

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

STUDIO DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DI STRUTTURE
RETICOLARI NEI RIVESTIMENTI DEI CASCHI DA MOTOCICLISTA

Relatore

Prof. Ugo Galvanetto

Correlatore

Dr. Siamak Farajzadeh Khosroshahi

Candidata

Laura Lascialandà

1133375

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

Gli incidenti stradali ad oggi sono una delle prime cause di morte in quasi tutti i Paesi del mondo. Statisticamente, quelli che coinvolgono motociclisti e ciclisti conducono più frequentemente al decesso dei soggetti coinvolti, poiché il loro livello di protezione è inferiore. Per essi le principali cause di morte o lesioni gravi invalidanti sono i traumi cranici che avvengono in seguito a forti colpi al cranio e/o alla colonna vertebrale. Una soluzione che in molti casi si rivela fondamentale per la sopravvivenza dei soggetti colpiti è il corretto uso dei dispositivi di protezione personale, in particolar modo del casco. Esso infatti è un componente indispensabile per la prevenzione dei traumi cranici e negli anni sono state proposte e messe a punto tecnologie e architetture sempre più all'avanguardia volte a rendere questo dispositivo più performante e sicuro.

Lo scopo di questo elaborato si fonda proprio su tale concetto: studiare il comportamento di nuovi materiali a base polimerica per poter trovare soluzioni sempre più idonee alla funzione che devono svolgere andando a sostituire le schiume in polistirene espanso attualmente in uso.

Inizialmente è presentata una descrizione dei caschi nel loro complesso, riguardante l'evoluzione storica, gli standard attuali per l'omologazione, i componenti di cui sono realizzati e quale funzione svolgono. Successivamente si è passati all'introduzione dei materiali che sono alla base dei moderni componenti dei caschi prestando particolare attenzione ai polimeri e ai solidi cellulari, di cui si tratterà nelle analisi eseguite al computer.

Infine si è esposto il lavoro svolto in questo elaborato, ovvero uno studio agli elementi finiti tramite il software LS-Dyna, di quattro diverse tipologie di strutture reticolari (a celle semplici e a celle poliedriche) realizzate ognuna con tre materiali polimerici (Durable, Elasto 95, Flexible) che differiscono tra loro per rigidità ed elasticità e sono normalmente impiegati come filamenti per la realizzazione di componenti tramite stampante 3D.

Dopo una prima presentazione delle strutture e della loro implementazione nel software, si è passati all'esposizione dei risultati ottenuti. Innanzitutto viene mostrato un confronto tra i dati raccolti sperimentalmente da campioni realizzati tramite stampante 3D e quelli estrapolati dalle simulazioni al computer. Tale confronto è necessario per validare i modelli FEM in modo tale da poterli impiegare nelle successive analisi in cui sono state fatte variare le velocità iniziali. Di esse sono presentate le curve forza/spostamento e l'energia assorbita tramite deformazione in seguito all'impatto.

Quello che è emerso da tali analisi è che le strutture reticolari possono essere un valido sostituto alle schiume in polistirene espanso nei rivestimenti interni dei caschi, poiché rispetto ad esse presentano alcuni vantaggi, come ad esempio la capacità di recuperare abbondantemente la forma iniziale. Infine si è visto che non tutte le strutture e i materiali esaminati sono ottimali allo scopo, infatti alcune di esse, in particolare quelle con le celle poliedriche, si sono rivelate nei casi a bassa velocità troppo rigide per poter assorbire adeguatamente l'energia dell'urto. La stessa cosa vale per i materiali, infatti non tutti consentono una deformazione adeguata ad assolvere a questa funzione. Per i motivi appena esposti le strutture reticolari necessitano di ulteriori e più approfonditi studi.

Abstract

Road accidents are one of the leading causes of death in almost all countries all over the world. Statistically, those that involve motorcyclists and cyclists lead more frequently to the death of the riders, since their level of protection is lower. For them the main causes of death or serious invalidating injuries are the TBI (Traumatic Brain Injury) that occur following strong blows to the skull and/or the vertebral column. A solution that in many cases is fundamental for the survival of those affected is the correct use of personal protective equipment, particularly the helmet. In fact, it is an indispensable component in the prevention of head injuries and over the years more and more cutting-edge technologies and architectures have been proposed and developed to make this device more performing and safe.

The purpose of this paper is based precisely on this concept: studying the behaviour of new polymer-based materials in order to find solutions that are increasingly suitable for the function they are to perform by replacing the polystyrene foam currently in use.

Initially, a description of the helmets concerning the historical evolution is presented, the current standards for homologation, the components of which they are made and which function they perform. Subsequently the introduction of the materials that are the basis of the modern helmets' components is displayed, paying particular attention to polymers and cellular solids, which will be dealt with in computer analysis.

In the end, the work done for this paper is described. It is a study in finite elements using the LS-Dyna software on four different types of lattice structures (with simple cells and polyhedral cells), each made with three polymeric materials (Durable, Elasto 95, Flexible) which differ in terms of stiffness and elasticity and they are normally used as filaments in component manufacturing with 3D printers.

After a first presentation of the structures and their implementation in the software, the results obtained are presented. Firstly, there is a comparison between the data experimentally collected from samples made with a 3D printer and those extrapolated from computer simulations. This comparison is necessary to validate the FEM models in order to use them in the following analyses in which the impact speeds have been varied. The force/displacement curves and the energy absorbed by deformation following the impact are presented.

What emerged from these analyses is that the lattice structures can be a valid substitute to polystyrene foams in the helmets' inner liners, because compared to them they have some advantages, such as the ability to recover the initial shape abundantly.

Finally, we have seen that not all the structures and materials examined are optimal for the purpose, in fact some of them, and those with polyhedral cells in particular, have proved to be too rigid to adequately absorb the energy of the impact in low speed cases. The same thing applies to materials, in fact not all of them allow a suitable deformation to perform this function.

For the reasons just explained, the lattice structures need further and more in-depth studies.

Indice

Capitolo 1 Introduzione	1	
1.1	Gli incidenti stradali	1
1.2	I traumi cranici.....	4
1.2.1	Tipi di lesioni cerebrali	6
Capitolo 2 I caschi	7	
2.1	Cenni storici sui caschi da motocicletta.....	7
2.1.1	Fine '800	7
2.1.2	Primi del '900.....	8
2.1.3	Metà del '900 e Lawrence d'Arabia.....	8
2.1.4	Dagli Anni '50 al giorno d'oggi.....	9
2.2	Stato dell'arte attuale	12
2.3	Criteri di omologazione	13
2.4	Tipi di caschi.....	15
2.4.1	Il casco integrale (full-face)	15
2.4.2	Il casco modulare o apribile (flip-up).....	16
2.4.3	Il casco jet o aperto (open face AKA $\frac{3}{4}$ helmet).....	16
2.4.4	Il casco demi-jet (half-helmet AKA brain bucket)	17
2.4.5	Il casco da cross (off-road helmet).....	18
2.4.6	Il casco crossover (dual-sport helmet AKA ADV, hybrid, enduro)	18
2.5	Componenti.....	19
2.5.1	Calotta esterna	20
2.5.2	Rivestimento interno	20
2.5.3	Imbottitura.....	21
2.5.4	Sistema di ritenzione	21
2.5.5	Visiera	22
2.5.6	Sistema di aerazione.....	24
2.5.7	Sistema di insonorizzazione dai rumori esterni	25
2.6	Uso ed efficacia	27
Capitolo 3 I materiali	29	
3.1	Le materie plastiche: accenni sui polimeri	29
3.1.1	Formazione dei polimeri	29
3.1.2	Caratteristiche dei polimeri	30
3.1.3	Temperatura di transizione vetrosa	34
3.1.4	I polimeri termoplastici	35
3.1.5	I polimeri termoindurenti	36
3.1.6	Comportamento viscoso dei polimeri	36
3.1.7	Proprietà meccaniche dei polimeri.....	40
3.1.8	Meccanismi di deformazione dei polimeri.....	42
3.2	Le materie plastiche: accenni sui materiali compositi a matrice polimerica	44
3.2.1	Principali tipi di matrici utilizzati	45

3.2.2	Principali tipi di fibre utilizzati	45
3.2.3	I pre-impregnati o prepreg	46
3.2.4	Proprietà dei compositi	47
3.3	Materiali attualmente in uso nei caschi	51
3.3.1	Policarbonato e ABS	51
3.3.2	Fibre di vetro, carbonio e Kevlar	52
3.3.3	EPS o polistirene espanso	54
3.3.4	Poliuretano	56
3.3.5	Nylon.....	56
3.4	Materiali assorbitori di energia.....	57
3.4.1	I solidi cellulari	57
3.4.2	Comportamento a compressione dei materiali assorbitori di energia	59
3.4.3	Modelli analitici del comportamento a compressione.....	62
3.4.3.1	Il modello di Gibson.....	62
3.4.3.2	Il modello di Rusch	66
3.4.4	Differenze tra strutture bending-dominated e stretch-dominated	67
3.5	Strutture gerarchiche reticolari vs schiume	71
Capitolo 4 Modelli e analisi FEM		73
4.1	Geometria dei modelli	73
4.1.1	Incudine.....	74
4.1.2	Striker.....	74
4.1.3	R_Pr.....	75
4.1.4	R_Tet.....	75
4.1.5	H_Pr	75
4.1.6	H_Tet.....	76
4.2	Materiali utilizzati.....	77
4.2.1	Striker e incudine	77
4.2.2	Struttura reticolare.....	78
4.3	Modelli FEM in LS-Dyna.....	82
4.3.1	Striker e incudine	83
4.3.2	Struttura reticolare gerarchica	83
4.4	Set up delle simulazioni.....	84
4.4.1	Condizioni al contorno: vincoli.....	84
4.4.2	Condizioni al contorno: contatto	84
4.4.3	Condizioni iniziali	86
Capitolo 5 Risultati delle simulazioni		89
5.1	Confronto risultati analisi FEM vs risultati sperimentali	89
5.1.1	Durable	92
5.1.2	Elasto 95.....	94
5.1.3	Flexible.....	96
5.2	Risultati ottenuti variando la velocità di impatto.....	98
5.2.1	Risultati con velocità di impatto 1 m/s.....	98
5.2.2	Risultati con velocità di impatto 2 m/s.....	101
5.2.3	Risultati con velocità di impatto 7.5 m/s.....	103

5.2.4	Risultati con velocità di impatto 4.4 m/s.....	106
5.3	Energia assorbita.....	109
5.4	Deformate significative	111
5.4.1	Deformate post-schiacciamento	111
5.4.2	Differenze nel meccanismo di deformazione delle strutture.....	112
5.4.3	Correlazione grafici e deformate.....	113
Capitolo 6 Conclusioni.....		117
Appendice A.....		119
7.1	Risultati Durable.....	119
7.2	Risultati Elasto 95.....	122
7.3	Risultati Flexible.....	125
Bibliografia		129

