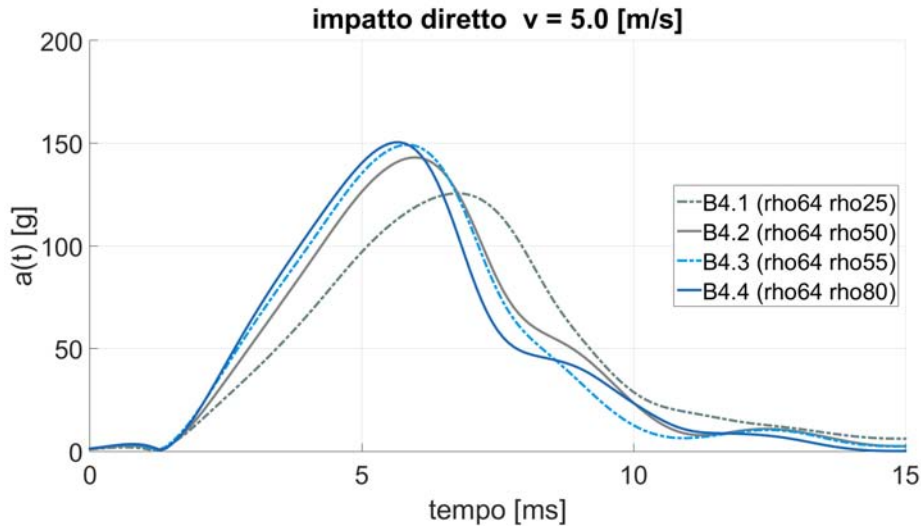


**Tabella 5.19:** Valori di HIC e PLA per i modelli B4 per velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B4.1	551	119.96
B4.2	618	135.01
B4.3	664	140.34
B4.4	642	141.889



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

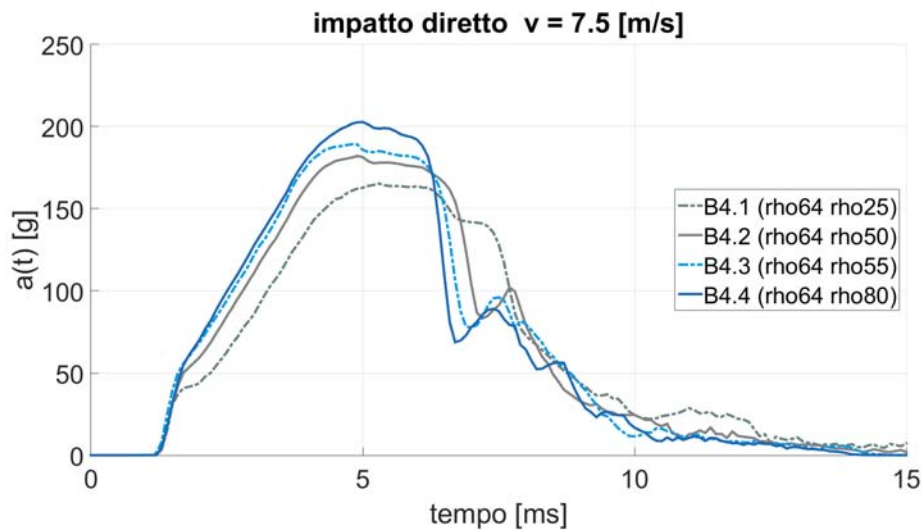
**Figura 5.21:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B4, velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ 

**risultati modelli B4** Vale quanto detto sopra per il modelli B3, in questo caso il modello che meglio assorbe l'energia dell'impatto è rappresentato dal modello B4.1,

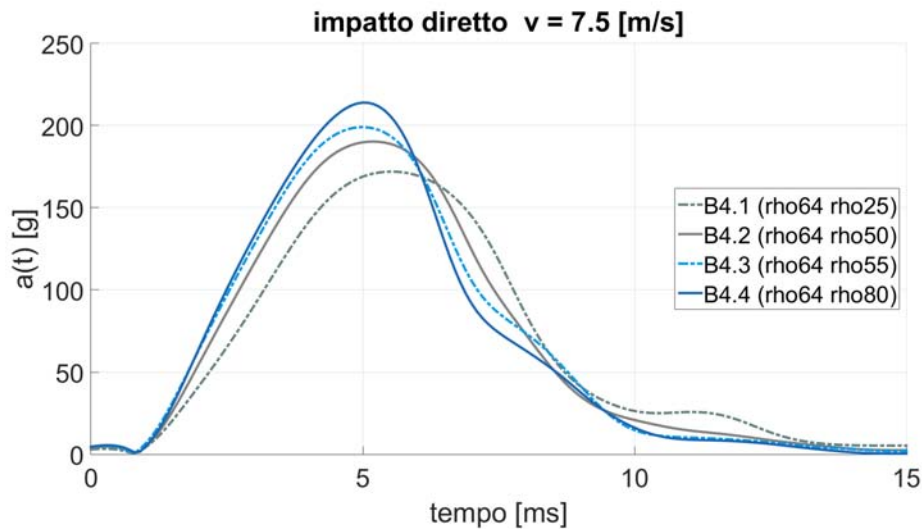


**Tabella 5.20:** Valori di HIC e PLA per i modelli B4 per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B4.1	1106	165.35
B4.2	1284	182.13
B4.3	1326	189.26
B4.4	1410	202.83



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



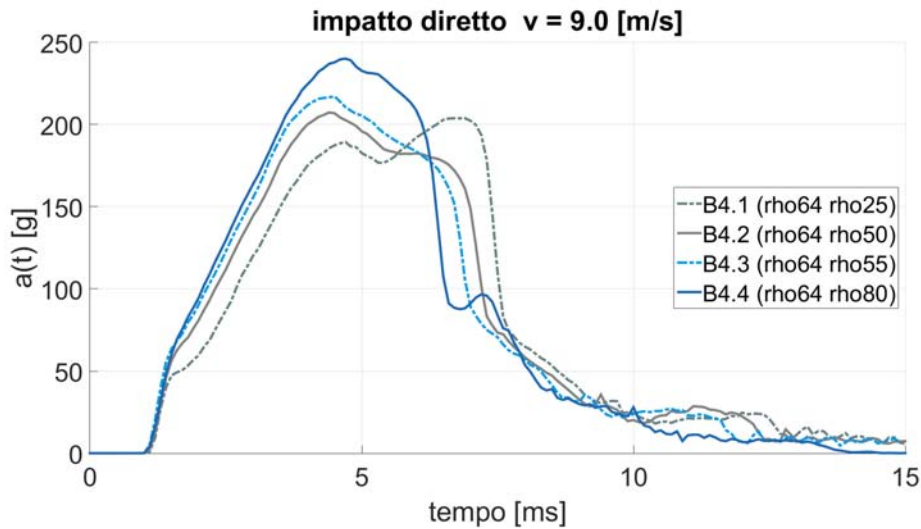
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.22:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B4, velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ 