Elenco delle figure

Figura 1.1: Tasso di mortalità su 100'000 abitanti suddiviso per aree geografiche negli anni 2013 e 2016 [1].	1
Figura 1.2: Distribuzione delle morti tra le varie categorie di utilizzatori suddivise per aree geografiche [1].	2
Figura 1.3: Differenza di incidenza percentuale di ammissione al Pronto Soccorso in Romagna per traumi cranici prima e dopo l'entrata in vigore della legge 472/1999 [4].	3
Figura 1.4: Schema di un trauma cranico [6].	4
Figura 1.5: Schema degli effetti di un trauma cranico [6].	5
Figura 1.6: Esempi di TAC su pazienti con traumi cranici. [8]	6
Figura 2.1: Casco realizzato da Gottlieb Daimler [10].	7
Figura 2.2: Caschi dal catalogo di Harley-Davidson [11].	8
Figura 2.3: Schema tratto dal brevetto del 1953 del professor Lombard et al [12].	9
Figura 2.4: Primo casco da moto della casa produttrice Schuberth a sinistra e Bell a destra (1954) [13].	10
Figura 2.5: Primo casco integrale in materiale composito di Schuberth (1976) [13].	11
Figura 2.6: Primo casco con superficie aerodinamica di Schuberth (1984) [13].	11
Figura 2.7: Schema della sigla di omologazione [16].	14
Figura 2.8: Esempio di etichetta di omologazione [17].	14
Figura 2.9: Casco integrale [18].	15
Figura 2.10: Casco modulare [13].	16
Figura 2.11: Casco jet [19].	17
Figura 2.12: Casco demi jet [20].	17
Figura 2.13: Casco da cross [21].	18
Figura 2.14: Casco crossover [23].	18
Figura 2.15: Componenti di base di un casco da moto [24].	19
Figura 2.16: Esempio di calotta esterna [25].	20
Figura 2.17: Sezione di un casco da moto in cui sono identificabili la calotta esterna (a), il rivestimento interno (b) e l'imbottitura (c) [26].	21
Figura 2.18: Le tre tipologie di cinturini di sicurezza: sgancio rapido, micrometrico e doppio anello [27].	22
Figura 2.19: Componenti del sistema Pinlock® [30]	23
Figura 2.20: Differenza di visuale senza Pinlock® e con Pinlock® [30].	24
Figura 2.21: Sistema di aerazione [32].	24
Figura 2.22: Funzionamento del sistema di raffreddamento [33].	25
Figura 2.23: Sistema di cancellazione del rumore attivo [35].	26
Figura 2.24: Schema della percentuale di distribuzione dei danni [37].	28
Figura 3.1: Rappresentazione schematica dei tipi di catene polimeriche [38].	31
Figura 3.2: Tipi di copolimeri [39].	32
Figura 3.3: Variazione delle proprietà meccaniche all'aumentare del peso molecolare del polimero [38].	33
Figura 3.4: Differenze tra un polimero amorfo e uno cristallino [38].	33

Figura 3.5: Volume specifico in funzione della temperatura, differenze di comportamento tra polimeri amorfi e cristallini [38].	34
Figura 3.6: Effetto della temperatura sulla resistenza all'impatto di diverse materie plastiche [38].	35
Figura 3.7: Curva di flusso in cui il coefficiente angolare costante è la viscosità η [40].	36
Figura 3.8: Variazione della viscosità in funzione del gradiente di velocità per i tre diversi tipi di fluido: dilatante, newtoniano e pseudoplastico [41].	37
Figura 3.9: Curva di flusso con assi logaritmici per un polimero pseudoplastico [38].	38
Figura 3.10: Curva di flusso ad assi logaritmici per un polimero pseudoplastico in cui si presenta un secondo plateau per alti gradienti di velocità [41].	39
Figura 3.11: Viscosità di alcuni polimeri termoplastici in funzione del gradiente di velocità [38].	39
Figura 3.12: Grafico sforzo/deformazione per le tre categorie di comportamento dei polimeri [39].	40
Figura 3.13: Variazione di comportamento in base alla temperatura [39].	41
Figura 3.14: Comportamento dei polimeri duttili [43].	41
Figura 3.15: Schematizzazione della deformazione di un elastomero [39].	42
Figura 3.16: Schema deformazione elastica e plastica dei polimeri semi-cristallini [39].	43
Figura 3.17: Rappresentazione schematica delle tipologie di compositi a matrice polimerica [38].	44
Figura 3.18: Esempio di prepreg in fibra di carbonio [44].	47
Figura 3.19: Andamento della resistenza allo sforzo in funzione della direzione delle fibre [44].	48
Figura 3.20: Valori del modulo elastico ottenuti dai metodi di Voigt, Reuss e Hill al variare della frazione volumetrica di fibre [44].	50
Figura 3.21: Calotta esterna in policarbonato appena estratta dallo stampo [49].	52
Figura 3.22: Estrazione di un casco in composito dal suo stampo, si nota la parte in eccesso che successivamente verrà rimossa [48].	53
Figura 3.23: Rivestimenti interni dei caschi realizzati in EPS [49].	55
Figura 3.24: Stampo utilizzato per la realizzazione dei rivestimenti interni in EPS [49].	55
Figura 3.25: Polistirene espanso visto al microscopio [44].	58
Figura 3.26: Differenze tra celle aperte (a sinistra) e celle chiuse (a destra) di alluminio mostrate al microscopio [54].	58
Figura 3.27: Schema di una cella aperta (a sinistra) e di una cella chiusa (a destra) [57].	59
Figura 3.28: Grafici tensione/deformazione per due materiali assorbitori di energia, una schiuma elastomerica (sopra) e una elasto-plastica (sotto) [53].	60
Figura 3.29: Confronto comportamento alla compressione di un materiale elastico e una schiuma [58].	61
Figura 3.30: Effetto dell'aumento della velocità di deformazione sulla risposta del materiale [59].	62
Figura 3.31: Differenze tra un meccanismo (a) e una struttura (b) [61].	67
Figura 3.32: Tipi di celle poliedriche [61].	68
Figura 3.33: Deformazione flessionale, di buckling e di frattura per una cella aperta [62].	69
Figura 3.34: Curva sforzo/deformazione di una struttura bending-dominated (a sinistra) e di una stretch-dominated (a destra) [62].	69

Figura 3.35: Confronto tra un'immagine ricavata tramite microscopio di una schiuma in polistirene espanso dove è possibile vedere la randomicità nelle dimensioni delle celle e l'anisotropia della schiuma [55] e alcuni esempi di campioni di strutture reticolari [63].	72
Figura 3.36: Curve tensione/deformazione per nove diverse strutture reticolari progettate ad hoc [64].	72
Figura 4.1: L'incudine con le sue dimensioni.	74
Figura 4.2: Lo striker con le sue dimensioni.	74
Figura 4.3: Schema del modello con struttura R_Pr.	75
Figura 4.4: Schema del modello con struttura R_Tet.	75
Figura 4.5: Schema del modello con struttura H_Pr.	76
Figura 4.6: Schema del modello con struttura H_Tet.	76
Figura 4.7: Assieme del modello FEM con i tre componenti.	82
Figura 4.8: Vista in modalità "beam prism" di tutte e quattro le strutture esaminate.	83
Figura 4.9: Esempi di contatto non rilevato [72].	85
Figura 4.10: Differenze di contatto con un master con mesh raffinata e slave grezza e viceversa [72].	85
Figura 4.11: Posizione iniziale dello striker.	87
Figura 5.1: Una struttura reticolare dopo il test sperimentale di laboratorio.	90
Figura 5.2: Altro esempio di struttura reticolare dopo i test di laboratorio.	91
Figura 5.3: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Pr in Durable.	92
Figura 5.4: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Tet in Durable.	92
Figura 5.5: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Pr in Durable.	93
Figura 5.6: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Tet in Durable.	93
Figura 5.7: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Pr in Elasto 95.	94
Figura 5.8: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Tet in Elasto 95.	94
Figura 5.9: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Pr in Elasto 95.	95
Figura 5.10: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Tet in Elasto 95.	95
Figura 5.11: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Pr in Flexible.	96
Figura 5.12: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Tet in Flexible.	96
Figura 5.13: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Pr in Flexible.	97
Figura 5.14: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Tet in Flexible.	97
Figura 5.15: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.	99
Figura 5.16: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.	99
Figura 5.17: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.	100
Figura 5.18: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.	100
Figura 5.19: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.	101
Figura 5.20: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.	102
Figura 5.21: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.	102

Figura 5.22: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.....	103
Figura 5.23: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.....	104
Figura 5.24: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.....	104
Figura 5.25: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.....	105
Figura 5.26: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.....	105
Figura 5.27: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.....	106
Figura 5.28: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.....	107
Figura 5.29: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.....	107
Figura 5.30: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.....	108
Figura 5.31: Deformate al termine della sollecitazione per velocità iniziale pari a 7.5 m/s. A) Strutture realizzate in Durable; B) Strutture realizzate in Elasto 95; C) Strutture realizzate in Flexible.....	111
Figura 5.32: Deformazioni nei primi istanti di simulazione per le strutture H_Pr (in Durable) H_Tet (in Elasto 95), a 4.4 m/s.	112
Figura 5.33: Deformazioni nei primi istanti di simulazione per le strutture R_PR e R_Tet in Elasto 95, a 4.4 m/s.	113
Figura 5.34: Correlazione Deformate/Grafico per la struttura H_Pr in Durable a 7.5 m/s....	114
Figura 5.35: Correlazione Deformate/Grafico per la struttura H_Pr in Elasto 95 a 4.4 m/s..	114
Figura 5.36: Correlazione Deformate/Grafico per la struttura H_Tet in Flexible a 7.5 m/s..	115

Elenco delle tabelle

Tabella 1.1: Classificazione della gravità di un trauma cranico.	5
Tabella 4.1: Variazione dell'altezza delle celle in base alla riga in cui sono disposte.	76
Tabella 4.2: Proprietà dei due materiali utilizzati per lo striker e l'incudine.	78
Tabella 4.3: Proprietà dei tre materiali utilizzati per la struttura reticolare.	79
Tabella 4.4: Valori delle masse per ogni struttura reticolare in base al materiale costituente.	81
Tabella 4.5: Densità e densità relative percentuali delle quattro strutture per ognuno dei tre materiali.	81
Tabella 5.1: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 1 m/s.	109
Tabella 5.2: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 2 m/s.	109
Tabella 5.3: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 4.4 m/s.	109
Tabella 5.4: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 7.5 m/s.	110
Tabella 7.1: Risultati Durable schiacciamento.	119
Tabella 7.2: Risultati Durable reazioni vincolari.	120
Tabella 7.3: Risultati Durable stress e strain negli elementi beam.	121
Tabella 7.4: Risultati Elasto 95 schiacciamento.	122
Tabella 7.5: Risultati Elasto 95 reazioni vincolari.	123
Tabella 7.6: Risultati Elasto 95 stress e strain negli elementi beam.	124
Tabella 7.7: Risultati Flexible schiacciamento.	125
Tabella 7.8: Risultati Flexible reazioni vincolari.	126
Tabella 7.9: Risultati Flexible stress e strain negli elementi beam.	127

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Gli incidenti stradali

Ogni anno nel mondo, stando ai dati forniti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, a causa degli incidenti stradali muoiono circa 1.35 milioni di persone; un numero estremamente elevato di decessi che non accenna a diminuire, ma anzi continua a crescere costantemente nonostante gli sforzi effettuati negli anni dai governi in termini di leggi specifiche sulla tutela degli utilizzatori delle strade, che in piccola parte mitigano questo fenomeno.

Le lesioni riportate in seguito ad un incidente stradale sono tuttora l'ottava causa di morte per ogni fascia d'età, diventando quella principale per i giovani di età compresa tra i 5 e i 29 anni. Si stima che nel mondo muoiano più persone in questo modo che per l'AIDS, la tubercolosi e le malattie diarroiche.

I dati riportano un enorme divario tra i Paesi industrializzati e quelli sotto sviluppati, infatti per i primi il tasso di mortalità su 100'000 persone è di 8.3, ma questo valore aumenta drasticamente per i secondi, arrivando a 27.5 morti su 100'000. Per quanto riguarda il tasso di morti regionale l'Europa e le Americhe sono quelle con il tasso più basso, infatti per esse i valori si attestano su 9.3 e 15.6 decessi su 100'000 abitanti, mentre i dati peggiori si riscontrano in Africa e nel Sud-Est asiatico, dove si registrano valori di 26.6 e 20.7. (Figura 1.1)

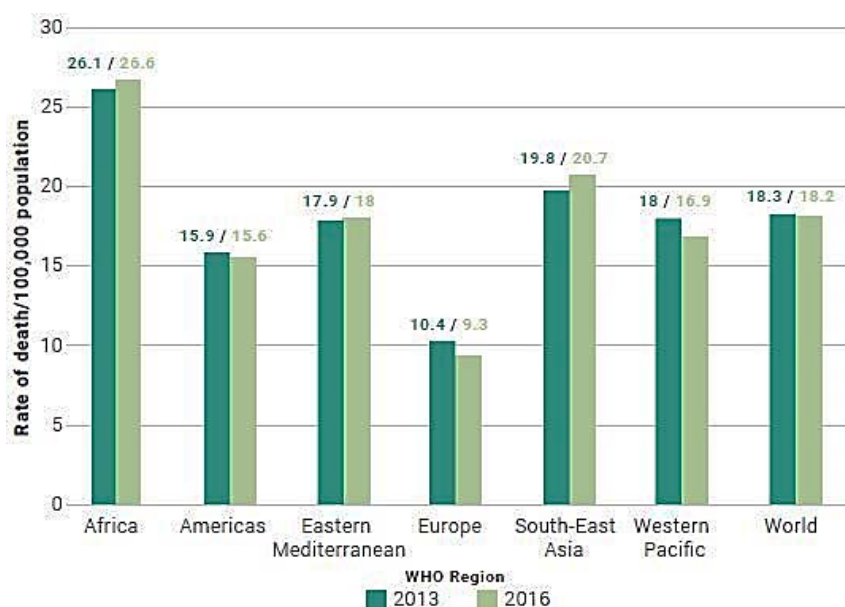


Figura 1.1: Tasso di mortalità su 100'000 abitanti suddiviso per aree geografiche negli anni 2013 e 2016 [1].

I soggetti più vulnerabili risultano essere i pedoni, i ciclisti e i motociclisti a due e tre ruote, infatti insieme rappresentano più della metà delle morti in tutto il mondo. Anche in questo caso il tasso di mortalità varia di molto tra i vari continenti, come è possibile notare nella Figura 1.2.

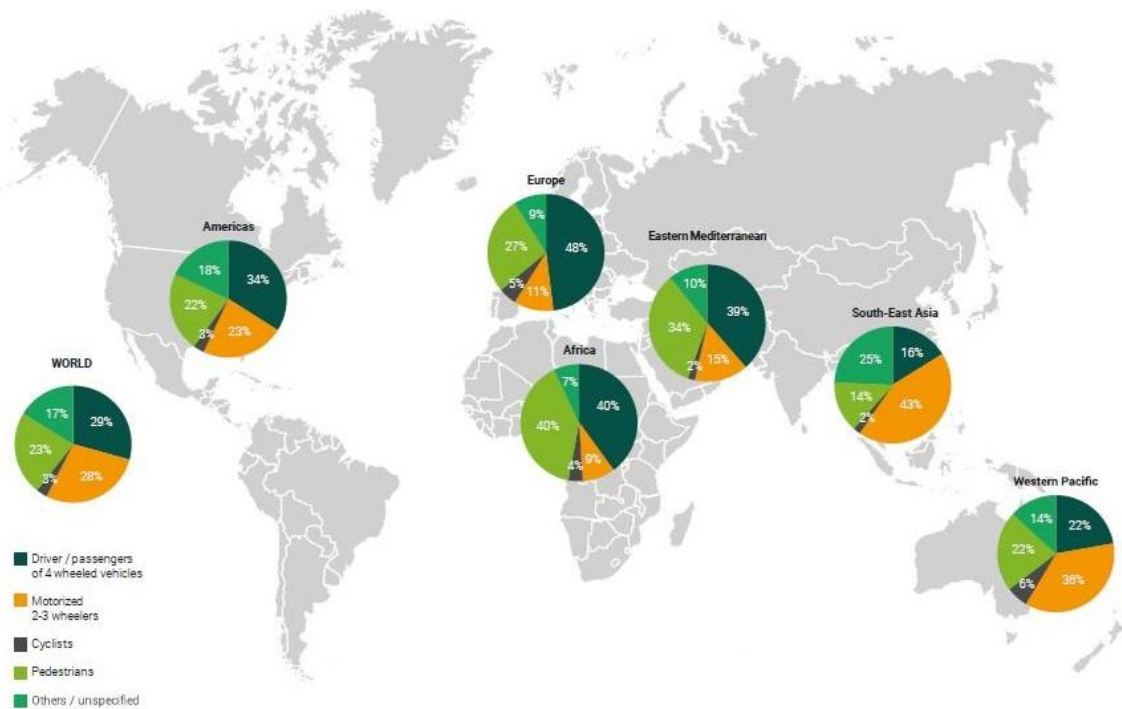


Figura 1.2: Distribuzione delle morti tra le varie categorie di utilizzatori suddivise per aree geografiche [1].

La principale causa di morte negli incidenti stradali sono le lesioni al cranio, che si riscontrano in numero maggiore nei motociclisti. Per questo motivo è molto importante il corretto uso dei dispositivi di protezione personale, come ad esempio i caschi, infatti il loro utilizzo porta ad una riduzione del 42% del rischio di lesioni fatali e del 69% di traumi cranici. [1]

In Italia la prima legge in materia è stata introdotta nel 1986 e prevedeva l'obbligo del casco sia in città che fuori dai centri abitati per i soli minorenni su ciclomotori e per passeggeri e conducenti dei mezzi di cilindrata superiore (50 cmc). Ma soltanto nell'anno 2000 con la legge 472/1999 l'obbligo venne esteso anche agli utenti maggiorenni.

In concomitanza con l'introduzione della legge 472/1999 il Ministero dei Trasporti in convenzione con l'Istituto Superiore di Sanità dall'anno 2000 ha avviato il "Sistema Ulisse", un progetto di monitoraggio capillare su tutto il territorio nazionale dell'uso delle cinture di sicurezza e del casco, atto a valutare il grado di sicurezza delle strade e il livello di protezione dei cittadini italiani in modo tale da individuare le aree più critiche che ancora non soddisfano il livello di sicurezza imposto dalle normative e accrescere quindi negli utenti della strada la consapevolezza dei rischi connessi al mancato uso dei dispositivi di protezione personale. [2]

I dati forniti da questi rilevamenti sono molto significativi, infatti mostrano drastici cali nel numero dei morti e feriti gravi dovuti ad incidenti stradali in seguito all'introduzione delle leggi sopra citate.

Nel 1970 sono avvenuti 13226 decessi in seguito ad incidenti stradali, mentre nel 1998 il numero si è ridotto a 8462 arrivando a 3381 nel 2014. [3]

Uno studio statistico svolto sulla sola regione Romagna prima e dopo l'introduzione della legge 472/1999 ha rivelato che prima dell'estensione dell'obbligo di casco ai motociclisti di tutte le età solo il 19.5% di essi indossava il casco correttamente, ma nel periodo immediatamente successivo all'entrata in vigore della legge è aumentato fino al 97.5%, grazie anche alla grande campagna mediatica svolta in quei mesi. E come conseguenza di tale obbligo la percentuale di accessi al Pronto Soccorso di Cesena per trauma cranico in seguito ad incidenti in motocicletta è diminuita del 66%. Inoltre sono stati riscontrati anche effetti positivi su motociclisti di tutte le età, infatti l'incidenza percentuale di traumi cranici è diminuita notevolmente per ogni categoria di età, ma in particolare nella fascia tra i 18 e i 30 anni dove si è verificato un calo del 72% (Figura 1.3).

Di conseguenza è possibile affermare che l'obbligo di indossare caschi da motocicletta è un efficace metodo per prevenire i traumi cranici in qualsiasi fascia d'età [4].

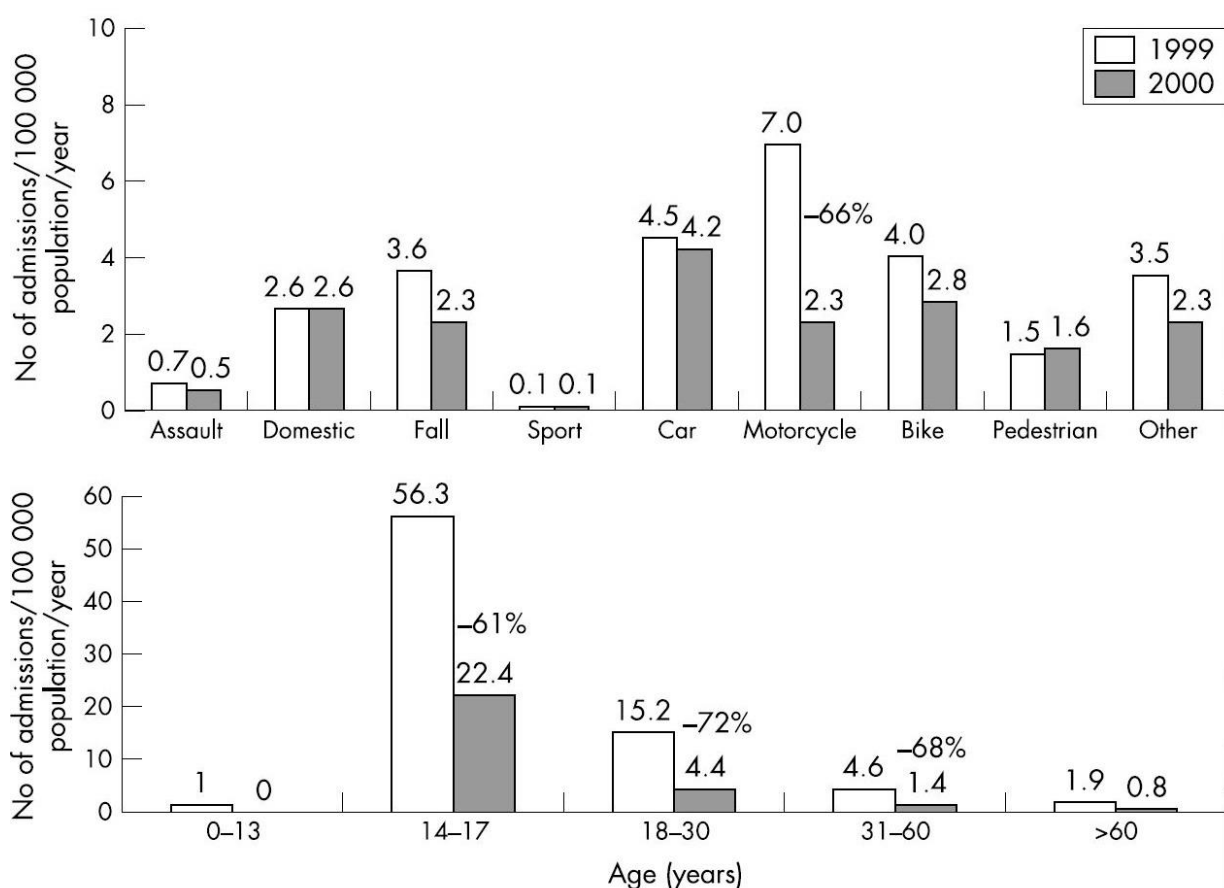


Figura 1.3: Differenza di incidenza percentuale di ammissione al Pronto Soccorso in Romagna per traumi cranici prima e dopo l'entrata in vigore della legge 472/1999 [4].

1.2 I traumi cranici

Un trauma cranico (in inglese Traumatic Brain Injury TBI) è un improvviso danno al cervello che si verifica quando le forze agenti sul cranio oltrepassano la soglia strutturale di assorbimento del tessuto cerebrale. Oltre alle forze causate dall'impatto, che possono essere di compressione o di stiramento, il cranio subisce anche quelle generate dai movimenti inerziali tra la testa e il collo che generano accelerazioni traslazionali e rotazionali.

Secondo quanto studiato da Goldsmith nel 1966, esistono tre diversi tipi di cause che portano alla formazione di un trauma cranico:

- Urto ad alta velocità tra il cranio e un oggetto solido;
- Rapido movimento del cranio senza contatto con oggetti esterni dovuto ad accelerazioni e decelerazioni improvvise;
- Compressione.

La lesione che si forma nel momento dell'impatto è denominata "lesione primaria", può interessare una zona specifica del cervello o la sua totalità ed è dovuta agli urti con le pareti della scatola cranica che il cervello subisce; questo movimento causa lividi, emorragie, lacerazioni e stiramenti delle fibre nervose. L'unico modo per evitare questo tipo di danni è l'utilizzo degli appositi dispositivi di protezione che prevengono l'urto.

Successivamente si verificano le "lesioni secondarie", provocate da eventi successivi al trauma iniziale, ovvero la risposta infiammatoria del cervello che tenta di curare le ferite accumulando liquidi extra nella zona danneggiata; ciò causa un rigonfiamento del cervello che spinge contro le pareti del cranio impedendo il corretto afflusso del sangue e riportando danni che possono rivelarsi peggiori di quelli causati con le lesioni primarie (Figura 1.4 e Figura 1.5).