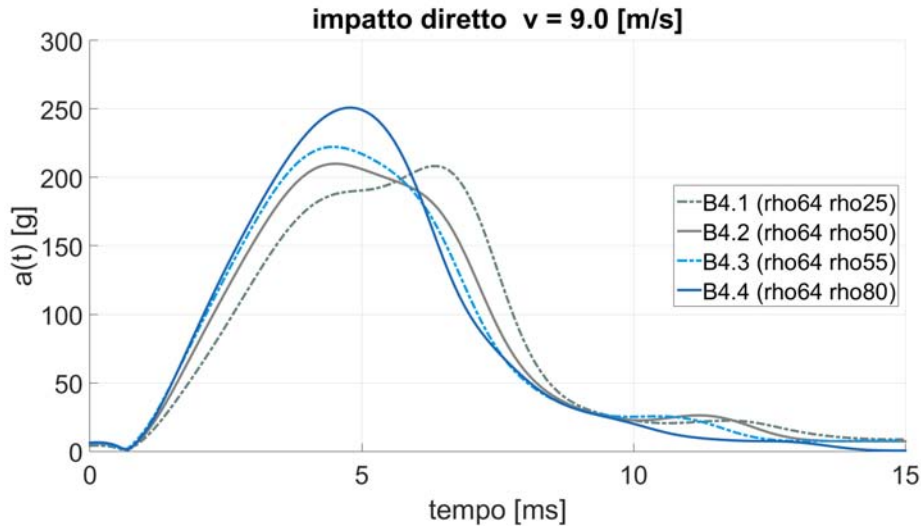
in quanto presenta i valori inferiori di PLA e HIC, caratterizzato dalle schiume con proprietà  $\rho_{64}$  internamente e  $\rho_{25}$  esternamente.

**Tabella 5.21:** Valori di HIC e PLA per i modelli B4 per velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $9.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B4.1	1690	203.9
B4.2	1717	207.4
B4.3	1807	217.2
B4.4	2086	240.20



(a) accelerazione traslazionale risultante non trattata del centro di massa della falsatesta



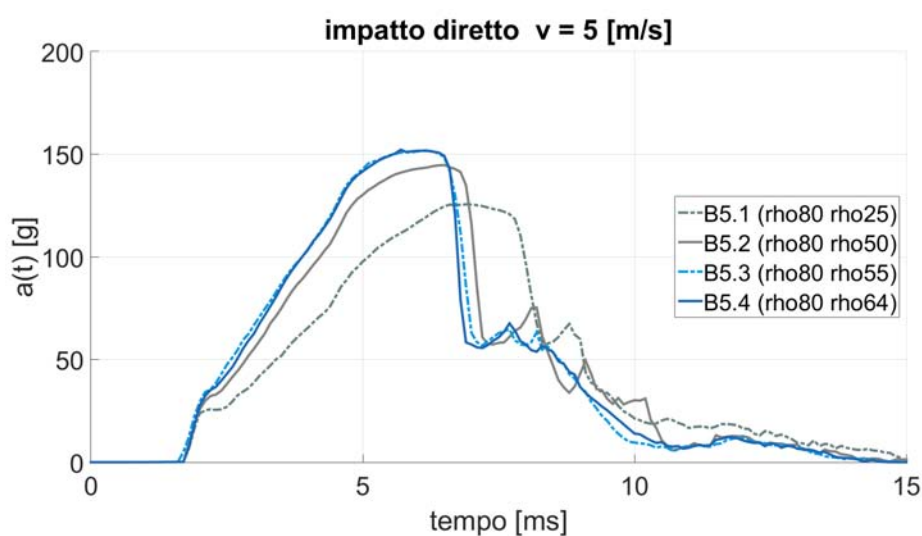
(b) accelerazione traslazionale risultante trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.23:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B4, velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ 

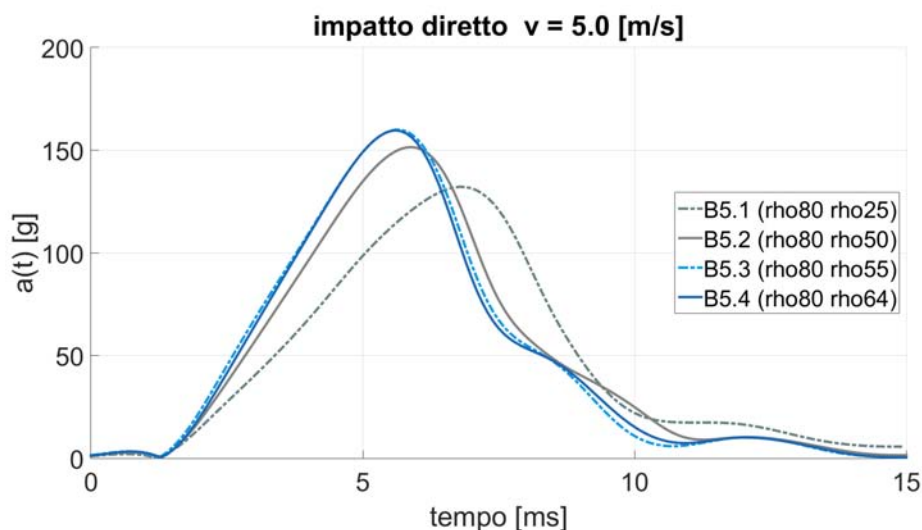
**risultati modelli B5** Anche i modelli B5 sono conformi alla normativa europea ECE 22/05. Analogamente a quanto avviene per gli altri casi, anche qui l'efficacia

**Tabella 5.22:** Valori di HIC e PLA per i modelli B5 per velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $5.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B5.1	573	125.62
B5.2	658	144.69
B5.3	712	151.87
B5.4	689	152.14