Le lesioni che si formano in seguito ad un trauma cranico possono portare gravi danni permanenti, sia fisici che mentali e molto frequentemente anche alla morte del soggetto colpito. [5]

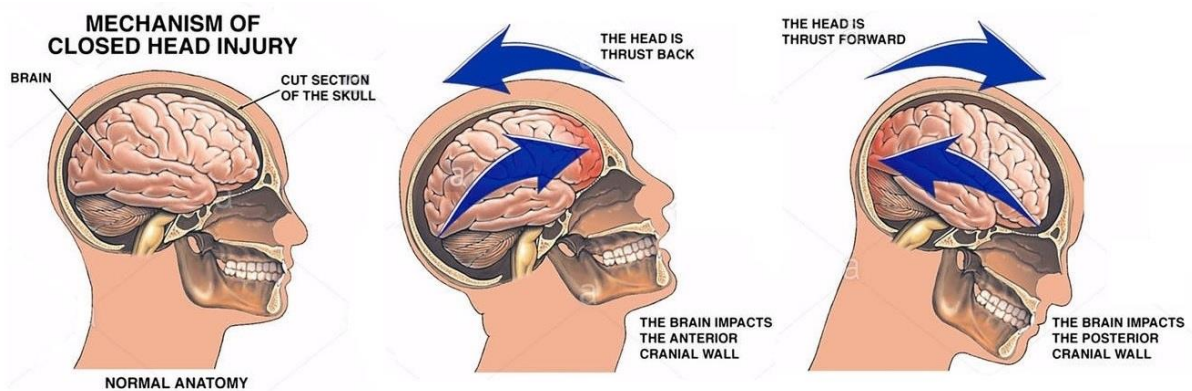


Figura 1.4: Schema di un trauma cranico [6].

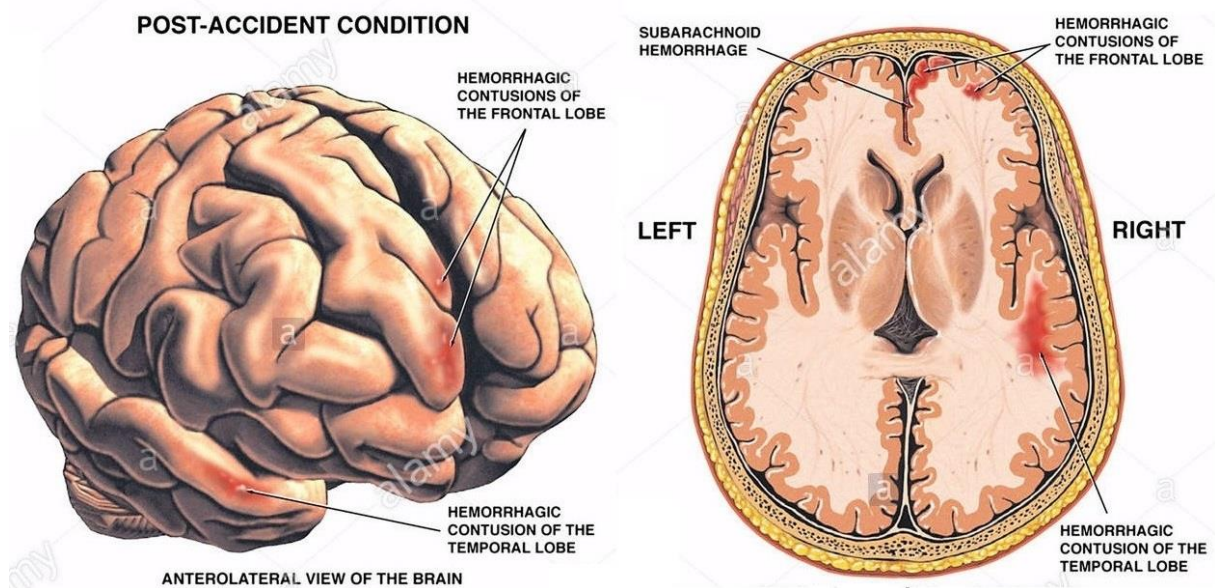


Figura 1.5: Schema degli effetti di un trauma cranico [6].

I traumi cranici possono essere suddivisi in base alla gravità delle lesioni (Tabella 1.1):

- **Lieve:** il paziente risulta essere sveglio e cosciente, ma presenta confusione, disorientamento e perdita della memoria;
- **Moderato:** il soggetto è letargico, presenta perdita di coscienza dai 20 minuti alle 6 ore e gonfiore o sanguinamento al cervello che causa sonnolenza;
- **Grave:** la persona è incosciente e non reagisce agli stimoli esterni.

La gravità del trauma si classifica attraverso una scala numerica che va da 3 (gravità massima) a 15 (gravità lieve), denominata Glasgow Coma Scale (GCS), che identifica il livello di coscienza di una persona basandosi sulle risposte verbali e motorie agli stimoli esterni. [7]

Tabella 1.1: Classificazione della gravità di un trauma cranico.

	GCS	Amnesia post-traumatica	Perdita di conoscenza
Lieve	13 – 15	< 1 giorno	0 – 30 minuti
Moderato	9 – 12	da 1 a 7 giorni	da 30 minuti a 24 ore
Grave	3 – 8	> 7 giorni	> 24 ore

Alcuni esempi sono visibili in Figura 1.6.

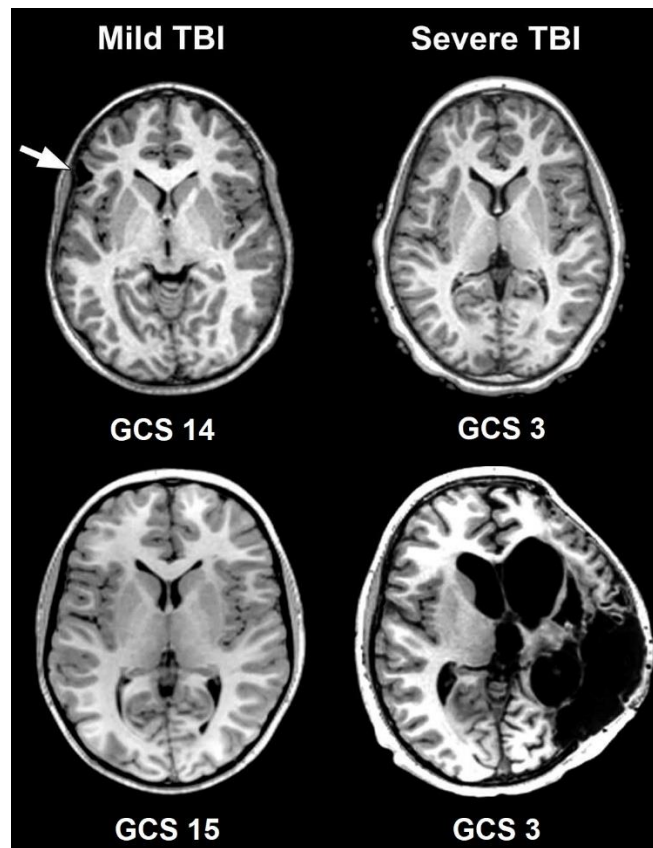


Figura 1.6: Esempi di TAC su pazienti con traumi cranici. [8]

1.2.1 Tipi di lesioni cerebrali

- **Commozione cerebrale:** causa breve perdita di coscienza, ma non riporta lesioni permanenti;
- **Contusione:** è un livido in una specifica zona del cervello in seguito ad un urto, può formarsi nella regione di impatto o in quella dalla parte opposta dove si verifica il contraccolpo;
- **Danno assonale diffuso:** è un danno alle cellule nervose dovuto al loro stiramento o rottura in seguito agli urti del cervello all'interno del cranio, è una lesione grave che altera il normale funzionamento del cervello;
- **Emorragia subaracnoidea traumatica:** lo spazio occupato dal fluido cerebrospinale viene invaso dal sangue proveniente dal cervello lesionato, così facendo il sangue si distribuisce sulla superficie del cervello;
- **Ematoma:** è un coagulo di sangue che comprime il cervello e si forma quando vengono lesionati dei vasi sanguigni; in base alla sua posizione il danno che causa può essere più o meno grave: se è di piccole dimensioni si assorbe naturalmente, altrimenti in alcuni casi è necessario un intervento chirurgico per rimuoverlo. [9]

Capitolo 2

I caschi

2.1 Cenni storici sui caschi da motocicletta

2.1.1 Fine '800

Quando vennero inventate, alla fine del diciannovesimo secolo, le prime motociclette non erano particolarmente prestanti né veloci, di conseguenza nessuno aveva preso in considerazione l'eventualità che esse potessero divenire pericolose e che una caduta durante il loro utilizzo potesse portare gravi lesioni finanche alla morte. Per questi motivi all'epoca non vi era la necessità di realizzare dispositivi di protezione personale, ma ad ogni modo nel 1885 Gottlieb Daimler, uno dei primi costruttori di motociclette, ne realizzò un prototipo rudimentale in cuoio foderato con pelliccia e ovatta (Figura 2.1), la cui funzione era principalmente quella di proteggere dal freddo e dalla polvere.



Figura 2.1: Casco realizzato da Gottlieb Daimler [10].

2.1.2 Primi del '900

Le prime apparizioni commerciali di caschi da motocicletta risalgono al primo decennio del Novecento nel catalogo di Harley-Davidson, tuttavia la loro funzionalità è ancora solamente quella di proteggere i capelli dalla polvere ed estetica (Figura 2.2).



Figura 2.2: Caschi dal catalogo di Harley-Davidson [11].

Il Dottor Eric Gardner, osservando il numero sempre crescente di traumi alla testa che si registravano alla competizione motociclistica annuale Brooklands race track, fu il primo a rendersi conto dell'importanza dei caschi nel prevenire gravi lesioni. Infatti per questo motivo fece realizzare degli elmetti sufficientemente rigidi da sopportare un forte colpo, in tela e gommalacca e li propose alla Auto-Cycle Union, l'organizzazione che tutt'oggi si occupa di motociclismo nel Regno Unito. Tuttavia tale progetto fu inizialmente respinto e solo nel 1914 vennero resi obbligatori durante la corsa sull'Isola di Man e proprio grazie a questa introduzione uno dei piloti sopravvisse ad un impatto contro un cancello di ferro ed in questo modo quell'anno non si registrarono feriti con traumi cranici durante la manifestazione sportiva.

In Italia invece l'obbligo di uso del casco per i piloti delle gare motociclistiche venne imposto nel 1922, in occasione della 3^a Coppa d'Inverno svoltasi sul circuito di Montichiari.

Nel 1926 la Cromwell Helmet Company, fino a quel momento dedita alla realizzazione dei caschi per i soldati, decise di produrre il primo casco da moto, utilizzando un twill di cotone intrecciato con fibre di cocco e immerso in una resina naturale di gommalacca, ispirandosi ai prototipi creati da Gardner.

2.1.3 Metà del '900 e Lawrence d'Arabia

Un evento che segnò la storia dei caschi da moto fu la morte nel 1935 di Thomas Edward Lawrence, noto come Lawrence d'Arabia famoso eroe della Prima Guerra Mondiale, dopo sei giorni di coma in seguito ad una caduta dalla sua motocicletta.

Il dottor Hugh Cairns, uno dei primi neurochirurghi britannici, dall'autopsia eseguita sul corpo di Lawrence capì che i danni riportati al cervello causati dalla caduta gli furono fatali e iniziò a studiare seriamente il legame tra i traumi cranici e i caschi protettivi. Nel 1941 pubblicò il suo

primo articolo sull'argomento intitolato: "Head Injuries in Motorcyclists - the importance of the crash helmet".

Negli anni successivi i suoi studi incontrarono parecchie difficoltà, poiché i governi e i produttori di motociclette erano contrari all'utilizzo dei caschi, temendo che il loro obbligo potesse diminuirne le vendite ed infatti inizialmente vennero realizzati caschi ed elmetti ad uso esclusivo dell'esercito britannico durante la Seconda Guerra Mondiale.

2.1.4 Dagli Anni '50 al giorno d'oggi

Con il passare degli anni e il progressivo miglioramento delle tecnologie le motociclette divennero sempre più prestanti e veloci, di conseguenza aumentò anche il numero di feriti con traumi cranici e morti in seguito a tali lesioni.