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



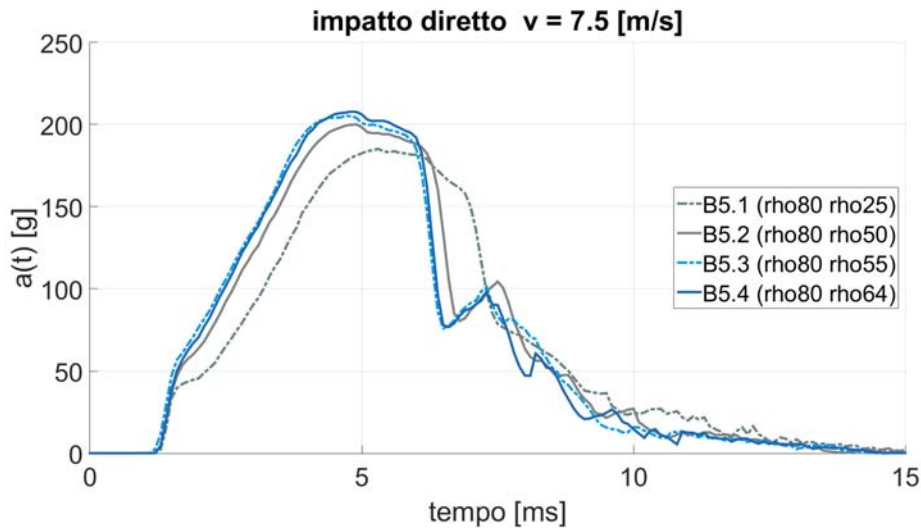
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.24:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B5, velocità d'impatto di  $5.0 \frac{m}{s}$ 

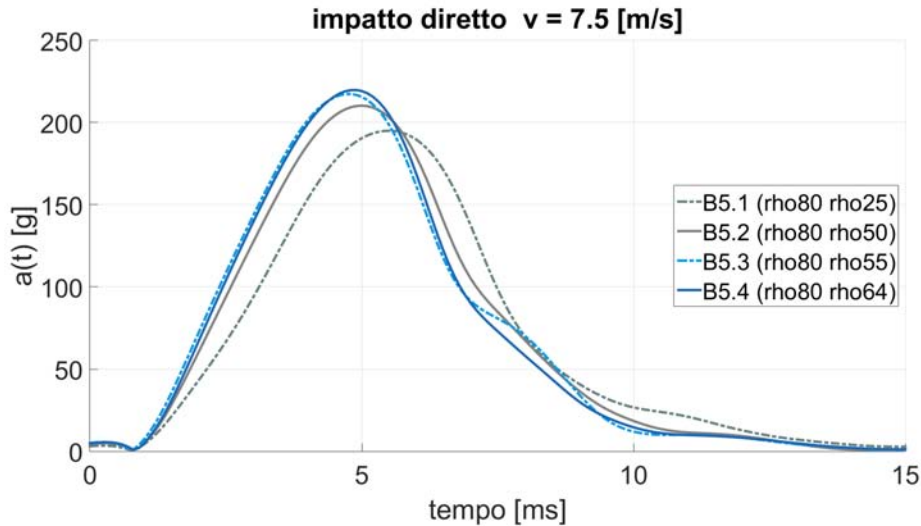
cia dell'assorbimento dell'energia dell'impatto decresce all'aumentare della densità media del pattern di schiume. In questo caso il modello che meglio assorbe l'energia

**Tabella 5.23:** Valori di HIC e PLA per i modelli B5 per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $7.5 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B5.1	1257	185.29
B5.2	1407	200.15
B5.3	1452	205.27
B5.4	1474	207.92



(a) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta



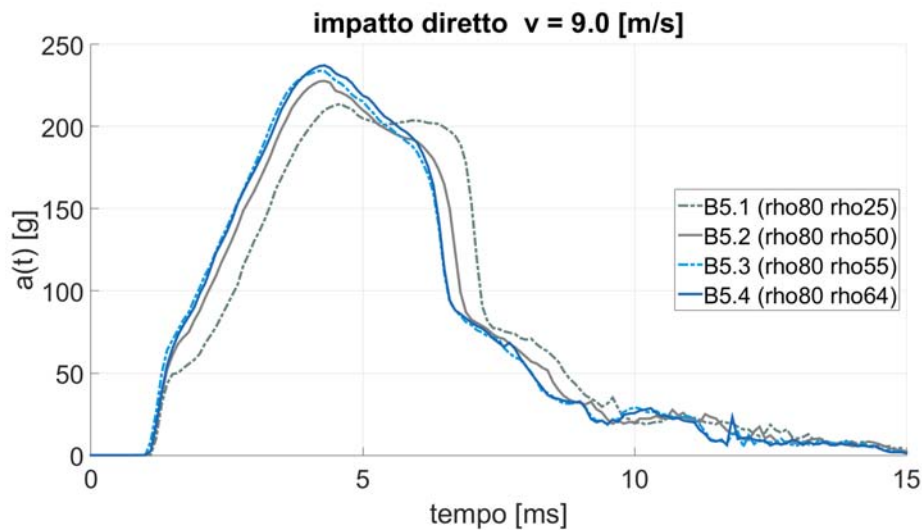
(b) accelerazione in funzione del tempo trattata del centro di massa della falsatesta

**Figura 5.25:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B5, velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ 

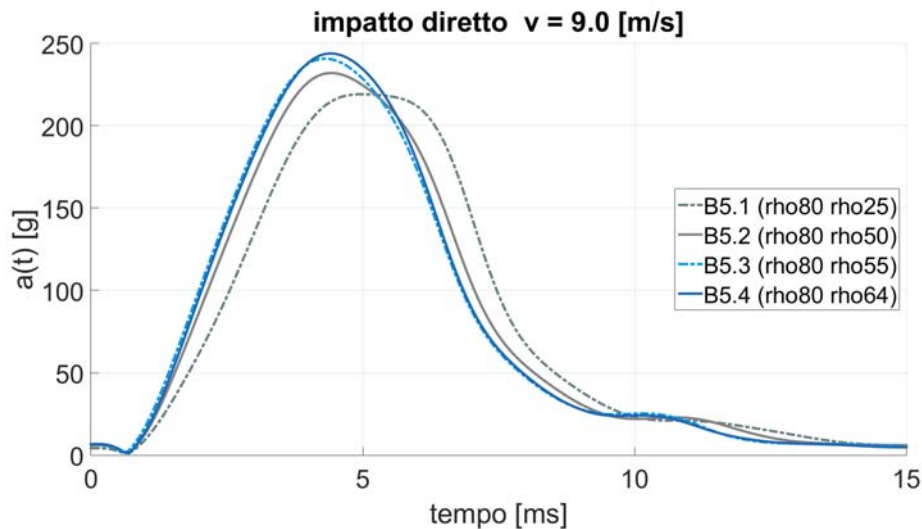
dell'impatto è rappresentato dal modello B5.1, in quanto presenta i valori inferiori di PLA e HIC, caratterizzato dalle schiume con proprietà  $\rho_{80}$  internamente e  $\rho_{25}$

**Tabella 5.24:** Valori di HIC e PLA per i modelli B5 una velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ .

Modello	Velocità impatto $9.0 \frac{m}{s}$	
	HIC	PLA [g]
B5.1	1835	213.70
B5.2	1899	227.8
B5.3	1979	234.11
B5.4	2016	237.22



(a) accelerazione traslazionale risultante non trattata del centro di massa della falsatesta

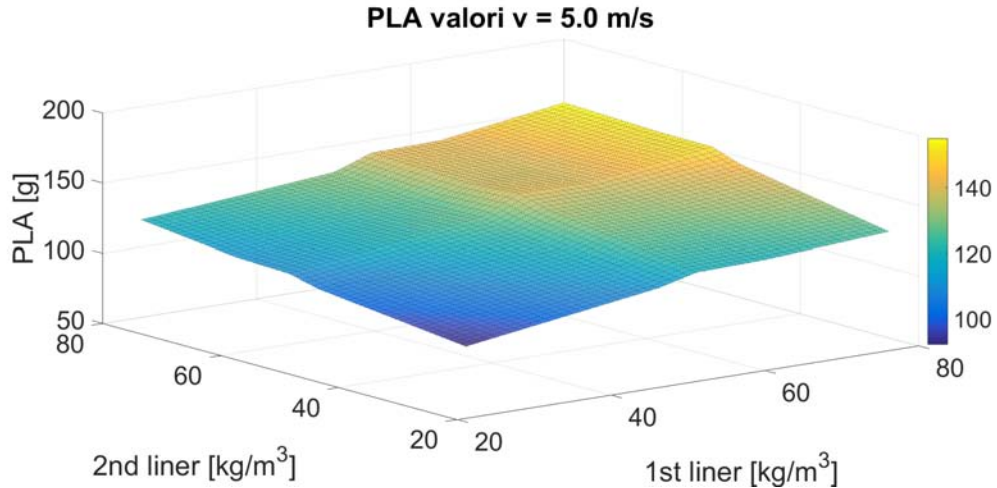


(b) accelerazione traslazionale risultante trattata del centro di massa della falsatesta

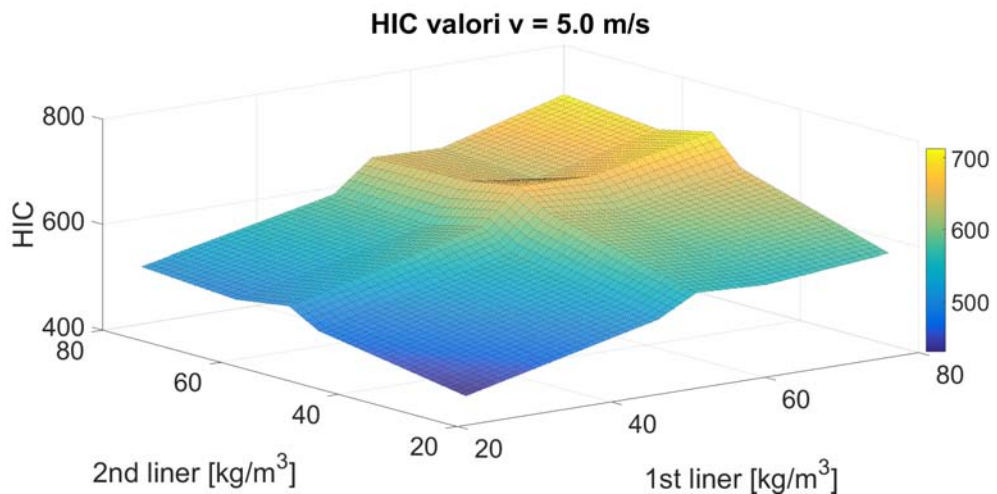
**Figura 5.26:** Accelerazione in funzione del tempo per i modelli B5, velocità d'impatto di  $9.0 \frac{m}{s}$ 

esternamente.

### 5.3 Confronto tra i modelli di casco



(a) PLA in funzione della configurazione di liner interno ed esterno per tutti i modelli di casco



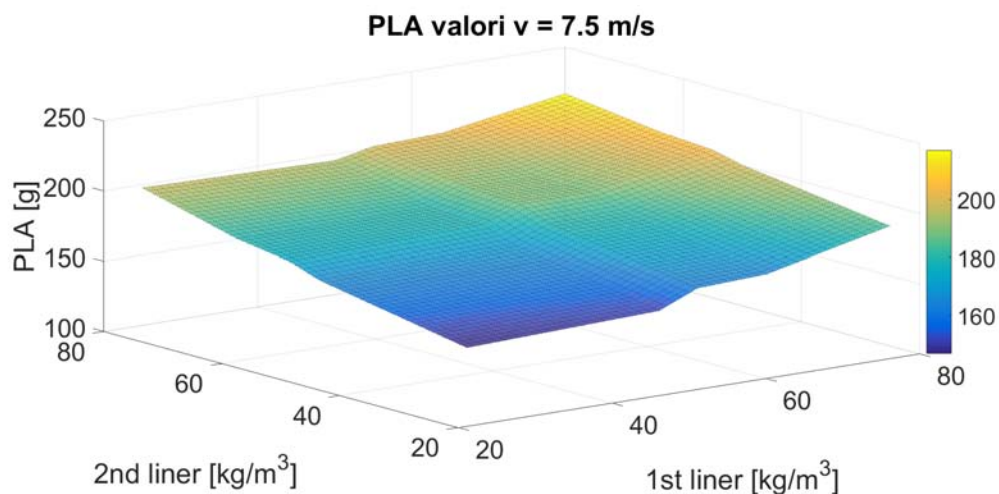
(b) HIC in funzione della configurazione di liner interno ed esterno per tutti i modelli di casco

**Figura 5.27:** Grafi riassuntivi di PLA e HIC in funzione del pattern di schiume di EPS per velocità d'impatto di  $5 \frac{m}{s}$