Il primo vero e proprio casco per motociclisti, in grado di assorbire gli urti, venne realizzato e brevettato soltanto nel 1953 dal professor C.F. Lombard alla University of South California, formato da una calotta esterna resistente e due strati di imbottitura. Lo scopo era quello di realizzare un casco leggero e flessibile impiegando materiali che fossero in grado di assorbire e distribuire l'energia prima che la forza dell'impatto arrivasse alla testa dell'utilizzatore (Figura 2.3). [12]

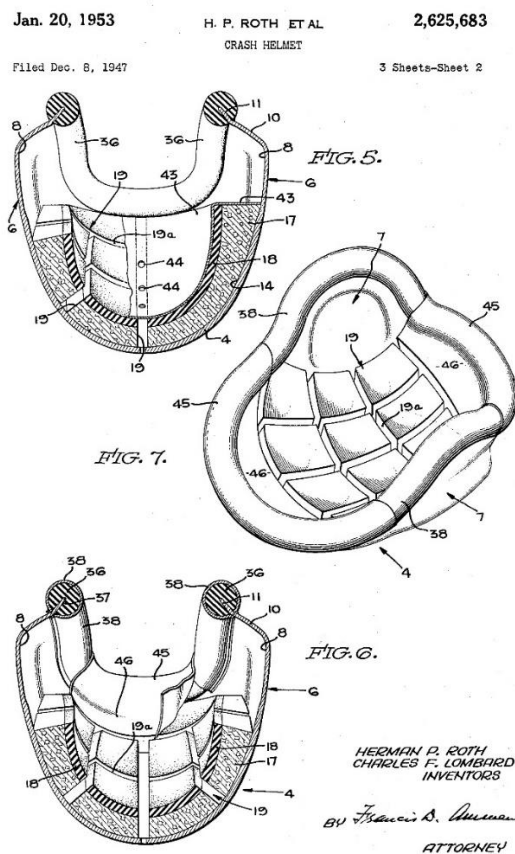


Figura 2.3: Schema tratto dal brevetto del 1953 del professor Lombard et al [12].

Grazie a questo innovativo brevetto che aprì la strada all'era dei caschi moderni, da quell'anno in poi nacquero sempre più aziende produttrici di caschi per moto, come ad esempio Schuberth e Bell che realizzarono i loro primi modelli nel 1954 (Figura 2.4). [10]



Figura 2.4: Primo casco da moto della casa produttrice Schuberth a sinistra e Bell a destra (1954) [13].

La prima legge ufficiale che introdusse l'obbligo per i motociclisti su strada di indossare il casco entrò in vigore nel 1961 in Australia.

Nei decenni successivi il design, i componenti e le features dei caschi migliorarono sempre più, aumentandone il confort, la resistenza e l'aerodinamicità.

Ad esempio negli anni '70 vennero realizzati i primi caschi integrali in materiale composito (Figura 2.5), negli anni '80 nacquero le forme e superfici aerodinamiche (Figura 2.6), negli anni '90 si aggiunsero le visiere parasole e le mentoniere regolabili, negli anni 2000 venne introdotto il collo imbottito e nell'ultimo decennio i sistemi di comunicazione integrati. [13]



Figura 2.5: Primo casco integrale in materiale composito di Schubert (1976) [13].



Figura 2.6: Primo casco con superficie aerodinamica di Schubert (1984) [13].

2.2 Stato dell'arte attuale

Oggi giorno oltre alla classica funzione di protezione del cervello dai traumi i caschi moderni possiedono numerose altre caratteristiche e funzionalità per rendere il più possibile agevole e confortevole il loro utilizzo.

Oltre al lato puramente estetico altre caratteristiche moderne sono:

- forma aerodinamica ottimizzata;
- lenti della visiera che proteggono gli occhi dalla radiazione UV;
- diversi colori delle lenti adatti alla luce esterna, ad esempio esistono lenti a specchio o di colore scuro che danno protezione dal riverbero del sole, lenti rosa o gialle che migliorano la definizione della visuale in caso di cielo coperto, mentre le lenti chiare sono ottimali per la visione notturna;
- lenti anti appannamento o sistema pinlock che prevede l'inserimento di un'ulteriore lente oltre a quella normale per impedire l'appannamento;
- visiera anti nebbia;
- visiera anti graffio;
- apparato di comunicazione integrato;
- ventilazione interna;
- assorbimento dell'umidità;
- imbottitura rimovibile e lavabile;
- insonorizzazione.

2.3 Criteri di omologazione

Affinché un casco venga introdotto sul mercato per la vendita deve rispettare rigidi criteri e superare numerosi test che non sono uguali in tutto il mondo, ma per quanto riguarda l'Italia e in generale l'Europa, sono molto severi e restrittivi. Per questo motivo l'utilizzo di un casco omologato in un determinato Paese può non risultare legale in un altro.

La normativa ora vigente nell'Unione Europea e altri Paesi del mondo aderenti è la ECE 22-05, entrata in vigore nel giugno dell'anno 2000. Tale normativa prevede per il casco sottoposto all'esame il superamento di numerosi test in diverse condizioni climatiche: l'assorbimento degli urti in vari punti di impatto prestabiliti sulla calotta e sulla mentoniera ove presente, il corretto funzionamento dei sistemi di ritenzione, resistenza allo scalzamento, allo schiacciamento ed all'attrito. Essi dovranno essere eseguiti nei laboratori della casa produttrice ed in seguito anche in quelli certificati secondo la normativa europea.

Nel 2020 entrerà in vigore una nuova normativa, la ECE 22-06, che sarà aggiornata alle nuove tecnologie e tipologie di caschi oggi esistenti e apporterà alcune modifiche a quella preesistente [14] come ad esempio l'aumento del numero dei punti di impatto o l'inserimento di altri tipi di test, in modo da ampliare il campo di indagine dei test e rendere la procedura sempre più completa al fine di garantire la massima sicurezza.

Un casco omologato deve presentare particolari diciture nell'etichetta cucita nella fodera al suo interno o nel cinturino, in particolare deve essere presente una sigla alfanumerica che riporta i dati della sua fabbricazione e in quale Paese ha ottenuto l'omologazione.

La prima sigla, all'interno di un cerchio nero, rappresenta il Paese del mondo in cui è avvenuta l'omologazione (Figura 2.7 e Figura 2.8):

- **ECE/ONU 22-05**: normativa unica per tutti i Paesi membri dell'Unione Europea;
- **DOT TP-218-07 (USA)**: normativa USA (non valida in Italia);
- **SNEL**: omologazione senza valore legale;
- **AU**: Australia;
- **IS 4151**: India;
- **JIS T**: Giappone;
- **KS G 7001**: Korea;
- **NBR 7471**: Brasile;
- **NZ 5430**: Nuova Zelanda;
- **PSB**: Singapore;
- **SG**: Giappone;
- **SIRIM**: Malesia;
- **TIS**: Thailandia.

Per quanto riguarda l'Unione Europea, oltre alla lettera "E" è presente anche un numero che indica lo Stato di immatricolazione. A questa normativa fanno riferimento anche altri Stati non appartenenti alla UE. Di seguito sono riportati i numeri associati ai Paesi corrispondenti.

E1 Germania, **E2** Francia, **E3** Italia, **E4** Paesi Bassi, **E5** Svezia, **E6** Belgio, **E7** Ungheria, **E8** Repubblica Ceca, **E9** Spagna, **E10** Jugoslavia, **E11** Regno Unito, **E12** Austria, **E13** Lussemburgo, **E14** Svizzera, **E16** Norvegia, **E17** Finlandia, **E18** Danimarca, **E19** Romania, **E20** Polonia, **E21** Portogallo, **E22** Russia, **E24** Irlanda, **E25** Croazia, **E26** Slovenia, **E27** Slovacchia, **E28** Bielorussia, **E29** Estonia, **E31** Bosnia, **E32** Lettonia, **E34** Bulgaria, **E37** Turchia, **E40** Macedonia, **E43** Giappone, **E45** Australia, **E46** Ucraina, **E47** Sudafrica, **E48** Nuova Zelanda.

Oltre a questa sigla deve essere presente anche una serie di numeri che indica la versione della direttiva d'omologazione e gli estremi di omologazione specifica del casco.

Successivamente è indicata la sigla di protezione della mentoniera:

- **J**: per i caschi Jet o Demi jet, privi di mentoniera;
- **NP**: per i caschi con mentoniera non protettiva;
- **P**: per i caschi integrali e modulari, con mentoniera chiusa.
- **P/J**: per i caschi modulari con mentoniera protettiva che può essere usata sia in posizione aperta che chiusa.

Ed infine è mostrato il numero progressivo di produzione del singolo casco [15].



Figura 2.7: Schema della sigla di omologazione [16].



Figura 2.8: Esempio di etichetta di omologazione [17].

2.4 Tipi di caschi

Al giorno d'oggi esistono sei tipologie diverse di caschi che verranno elencate di seguito.

2.4.1 Il casco integrale (full-face)

Sull'etichetta riporta la lettera P ad indicare il termine “protective” ed infatti è ritenuto il casco maggiormente protettivo, poiché copre interamente la testa del motociclista, ovvero la parte superiore, quella posteriore e quella frontale, in particolare questa tipologia presenta la mentoniera, una protezione molto importante poiché si è stimato che circa il 45% degli impatti avviene nella zona del mento (Figura 2.9).

È una tipologia che può essere utilizzata sia in pista sia in strada, per questo motivo ne esistono diversi modelli: per esempio quelli utilizzati dagli sportivi, al contrario degli utilizzatori di strada, per via della posizione molto curva di questi motociclisti, la mentoniera deve essere più alta, la visiera più inclinata e i condotti di ventilazione disposti più in alto ed inoltre la forma deve essere strutturata in modo tale da evitare che il vento alle alte velocità sollevi il casco stesso.

Un problema che affligge questi caschi è quello della ventilazione interna, infatti se non viene studiata adeguatamente la temperatura interna può salire notevolmente recando fastidio all'utilizzatore, aumentandone la sudorazione che porta ad un relativo aumento dell'umidità nel casco che fa a sua volta appannare la visiera riducendo la visibilità del motociclista.



Figura 2.9: Casco integrale [18].

2.4.2 Il casco modulare o apribile (flip-up)

Questi caschi sono omologati con la sigla P/J che indica che possono essere utilizzati sia come caschi integrali, sia come caschi aperti.

Infatti la caratteristica principale di questi caschi è che possiedono un particolare sistema di apertura (che tuttavia ne aumenta il peso) che consente di ribaltare la parte frontale, trasformando il casco da integrale a jet (Figura 2.10).

Questa funzionalità risulta molto utile durante le soste, infatti permette di mangiare o parlare senza dover rimuovere il casco dalla testa, ma non è consigliabile utilizzarla durante il movimento, poiché non è né sicura né aerodinamica.

Inoltre possedendo una cerniera per permettere l'apertura è meno rigido ed essa ne indebolisce la struttura e quindi è meno resistente agli urti rispetto ad un casco integrale standard, ma tuttavia è comunque più resistente di uno completamente aperto, come ad esempio i jet.



Figura 2.10: Casco modulare [13].

2.4.3 Il casco jet o aperto (open face AKA $\frac{3}{4}$ helmet)

Sull'etichetta è omologato come J.

In questa tipologia manca la parte frontale inferiore che protegge il mento, perciò fornisce una protezione identica a quella degli integrali per quanto riguarda la parte posteriore del cranio, ma non protegge per niente la faccia ed il mento (Figura 2.11).

Il principale punto di forza di questo casco è la ventilazione, infatti il viso e la testa sono maggiormente areati rispetto ai caschi integrali, ma in condizioni meteo avverse come freddo estremo o pioggia non riparano adeguatamente. Per questi motivi vengono utilizzati maggiormente in ambito cittadino e nei mesi estivi.

In alcuni modelli è presente la visiera, mentre in altri no e di conseguenza è necessario aggiungere una protezione extra per gli occhi dal sole e dalla polvere, come ad esempio occhiali.



Figura 2.11: Casco jet [19].

2.4.4 Il casco demi-jet (half-helmet AKA brain bucket)

Questi caschi sono quelli che garantiscono la minima protezione, infatti non possiedono oltre alla mentoniera neanche la parte protettiva sulle guance e la nuca (Figura 2.12).



Figura 2.12: Casco demi jet [20].

2.4.5 Il casco da cross (off-road helmet)

Questi caschi sono studiati per un uso principalmente da fuori strada ed in stagioni con clima mite, infatti non possiedono una particolare insonorizzazione che nel traffico causa molto disturbo, è presente un frontino per riparare dal sole e la forma è il più aerodinamica possibile, in modo tale che la ventilazione sia massimizzata e il peso minimizzato (Figura 2.13).