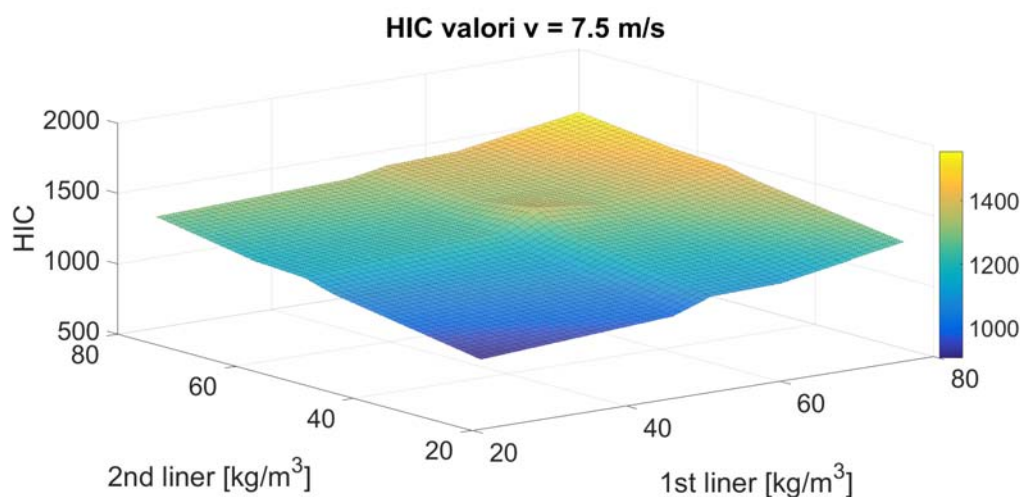
**velocità di impatto di  $5 \frac{m}{s}$**  Come si può vedere in figura 5.27 sono riportati PLA e HIC per tutti modelli presi in esame, per una velocità d'impatto pari a  $5 \frac{m}{s}$ . Quello che si può notare è come tale energia di impatto la soluzione ideale è sempre rappresentata dal modello che presenta in genere una densità media più bassa, quindi il modello A1. Anche considerando i modelli B, i casi in cui il modello lavora meglio è quello in cui la densità media delle schiume che compongono l'imbottitura è più bassa. Questo è segno evidente che per questo ammontare di energia cinetica d'impatto tutti modelli di casco operino all'interno delle rispettive zone di *plateau* per quel che concerne le schiume di EPS. E' interessante andare a confrontare i risultati tra modelli B che presentano le stesse proprietà ma invertite tra liner interno e



esterno. Si può notare come il modello che presenta la schiuma di EPS meno densa nell'imbottitura interna presenti valori PLA e HIC inferiori.



(a) PLA in funzione della con gurazione di liner interno ed esterno per tutti i modelli di casco

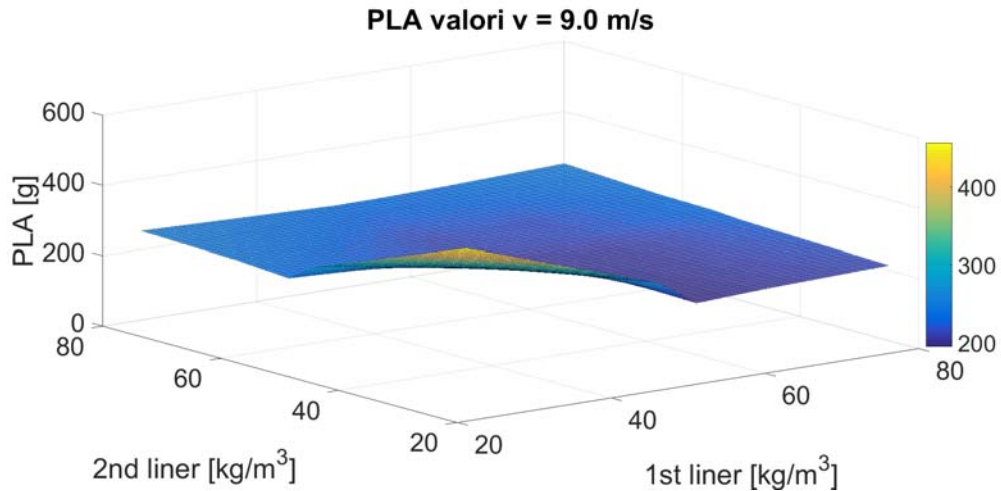


(b) HIC in funzione della con gurazione di liner interno ed esterno per tutti i modelli di casco

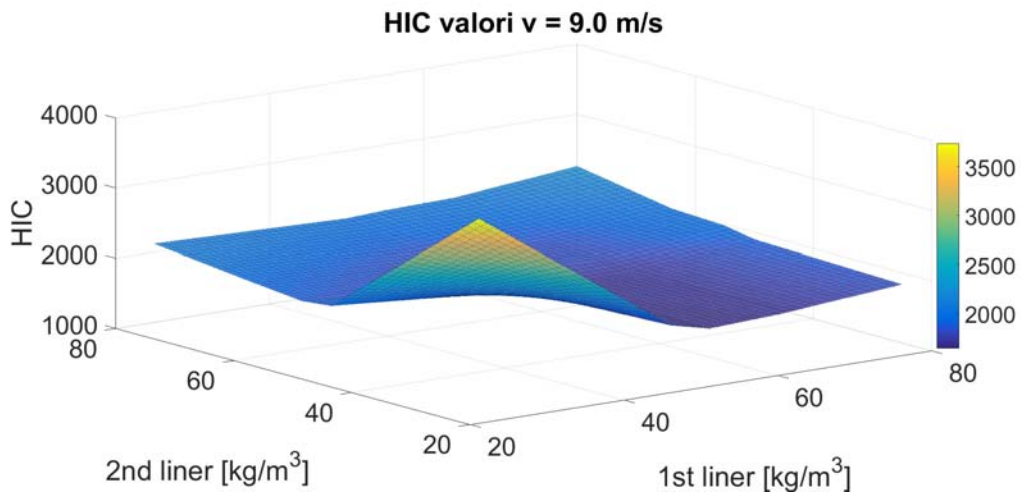
**Figura 5.28:** Gra ci riassuntivi di PLA e HIC in funzione del pattern di schiume di EPS per velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$

**velocità di impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$**  La figura 5.28 riassume i risultati per tutti i modelli in termini di PLA e HIC per una velocità d'impatto di  $7.5 \frac{m}{s}$ . La superficie risulta più alta rispetto a quella riportata in figura 5.27, a seguito dell'aumento della velocità di impatto e quindi dell'energia cinetica coinvolta nell'urto. Essenzialmente anche per tali livelli energetici si ottengono le stesse considerazioni fatte per velocità di  $\frac{m}{s}$ . Il caso A1, il quale presenta densità della schiuma di EPS inferiore è quello che meglio performa. Anche in questo caso i valori PLA e HIC crescono al crescere della densità media del pattern di schiume utilizzate. A differenza dei risultati ottenuti per velocità d'impatto di  $5 \frac{m}{s}$ , nel caso si confrontino configurazioni che presentano medesime proprietà di schiume ma in posizioni invertite, non si ha più che in tutti i casi il modello più efficace è quello che presenta la schiume meno densa

nel liner d'assorbimento interno, anzi vi è una tendenza a favore dei modelli che presentano al loro interno la schiuma con proprietà più densa. nel caso si vadano a confrontare configurazioni che presentano medesime proprietà di schiume ma in posizioni invertite



(a) PLA in funzione della configurazione di liner interno ed esterno per tutti i modelli di casco esterno



(b) HIC in funzione della configurazione di liner interno ed esterno per tutti i modelli di casco esterno

**Figura 5.29:** Gra ci riassuntivi di PLA e HIC in funzione del pattern di schiume di EPS per velocità d'impatto di  $9 \frac{m}{s}$

**velocità di impatto di  $9 \frac{m}{s}$**  la superficie di PLA e HIC risulta più alta a seguito dell'aumento di energia cinetica coinvolta nell'impatto. Il comportamento delle schiume di polistirolo cambia completamente per velocità d'impatto di  $9 \frac{m}{s}$ , in tal caso i modelli A1 B1.2 B2.1 presentano un drastico aumento sia in termini di PLA che di HIC, il che indica una scarsa efficienza nell'assorbire l'energia dell'impatto con la conseguenza di trasferire al centro di massa della falsa testa un alto carico. In particolare le celle che costituiscono la schiuma di EPS per il modello A1 risultano



essere completamente collassate, a significare come il liner di assorbimento operi ben oltre la zona di *plateau*. Anche se non con la stessa entità lo stesso fenomeno si verifica anche con i modelli B1.2 e B2.1 determinando quindi un alto valore di PLA e HIC rispetto a tutti gli altri casi. Ad esclusione di questi tre casi per tutti gli altri modelli si verifica quanto già affermato in precedenza, HIC e PLA aumentano all'aumentare dell' densità media del pattern di schiume. Da notare come in modo completamente opposto a quanto avviene per velocità di  $5 \frac{m}{s}$ , se si prendono in considerazione modelli che presentano medesime proprietà di schiume, quelli che hanno valori minori di HIC e PLA sono quelli che presentano all'interno il liner di assorbimento più denso. Di seguito sono riportate le tabelle con tutti i risultati ottenuti.

\* \* \*



# Conclusione

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di andare ad investigare, attraverso lo strumento dell'analisi numerica FEM, il comportamento meccanico di diverse schiume di EPS per un dato design di casco. L'analisi FEM si sta rilevando nel corso degli anni uno strumento utile e efficace, inoltre è sempre più utilizzato dalle aziende in quanto permettere di fare simulazioni affidabili riducendo il lavoro di prototizzazione allo stretto necessario con conseguente abbattimento dei costi. Nello specifico l'indagine ha riguardato l'individuazione di una soluzione di ottimo, per quel che riguarda l'assorbimento dell'energia cinetica di impatto, utilizzando come valori di riferimento i parametri ingegneristici di PLA e HIC previsti dalla norma ECE 22/05, per una serie di schiume di EPS, inoltre si è cercato di ricavare indicazioni di carattere generale per quel che riguarda la scelta di una data configurazione di schiume piuttosto che altre.

Riassumendo, si sono utilizzate cinque schiume caratterizzate da parametri fisici differenti, a livello di densità, modulo elastico e comportamento a stress di compressione, individuate dalle rispettive densità. Tali schiume sono state usate per due differenti design di casco, uno con singolo e uno con doppio liner di assorbimento dell'energia, ma mantenendo sempre la stessa calotta rigida esterna, per un totale di 25 modelli. Per tali modelli sono state performate un totale di 105 simulazioni, dove veniva simulata per il casco in questione la prova di impatto prevista dalla normativa europea ECE 22/05 nel punto di impatto frontale B, per un range di velocità d'impatto compreso tra i  $5.0 \frac{m}{s}$  e i  $9.0 \frac{m}{s}$ . Nello specifico nove velocità per i modelli con singola imbottitura, scandite da intervalli di velocità di  $0.5 \frac{m}{s}$ , e tre per i modelli a doppio strato, i due valori estremi del range e  $7.5 \frac{m}{s}$  previsto dalla norma. Il programma utilizzato per svolgere le simulazione è stato LSDYNA<sup>®</sup>. A seguito dei risultati ottenuti da tale simulazioni si sono potute trarre una serie di conclusioni che di seguito vengono riportate. In accordo con quanto si trova in letteratura, per i modelli A a liner di assorbimento di energia singolo, la soluzione di schiuma più efficiente per il design di casco dato e una certa velocità d'impatto, e quindi una certa energia cinetica, è quella che lavora all'interno del *plateau* di assorbimento in prossimità dell'inizio della zona di completo collasso delle celle, con riferimento alla curva deformazione-stress a compressione, a seguito del collasso di quest'ultime. Pertanto si ha che il modello A1 che presenta la schiuma di densità pari a  $25 \frac{kg}{m^3}$ , ovvero la più leggera tra quelle in esame, è quella di ottimo per il range di velocità d'impatto comprese tra il  $5.0$  e i  $7.5 \frac{m}{s}$ . Oltre tale range il modello che performa meglio è invece quello che caratterizzato da una densità di  $50 \frac{kg}{m^3}$ , ovvero il modello A2. Questo avviene in quanto l'ammontare dell'energia cinetica d'impatto risulta essere troppo elevata per i modello A1, il quale opera in condizioni tali per cui si