Per questo motivo non dispongono della visiera ed infatti vanno corredati di occhiali di protezione adeguati



Figura 2.13: Casco da cross [21].

2.4.6 Il casco crossover (dual-sport helmet AKA ADV, hybrid, enduro)

Questa tipologia è intermedia tra i caschi integrali e quelli da cross, infatti presenta tutte le caratteristiche di entrambi i modelli: eccellente ventilazione, frontino aerodinamico adatto alle velocità raggiungibili in autostrada, mentoniera, insonorizzazione adeguata al traffico e visiera (Figura 2.14) [22].



Figura 2.14: Casco crossover [23].

2.5 Componenti

Come è appena stato elencato, esistono diversi tipi di caschi, ognuno con caratteristiche proprie che lo distinguono dagli altri, tuttavia esistono determinati componenti (Figura 2.15) di base che sono comuni ad ogni casco ed indispensabili per la sicurezza [24]:

- calotta esterna;
- rivestimento interno che assorbe gli urti;
- imbottitura;
- sistema di ritenzione.

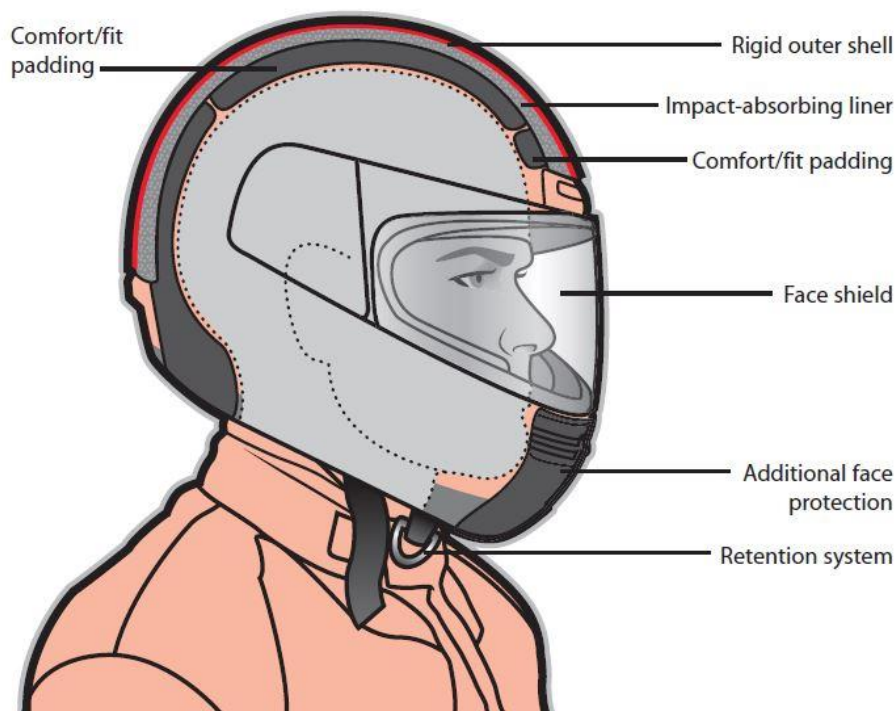


Figura 2.15: Componenti di base di un casco da moto [24].

I materiali di cui sono composti questi elementi saranno esposti in dettaglio nel capitolo successivo.

2.5.1 Calotta esterna

La calotta esterna è la parte del casco più esterna, esposta alla vista.

È realizzata con materiali molto resistenti come ad esempio materiali compositi fibro-rinforzati oppure con materiali termoplastici (Figura 2.16), perché la sua funzione principale è quella di resistere all'urto impedendo che nessun corpo estraneo penetri all'interno del casco, inoltre ha il compito di redistribuire la forza d'urto su tutta la superficie del casco senza rompersi, tuttavia la sua sola presenza non è sufficiente per avere una protezione completa.

La forma arrotondata del casco gli permette di scivolare sulle strade, resistendo alle abrasioni.

Infine viene dipinta con colori sgargianti e riflettenti per rendere il motociclista il più possibile visibile ed identificabile dagli altri utenti della strada sia di giorno che di notte, migliorandone la sicurezza.

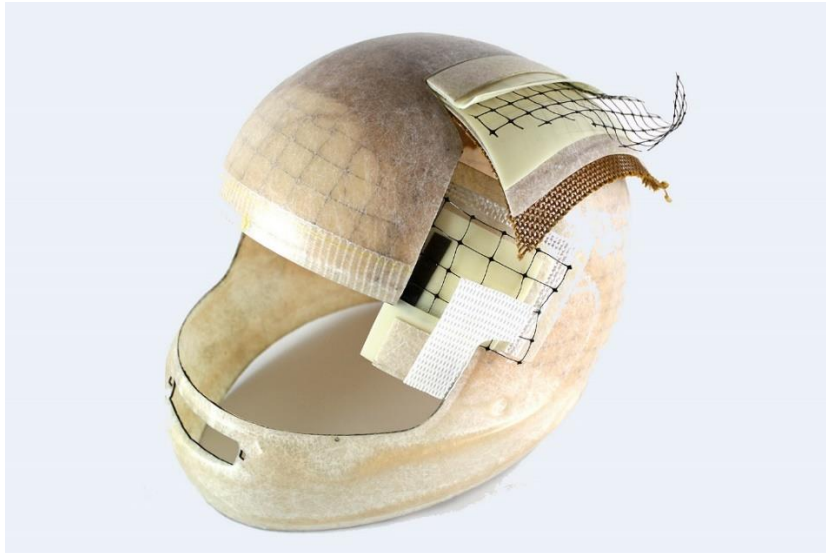


Figura 2.16: Esempio di calotta esterna [25].

2.5.2 Rivestimento interno

È la parte che ricopre il ruolo più importante nella protezione della testa dagli urti, infatti si tratta del rivestimento realizzato in particolari materiali (il più comunemente utilizzato è l'EPS, ovvero il polistirolo espanso) che deformandosi assorbono l'energia dell'urto impedendone la diffusione al cranio e al cervello, nelle zone più critiche che necessitano di maggiore protezione del casco si fa variare la densità del materiale garantendo un migliore assorbimento dell'impatto.

È anche lo strato più vulnerabile del casco ed è quindi necessario prestare attenzione alla conservazione del casco mentre non viene utilizzato.

2.5.3 Imbottitura

La principale funzione dell'imbottitura è prevalentemente quella di aumentare il comfort dell'utilizzatore, creando uno strato morbido e aderente su cui è a contatto la testa, inoltre se il casco è della giusta taglia, previene il movimento della testa al suo interno durante un urto.

Per questi motivi viene realizzata con materiali morbidi come ad esempio la gommapiuma o tessuti sintetici anallergici e traspiranti che assorbono il sudore e nella maggior parte dei casi possono essere rimossi e lavati per migliorare l'igiene e la pulizia del casco.



Figura 2.17: Sezione di un casco da moto in cui sono identificabili la calotta esterna (a), il rivestimento interno (b) e l'imbottitura (c) [26].

2.5.4 Sistema di ritenzione

Il sistema di ritenzione è formato essenzialmente dal cinturino di sicurezza o sottogola e la sua presenza è fondamentale affinché il casco rimanga in posizione sulla testa durante un urto. Ne esistono diverse tipologie, in cui varia la modalità di chiusura e sono regolabili per adattarsi alle dimensioni facciali dell'utilizzatore (Figura 2.18).

- Sgancio rapido (quick release): è conosciuto anche come “cintura di sicurezza” per la sua somiglianza con le cinture di sicurezza delle automobili, infatti è formato da un'estremità metallica forata che durante l'utilizzo va inserita nell'altra estremità del

cinturino incastrandosi. Per aprire il sistema di sicurezza occorre premere un pulsante che permette lo sgancio rapido, da cui prende il nome.

- Micrometrico (*micro metric*): ad una delle estremità è presente una cinghia di plastica con scanalature che permettono il bloccaggio del sistema una volta inserita nell'altra estremità, grazie a queste scanalature è inoltre possibile regolare la lunghezza del cinturino. Anche in questo caso lo sgancio è rapido e avviene tirando una linguetta.
- A doppio anello (*double D*): è il sistema di sicurezza più vecchio e semplice tra quelli esistenti, infatti non presenta particolari funzioni meccaniche, ma si compone solamente di due anelli a forma di D in una estremità, mentre sull'altra è presente una cinghia che va fatta passare tra i due anelli per poter permettere il bloccaggio [27] [28].



Figura 2.18: Le tre tipologie di cinturini di sicurezza: sgancio rapido, micrometrico e doppio anello [27].

Esistono anche altri componenti molto importanti nei caschi, anche se non sono presenti su tutti i modelli:

- visiera;
- sistema di areazione;
- sistema di insonorizzazione dai rumori esterni.

2.5.5 Visiera

Come già precedentemente detto le visiere negli anni si sono evolute sempre più ed hanno sviluppato sempre più funzionalità oltre a quella classica di protezione degli occhi dagli agenti atmosferici e dagli urti.

Le visiere sono realizzate in materiali polimerici ad alta resistenza, come il policarbonato, perché devono appunto resistere alle abrasioni e alle rotture in seguito a forti colpi ed inoltre sono materiali che impediscono il suo deterioramento nel tempo, come ad esempio l'ingiallimento o la formazione di macchie.

Anch'esse infatti devono superare determinati test ottici e meccanici imposti dalle normative per poter essere idonee all'utilizzo da parte dei motociclisti: la presenza della visiera non deve perciò modificare la traiettoria della luce attraverso di essa distorcendo le immagini, non deve rompersi creando frammenti taglienti e pericolosi in seguito agli urti o alla penetrazione di

oggetti estranei, se subisce un'abrasione la qualità della visuale deve comunque rimanere accettabile e la trasmittanza, ovvero il rapporto percentuale tra l'intensità della luce che emerge dalla superficie e quella della luce che ne incide (o anche il rapporto della potenza radiale della luce che ha attraversato la visiera con quella che la incide), non deve scendere sotto l'80% per le visiere utilizzabili sia di giorno che di notte, mentre per quelle a uso esclusivamente diurno non deve essere inferiore a 50% in questo caso quindi gioca un ruolo fondamentale la colorazione delle lenti che perciò non deve confondere l'utilizzatore impendendo la distinzione dei colori fondamentali [29].

L'appannamento della visiera nei caschi integrali durante la stagione fredda è un problema molto comune e potenzialmente pericoloso, come già accennato in precedenza esistono particolari rivestimenti idrofilici che limitano l'appannamento della lente impedendo la condensa del vapore acqueo emesso dal respiro dell'utilizzatore all'interno del casco sulla superficie fredda della visiera a contatto con l'ambiente esterno, tuttavia questi strati protettivi perdono di efficacia nel tempo. Una soluzione molto più duratura è data dal sistema Pinlock® che infatti ad oggi risulta essere il migliore sistema per evitare la condensa, il suo funzionamento è semplice: si tratta sostanzialmente di una seconda lente che va posizionata sulla parte della visiera rivolta verso l'interno del casco, tramite dei perni di plastica viene bloccata in posizione creando una camera d'aria che, grazie al bordo in silicone di cui è dotata la nuova lente, viene sigillata ermeticamente; questo spazio tra le due lenti funziona allo stesso modo dei doppi vetri alle finestre degli edifici ovvero isola la visiera riducendo al minimo la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno del casco (Figura 2.19) [30].

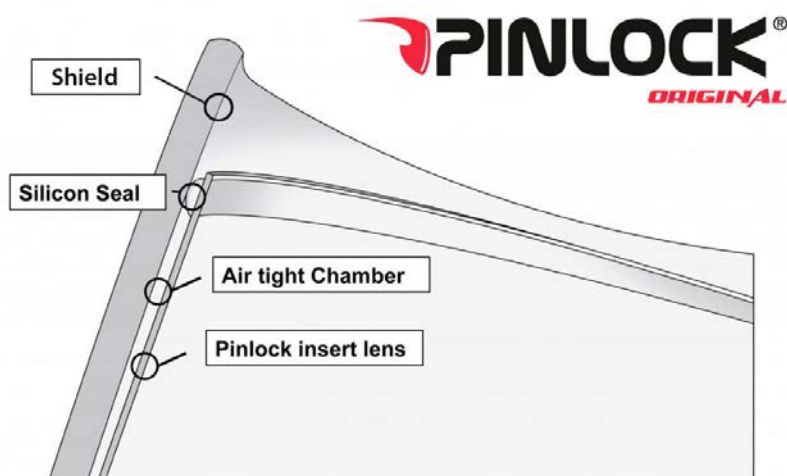


Figura 2.19: Componenti del sistema Pinlock® [30].