verifica il collasso delle celle della schiuma con conseguente maggior trasferimento di carico di accelerazione. Tutte le altre schiume prese in esame per il casco non risultano ottimali in quanto sovradimensionate, nel senso che potenzialmente esse sono in grado di assorbire un maggior ammontare di energia, presentando una densità maggiore e quindi una curva deformazione-stress di compressione più alta ma con un minore efficienza e quindi un maggior traferimento di accelerazione alla testa. Un discorso analogo si può fare anche per i modelli B di casco caratterizzati da un doppio liner di imbottitura. Infatti quello che accade è che fin tanto che la velocità d'impatto è di  $7.5 \frac{m}{s}$  i modelli che performano meglio sono quelli con densità media inferiore, e quindi dotati di imbottitura più leggera, ovvero B1.1 e B2.1, i quali presentano schiume di densità pari a 25 e  $50 \frac{kg}{m^3}$  ma in posizioni differenti. Per velocità di  $9.0 \frac{m}{s}$  le schiume presenti in questi modelli lavoro al di fuori del *plateau* e pertanto iniziano a perdere di efficacia. Per tale velocità il modello migliore risulta essere il B3.1. E' interessante notare come per i modelli B, per velocità pari a  $5 \frac{m}{s}$ , se si confrontano caschi con medesime proprietà di schiume ma aventi posizioni invertite all'interno del modello, quella più efficace è la configurazione che prevede la schiuma di minor densità all'interno. La situazione risulta completamente ribaltata per velocità di  $9 \frac{m}{s}$ , infatti, in tal caso, i modelli che presentano la schiuma più densa nel liner più interno risultano i più efficaci. Sono due gli elementi che concorrono in tale fenomeno, il primo è rappresentato da come avviene la deformazione del doppio strato di schiuma mentre il secondo è rappresentato dal peso. E' evidente dalle animazioni delle simulazioni come nel caso di cui la schiuma con densità minore si trovi all'interno, questa collasi prima determinando un maggiore trasferimento di carico al centro di massa della testa, mentre quando il liner più denso si trova all'interno, la schiuma si deforma in modo più uniforme andando a posticipare il completo collasso del liner meno denso. A tutto ciò si aggiunge poi il secondo elemento ovvero il maggior peso del casco che presenta lo strato di assorbimento esterno, con conseguente aumento dell'energia cinetica in gioco. Ultimo fatto di interesse è rappresentato dalla soluzione che prevede un doppio liner di assorbimento dell'energia. Difatti se si prende in considerazione il modello B3.1 e lo si confronta con i modelli A1 e A2, il primo presenta un peso totale inferiore rispetto ai secondi e inoltre è in grado di far fronte ad un range di velocità d'impatto più ampio del modello A1 fornendo risultati analoghi al modello A2 per range di velocità più elevate, garantendo quindi un comportamento più versatile e un peso inferiore rispetto al modello A2.

Sviluppi futuri del lavoro svolto in questa tesi possono essere molteplici. Uno su tutti consiste nella possibilità di confrontare i risultati del modello FEM con quelli di un casco reale al fine di validare le conclusioni ottenute. Per quanto concerne le simulazioni numeriche, al fine di avere un lavoro più completo sarebbe utile eseguire delle simulazioni di impatto anche per gli altri punti previsti dalla normativa europea ECE 22/05. Altri enti non europei prevedono un secondo impatto nella zona che è già stata soggetta al fenomeno precedentemente. Un possibile sviluppo di questa tesi potrebbe essere per l'appunto come tale dinamica di test di conformità vada ad inuire nella scelta della schiuma di EPS ottimale. Quello che ci si aspetta è che tale scelta si sposti verso soluzioni che prevedano l'utilizzo di schiume più dense in quanto a seguito del comportamento elastico perfettamente plastico della schiuma, la zona di *plateau* a disposizione nel caso di secondo impatto tende a restringersi. Altro argomento di interesse è un'investigazione numerica che tenga conto anche

delle accelerazioni rotozionali alle quali è sottoposto il capo del motociclista. In particolare sarebbe di interesse confrontare i risultati che si otterrebbero in tale lavoro con quelli ottenuti da questa tesi per quel che concerne la scelta di una schiuma ottimale. Quest'ultimo punto è fondamentale, soprattutto nell'ottica di progettare caschi in grado non solo di superare brillantemente i test normativi previsti dai vari enti di tutto il mondo, ma anche in grado di far fronte nel maniera più efficace possibile a quelle che solo le reali dinamiche di un incidente che veda coinvolto un motociclista. Il tutto al fine di garantire una maggior sicurezza e salvaguardare la salute e la vita delle persone che ogni giorno guidano una motocicletta.



# Bibliografia

- [1] Lee J.M., *Mandatory Helmet Legislation as a Policy Tool for Reducing Motorcycle Fatalities*, *Accident Analysis & Prevention* , Vol. 111, February 2018, Pages 173-183.
- [2] Fernandes F.A.O., Alves de Sousa R.J., *Motorcycle Helmets-A State of the Art Review*, *Accident Analysis & Prevention* , Vol. 56, July 2013, Pages 1-21.
- [3] Bokowski T., *Deliverable D3.1 Accident Statistics*, Motorcycle rider integrated safety, European Commission Research executive agency
- [4] Rice M.R., Troszak L., Erhardt Taryn, Trent R.b., Zhu M., *Novelty Helmet use and Motorcycle Rider Fatality*, *Accident Analysis & Prevention* , Vol. 103, Pages 123-128
- [5] Newman J., *The Biomechanics of Head Trauma and the Development of the Modern Helmet. How far have we really come?*, Proceedings of the IRCOBI conference, Prague.
- [6] Gilchrist A., Mills N.J., *Impact Deformation of ABS and GRP Motorcycle Helmet Shell* , *Plastics Rubber and Composites Processing and Application* 21, Pages 141-150.
- [7] Gilchrist A., Mills N.J., *Modelling of the impact response of motorcycle helmets*, - *International Journal of Impact Engineering* 15, Pages 201 218.
- [8] Mills, N.J., Gilchrist, A., 1991. The Effectiveness of Foams in Bicycle and Motorcycle helmets. *Accident Analysis and Prevention* 23, Pages 153 163.
- [9] Kostopoulos V., Markopoulos Y.P., Giannopoulos G., Vlachos D.E, *Finite Element Analysis of Damage Response of Composite Motorcycle safety Helmets*
- [10] Di Landro L., Sala G., Olivieri D., *Deformation Mechanisms and Energy Absorption of Polystyrene Foams for Protective Helmets*
- [11] Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids: Structure and Properties*, Pergamon, Oxford, 1988
- [12] Chen W., Hao H., Hughes D., Shi Y., Cui J., Xian Li Z., *Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene*, *Materials and Design* 69 (2015), pages 170-180

- 
- [13] Castiglioni A., Castellani L., Cuder G., Comba S., *Relevant Materials Parameters in Cushioning for EPS foam*, Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects
- [14] Rueda, Forero, Liang Cui, Gilchrist M.D. *Optimization of Energy Absorbing Liner for Equestrian Helmets*
- [15] Khosroshahi S. F., Ghajari M., Galvanetto U. *Assessment of Motorcycle Helmet Chin Bar Design Criteria with Respect to Basilar Skull Fracture using FEM*, 10th European LS-DYNA Conference 2015
- [16] Caserta G.D., Iannucci L., Galvanetto U., *Shock Absorption Performance of a MotorBike Helmet with Honeycomb Reinforced Liner*, Composite Structures 93, 2011, pages 2748-2759
- [17] Bianco D.H., Cernicchi A., Galvanetto U., *Design of an Innovative Optimized Motorcycle Helmet*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sport Engineering and Technology
- [18] Commissione Economica Europea *Normativa ECE 22/05*
- [19] Bianchi Luigi, *Caschi e Abbigliamento per la Sicurezza delle Due Ruote*, Confindustria ANCMA
- [20] Hallquist J.O. *LS-DYNA<sup>®</sup> Theory Manual*, Livermore Software Technology (LSTC) 2006
- [21] *LS-DYNA<sup>®</sup> Keyword User's Manual*, Livermore Software Technology (LSTC)



# Appendice A

## Tabelle riassuntive di PLA e HIC

In questa appendice sono riassunti tutti i valori di PLA e HIC ottenuti dalle simulazioni per tutti i modelli A e B realizzati

**Tabella A.1:** tabella riassuntiva valori di PLA e HIC per i modelli A

modello proprietà	$v = 5.0 \text{ m/s}$				
	A1 $\rho_{25}$	A2 $\rho_{50}$	A3 $\rho_{55}$	A4 $\rho_{64}$	A5 $\rho_{80}$
PLA [g]	92.19	124.57	140.35	139.14	154.757
HIC	431	568	668	632	706.6

modello proprietà	$v = 5.5 \text{ m/s}$				
	A1 $\rho_{25}$	A2 $\rho_{50}$	A3 $\rho_{55}$	A4 $\rho_{64}$	A5 $\rho_{80}$
PLA [g]	99.61	132.99	148.92	148.90	168.33
HIC	470	665	782	745	843

modello proprietà	$v = 6.0 \text{ m/s}$				
	A1 $\rho_{25}$	A2 $\rho_{50}$	A3 $\rho_{55}$	A4 $\rho_{64}$	A5 $\rho_{80}$
PLA [g]	107.01	142.92	159.07	159.68	180.67
HIC	576	776	909	872	994

Tabella A.2: tabella riassuntiva valori di PLA e HIC per i modelli A

modello	v = 6.5 m/s					v = 7.0 m/s				
	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
proprietà	$\rho_{25}$	$\rho_{50}$	$\rho_{55}$	$\rho_{64}$	$\rho_{80}$	$\rho_{25}$	$\rho_{50}$	$\rho_{55}$	$\rho_{64}$	$\rho_{80}$
PLA [g]	119.01	152.44	170.33	169.71	193.50	132.69	162.21	177.48	180.14	204.69
HIC	672	902	1047	1024	1164	756	1039	1202	1171	1349
modello	v = 7.5 m/s					v = 8.0 m/s				
	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
proprietà	$\rho_{25}$	$\rho_{50}$	$\rho_{55}$	$\rho_{64}$	$\rho_{80}$	$\rho_{25}$	$\rho_{50}$	$\rho_{55}$	$\rho_{64}$	$\rho_{80}$
PLA [g]	147.00	170.573	188.44	190.16	216.90	212.02	177.223	197.73	201.21	229.30
HIC	905	1168	1379	1345	1553	1245	1293	1499	1539	1775
modello	v = 8.5 m/s					v = 9.0 m/s				
	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
proprietà	$\rho_{25}$	$\rho_{50}$	$\rho_{55}$	$\rho_{64}$	$\rho_{80}$	$\rho_{25}$	$\rho_{50}$	$\rho_{55}$	$\rho_{64}$	$\rho_{80}$
PLA [g]	366.64	186.19	203.15	210.82	240.11	455.97	197.24	211.70	218.80	251.56
HIC	2368	1463	1648	1678	2014	3736	1694	1834	1851	2257

**Tabella A.3:** tabella riassuntiva valori di PLA e HIC per i modelli B

modello proprietà	v = 5.0 m/s				v = 7.5 m/s				v = 9.0 m/s			
	B1.1 25/50	B1.2 25/55	B1.3 25/64	B1.4 25/80	B1.1 25/50	B1.2 25/55	B1.3 25/64	B1.4 25/80	B1.1 25/50	B1.2 25/55	B1.3 25/64	B1.4 25/80
PLA [g]	104.71	109.95	111.35	119.35	166.57	174.10	180.04	197.94	288.25	233.50	244.34	253.20
HIC	478,7	511	495	509	1085	1147	1170	1290	1924	1879	1960	2118
	B2.1 50/25	B2.2 50/55	B2.3 50/64	B2.4 50/80	B2.1 50/25	B2.2 50/55	B2.3 50/64	B2.4 50/80	B2.1 50/25	B2.2 50/55	B2.3 50/64	B2.4 50/80
PLA [g]	111.90	128.037	126.98	131.21	151.45	178,31	180,70	195,41	269.50	209.34	214.14	236.20
HIC	518	602	577	587	994	1241	1256	1339	1776	1738	1786	2037
	B3.1 55/25	B3.2 55/50	B3.3 55/64	B3.4 55/80	B3.1 55/25	B3.2 55/50	B3.3 55/64	B3.4 55/80	B3.1 55/25	B3.2 55/50	B3.3 55/64	B3.4 55/80
PLA [g]	118.757	134.13	137.97	140.82	163.2	180.4	190.4	201.1	194.69	205.31	218.30	236.50
HIC	557,2	631	650	645	1092	1272	1326	1390	1645	1694	1829	2064
	B4.1 64/25	B4.2 64/50	B4.3 64/55	B4.4 64/80	B4.1 64/25	B4.2 64/50	B4.3 64/55	B4.4 64/80	B4.1 64/25	B4.2 64/50	B4.3 64/55	B4.4 64/80
PLA [g]	119.96	135.013	140.34	141.89	165.35	182.13	189.26	202.83	203.91	207.43	217.19	240.20
HIC	551	618	664	642	1106	1284	1326	1410	1690	1717	1807	2086
	B5.1 80/25	B5.2 80/50	B5.3 80/55	B5.4 80/64	B5.1 80/25	B5.2 80/50	B5.3 80/55	B5.4 80/64	B5.1 80/25	B5.2 80/50	B5.3 80/55	B5.4 80/64
PLA [g]	125.62	144.69	151.87	152.14	185.29	200.15	205.27	207.92	213.7	227.8	234.1	237.2
HIC	573	658	712	689	1257	1407	1452	1474	1835	1899	1979	2016