Nonostante tutto, questo sistema presenta comunque degli svantaggi dovuti al fatto di aggiungere un'ulteriore lente a quella già esistente causando una perdita di chiarezza nella visuale, soprattutto se tra le due lenti si accumula polvere e sporczia, inoltre il doppio strato di notte sdoppia la percezione degli oggetti illuminati, sfocandoli.



Figura 2.20: Differenza di visuale senza Pinlock® e con Pinlock® [30].

2.5.6 Sistema di aerazione

Un'altra problematica dei caschi integrali è il ricircolo dell'aria al loro interno, per questo motivo sui caschi di ultima generazione è prevista la presenza di un adeguato sistema di aerazione che permette il ricircolo dell'aria.

Il sistema di ventilazione funziona durante il movimento del motociclo, infatti l'aria viene incanalata in apposite fessure situate nella parte frontale superiore e nella mentoniera, da qui poi tramite canalizzazioni ricavate nel rivestimento interno attraversa tutto il casco consentendo il mantenimento di una temperatura e umidità ideali all'interno. Successivamente l'aria esce dagli estrattori posti sul retro del casco che attirano l'aria calda e umida verso l'esterno a temperatura inferiore (Figura 2.21). Il perfetto posizionamento e sagomatura degli ingressi e delle uscite, insieme ai canali d'aria creati all'interno del rivestimento, sono la base per una ventilazione ottimale [31].

Parte di questo flusso d'aria viene utilizzato anche per diminuire l'appannamento della visiera.

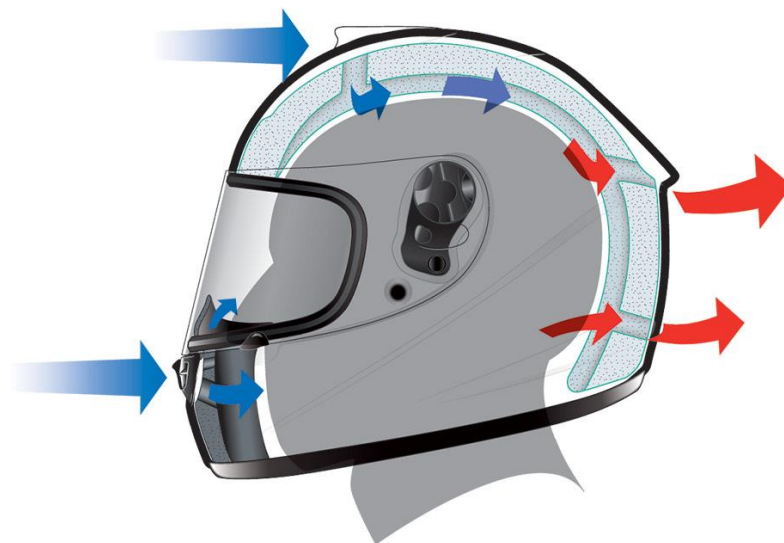


Figura 2.21: Sistema di aerazione [32].

Recentemente negli Stati Uniti sono stati realizzati e messi in commercio dei nuovi tipi di caschi integrali con veri e propri sistemi di raffreddamento posti sul retro del casco formato da una pompa di calore che aspira l'aria, la filtra e la raffredda, anche fino a 12 - 18°C in meno rispetto al mondo esterno ed infine la distribuisce uniformemente all'interno del casco tramite un'apposita struttura canalizzata (Figura 2.22). Il sistema è ricaricabile con apposite batterie ed inoltre, in caso di inutilizzo, si può rimuovere [33].

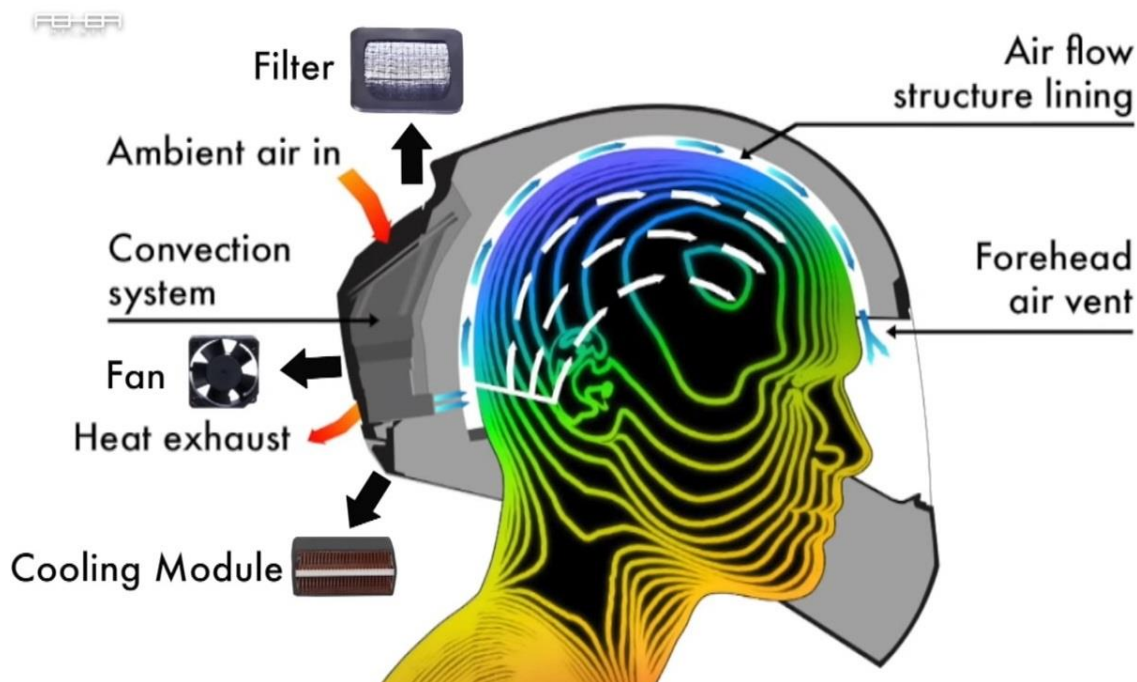


Figura 2.22: Funzionamento del sistema di raffreddamento [33].

2.5.7 Sistema di insonorizzazione dai rumori esterni

L'udito umano può sopportare rumori fino ad un certo valore di Decibel, tuttavia il limite massimo dipende dalla durata del suono, infatti può sopportare fino a 120 per un breve periodo, ma si può arrivare alla condizione di sordità permanente se si è esposti a rumori oltre gli 80 dB per lunghi periodi di tempo.

Guidare una motocicletta ad alta velocità, ad esempio in autostrada e per lunghi viaggi, genera un rumore molto forte dovuto all'interazione dell'aria turbolenta con le pareti del casco. Il fastidio tuttavia è soggettivo e dipende dalla posizione delle orecchie all'interno o anche dalla presenza del parabrezza che influisce sul rumore. Si è visto infatti che, contrariamente a quanto si possa pensare, il parabrezza aumenta la turbolenza dei vortici e di conseguenza anche il rumore percepito dal motociclista. È stato verificato che in certi casi si possono superare addirittura i 100 dB e sul lungo periodo ciò può portare a gravi danni all'udito del motociclista.

Oltre a generare fastidio e danni all'apparato uditivo il rumore aerodinamico impedisce anche al motociclista di avvertire con chiarezza i rumori provenienti dalla strada e dagli altri utenti, aumentando così il rischio di incidente.

Alcuni modelli di casco sopperiscono a questo problema facendo uso di forme ottimizzate aerodinamicamente, in modo tale da evitare il ristagno dei vortici sulle pareti del casco, che tuttavia non riducono il rumore fino a livelli accettabili.

Un'altra soluzione adoperata dai motociclisti è l'utilizzo di speciali tappi da inserire nelle orecchie che filtrano tutti i rumori a basse frequenze lasciando invece liberi i rumori fondamentali per la sicurezza stradale [34].

Infine alcune case produttrici di caschi stanno studiando dei sistemi di insonorizzazione attivi, ovvero utilizzano la tecnologia della cancellazione attiva del rumore già in uso in alcuni modelli di auricolari per la musica. Il sistema funziona tramite quattro microfoni che generano una contro-onda uguale e contraria che va a creare un'interferenza distruttiva che annulla il rumore costante del vento, lasciando udibili invece, come per i tappi, tutti gli altri suoni della strada (Figura 2.23) [35].

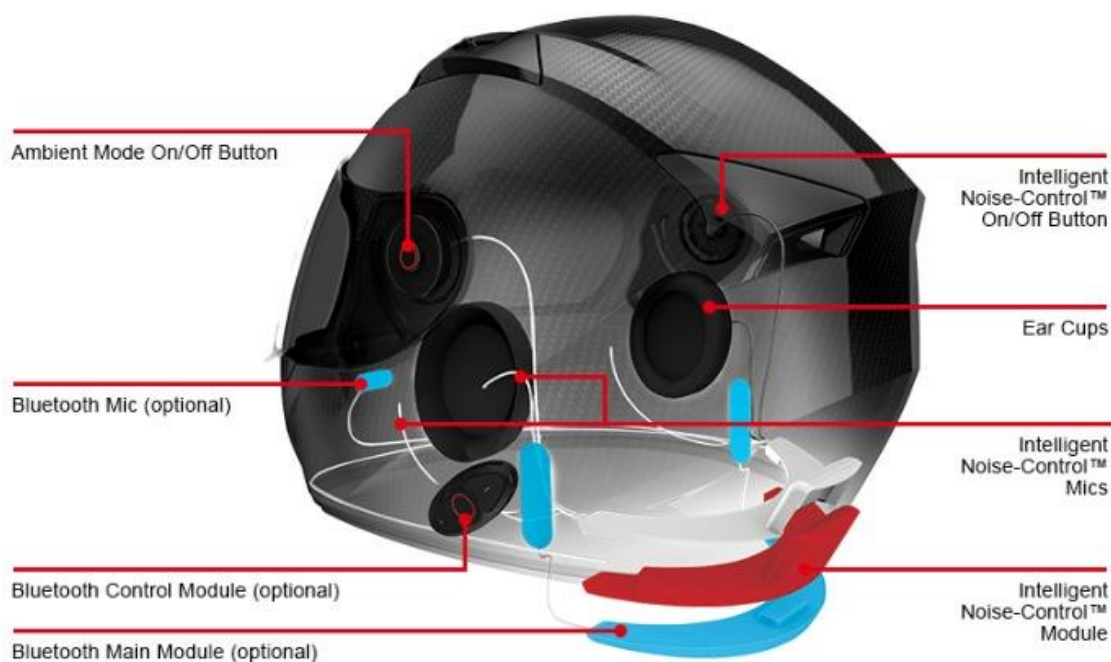


Figura 2.23: Sistema di cancellazione del rumore attivo [35].

2.6 Uso ed efficacia

La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), un'agenzia governativa statunitense, ha stimato che nel 2013 i caschi hanno salvato la vita a 1630 motociclisti su circa 88000 feriti. Tuttavia è stato registrato che non tutti gli utilizzatori di moto indossano correttamente il casco, soprattutto negli Stati dove ancora non esistono leggi che ne impongano l'obbligo ed infatti se tutti i motociclisti avessero correttamente indossato il casco, ipoteticamente se ne sarebbero potute salvare altre 715.

Si è constatato che i tassi di utilizzo del casco nei feriti gravemente erano del 60% per i piloti e del 49% per i passeggeri; invece il 41% dei 4668 morti in incidenti stradali non indossava il casco.

Si stima inoltre che i caschi siano efficaci al 37% nella prevenzione di lesioni mortali a motociclisti e al 41% per quanto riguarda i passeggeri, in altre parole, per ogni 100 motociclisti uccisi in caso di incidente mentre non indossavano caschi, 37 di loro si sarebbero potuti salvare se tutti lo avessero indossato [36].

In uno studio condotto nel Nuovo Galles del Sud, uno Stato dell'Australia sud-orientale, su 88 motociclisti feriti portati in Pronto Soccorso sia uomini che donne di età compresa tra i 16 e gli 80 anni, le ferite alla testa sono state registrate in 21 degli 88 casi (23.9%), anche se lesioni particolarmente gravi si sono verificate solo in 2 persone (2.3%). I principali tipi di lesioni sono state ferite superficiali alla testa, lesioni cerebrali intracraniche diffuse (perdita di conoscenza, commozione cerebrale e cambiamento della pressione cranica), fratture facciali/dentali e fratture della colonna vertebrale cervicale. Tra di essi la lesione più comune si è rivelata essere quella superficiale alla testa, in cui la maggior parte dei danni (80.8%) ha colpito il volto. Le lesioni al collo si sono verificate in 8 casi (9.1%), le fratture della colonna vertebrale cervicale invece si sono verificate in 4 casi (5%).

La maggior parte dei motociclisti (86.4%) indossava un casco di tipo integrale, mentre il resto indossava un casco di tipo Jet (13.6%). Si è constatato infatti che un numero più elevato di motociclisti con casco jet ha riportato ferite alla testa superficiali e fratture facciali/dentali rispetto a quelli con casco integrale.

Invece per quanto riguarda i caschi si è osservato che su di essi sono stati riportati danni in 76 casi (86.4%). I graffi erano il danneggiamento più comune (72 casi), seguiti da incrinature della calotta esterna (16) e da danni nel rivestimento interno (10). Tali danni sono stati causati da forze dirette tangenzialmente nel 62.5% dei casi e da forze dirette radialmente nel 44.9%, mentre il 24.6% dei casi mostrava danni causati da entrambe le forze.

In Figura 2.24 è mostrata la distribuzione percentuale dei danni da impatto subiti dai 65 caschi ispezionati, lo schema è stato suddiviso in zone e la variazione di intensità di colore indica una maggiore o minore incidenza. Da questo schema è possibile ricavare che la maggior parte del danno si concentra sulla parte frontale del casco, in particolar sul viso ed infatti i possessori di caschi aperti hanno subito maggiori danni alla faccia; il resto del danno è concentrato in una fascia attorno ai lati e nella parte posteriore del casco [37].

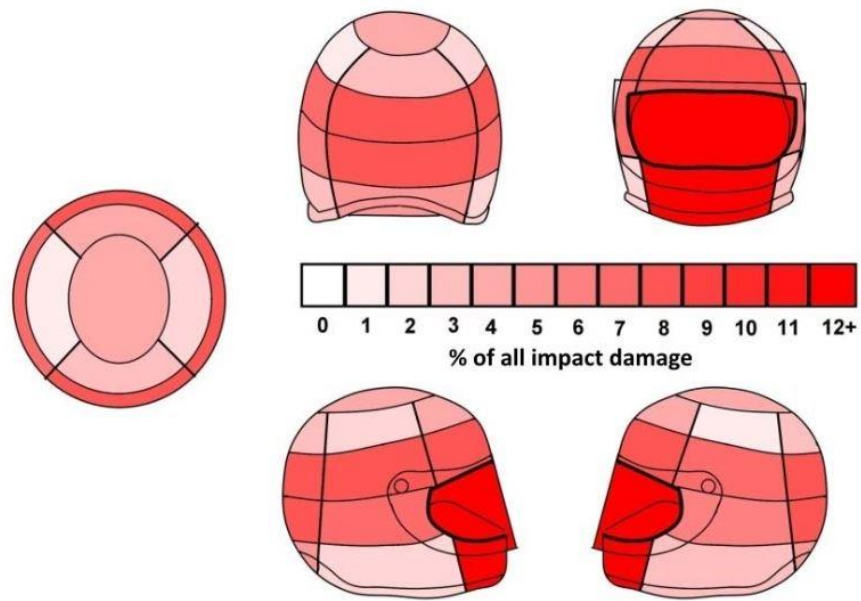


Figura 2.24: Schema della percentuale di distribuzione dei danni [37].

Capitolo 3

I materiali

Nell'epoca attuale le materie plastiche sono ampiamente diffuse nel mondo dell'industria manifatturiera ed infatti la maggior parte dei prodotti industriali e di consumo viene realizzata con questi materiali. I caschi rientrano in questa categoria poiché vengono realizzati interamente con materiali plastici e polimerici, che vengono scelti in base alle caratteristiche e alla funzione che ogni componente deve svolgere.

3.1 Le materie plastiche: accenni sui polimeri

Le materie plastiche nell'ultimo secolo hanno soppiantato sempre più i metalli in molti dei loro campi di utilizzo per via delle svariate caratteristiche che possiedono e che le rendono estremamente versatili come ad esempio la bassa densità, buona resistenza all'attacco chimico e la facilità di lavorazione e formazione infatti richiedono poche operazioni secondarie di finitura superficiale.

Tra di essi il gruppo più importante in ambito meccanico è quello dei materiali compositi a matrice polimerica che possiedono caratteristiche meccaniche molto elevata a fronte invece di una bassa densità.

3.1.1 Formazione dei polimeri

La struttura di un polimero, ovvero la forma, la grandezza e la disposizione delle molecole al suo interno, gioca un ruolo fondamentale nelle sue proprietà finali.

I polimeri sono delle macromolecole o molecole “a catena lunga” formate da monomeri ovvero la loro più piccola unità ripetitiva generalmente realizzata da atomi di carbonio a cui si legano atomi di altri elementi tra cui idrogeno, ossigeno, azoto, cloro e silicio. Vengono formati tramite processi di polimerizzazione e reticolazione cioè processi di formazione di legami più o meno forti tra le molecole che li costituiscono.

La polimerizzazione è un processo lungo e complesso, ma può essere suddiviso in due processi fondamentali:

1. **polimerizzazione per condensazione:** è detta anche “reazione a stadi” poiché il polimero si genera grazie alla formazione di legami covalenti tra due o più monomeri reagenti in fasi successive. Come prodotto di reazione secondario di questa reazione si ha la formazione di

un sottoprodotto a basso peso molecolare, ad esempio l'acqua, che poi viene eliminato sotto forma di condensato. Questo processo ha termine solo con il consumo totale di uno dei due reagenti.

La polimerizzazione per condensazione è usata per la sintesi di polimeri termoindurenti, nylon e policarbonati.

2. **polimerizzazione per addizione:** è denominata anche “reazione a catena” poiché è una reazione molto veloce e i monomeri sono aggregati uno alla volta per formare una macromolecola lineare. Al contrario del primo caso in questo processo non si ha la formazione di sottoprodotti dall'instaurarsi di legami tra i monomeri, tuttavia è necessaria l'aggiunta di un iniziatore che apra il doppio legame tra gli atomi di carbonio per permettere la formazione dei legami tra monomeri.

Questo tipo di polimerizzazione si suddivide in tre stadi: iniziazione, propagazione e terminazione.

- Iniziazione: la polimerizzazione ha inizio grazie alla reazione tra l'iniziatore e il primo monomero;
- Propagazione: la molecola cresce linearmente grazie all'aggiunta dei successivi monomeri, l'accrescimento è molto rapido mediamente il tempo necessario per realizzare un polimero composto da circa 1000 monomeri è dell'ordine di $10^{-2} - 10^{-3}$ s;
- Terminazione: il processo termina quando due catene in crescita si uniscono tra di loro formando un'unica molecola, oppure quando reagiscono per formare catene morte.

Il peso molecolare della molecola finale dipende dalle velocità relative di questi tre stadi che vengono controllati accuratamente in modo da ottenere un polimero con il grado di polimerizzazione desiderato.

Questa tipologia di polimerizzazione è utilizzata per la produzione di polietilene, polipropilene e polistirene [38] [39].

3.1.2 Caratteristiche dei polimeri

Come appena detto le caratteristiche dei polimeri dipendono fortemente dalla loro struttura e dalla loro polimerizzazione. Di seguito sono riportate le caratteristiche fondamentali che ne influiscono sul comportamento:

1. **peso molecolare:** è dato dalla somma del peso molecolare di ogni singolo monomero che costituisce la catena polimerica e di conseguenza maggiore è il numero di molecole che forma il polimero maggiore sarà il peso molecolare finale;

$$\bar{m} = \sum f_j m_j$$

Dove f_j è la frazione molare e m_j è il peso molecolare della j-esima unità ripetitiva.

2. **grado di polimerizzazione:** è il rapporto tra il peso molecolare del polimero e quello del singolo monomero che lo compone, si utilizza per esprimere la lunghezza della catena polimerica.

Queste due caratteristiche appena descritte influenzano la resistenza a trazione e a impatto, la resistenza a rottura e la viscosità, ovvero aumentano all'aumentare del peso molecolare del polimero (Figura 3.3);

$$DP = \frac{\overline{M}_n}{\overline{m}}$$

Dove \overline{M}_n è il peso molecolare medio numerico.

3. **tipi di legami:** oltre ai legami covalenti, denominati “primari” per via della loro forza, le catene polimeriche possono sviluppare anche legami di minore intensità (legami secondari) come ad esempio le forze di van der Waal, i legami ionici e quelli ad idrogeno, nonostante essi siano più deboli di quelli covalenti sono lo stesso i responsabili dell'aumento della resistenza all'aumento del peso molecolare, infatti aumentando il numero di monomero aumenta anche il numero di legami secondari tra gli atomi e questo comporta un'energia maggiore per essere sciolti;
4. **ramificazione:** durante la polimerizzazione vengono aggiunte catene laterali a quella principale, questa introduzione modifica il moto relativo della catena polimerica che causa un aumento della resistenza a deformazione e rottura, inoltre causa anche una diminuzione della densità poiché le ramificazioni ostacolano l'efficienza di compattazione;

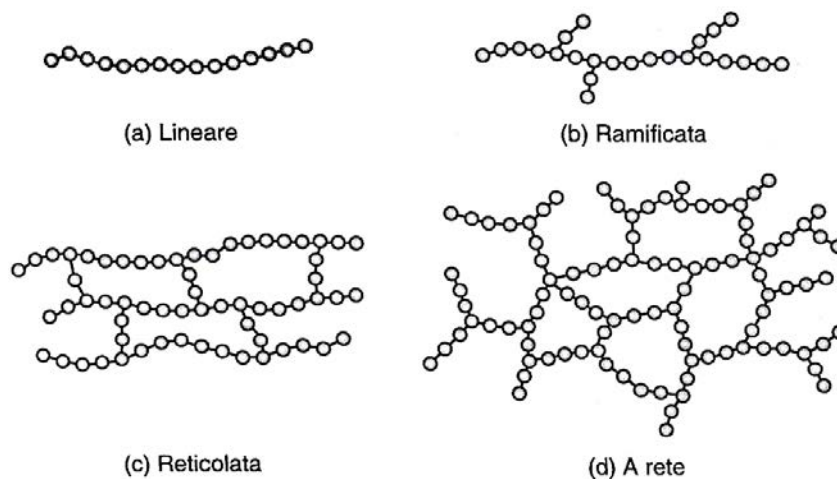


Figura 3.1: Rappresentazione schematica dei tipi di catene polimeriche [38].

5. **reticolazione:** la reticolazione generalmente causa la formazione di una struttura tridimensionale composta da catene adiacenti collegate da legami covalenti ed influisce particolarmente sulle proprietà del polimero finale conferendo loro durezza, resistenza e stabilità dimensionale, ma anche fragilità;

6. **numero e tipo di monomeri costituenti:** se le unità ripetitive costituenti la molecola sono tutti uguali essa viene definita “omopolimero”, invece se è formata da più tipi di unità è definita “copolimero”. Esistono diversi tipi di copolimeri (Figura 3.2) che si distinguono tra di loro in base a come sono disposte le unità ripetitive all’interno della macromolecola: “casuali” (a) in cui le unità sono disposte casualmente, “alternati” (b) in cui le unità si alternano, “a blocchi” (c) in cui le unità uguali tra loro sono raggruppate a blocchi e “ad innesto” (d) in cui alla catena principale di un omopolimero si innestano rami laterali di un omopolimero diverso. Il tipo di monomeri impiegati nella realizzazione della catena può conferire caratteristiche e proprietà uniche al polimero [39];

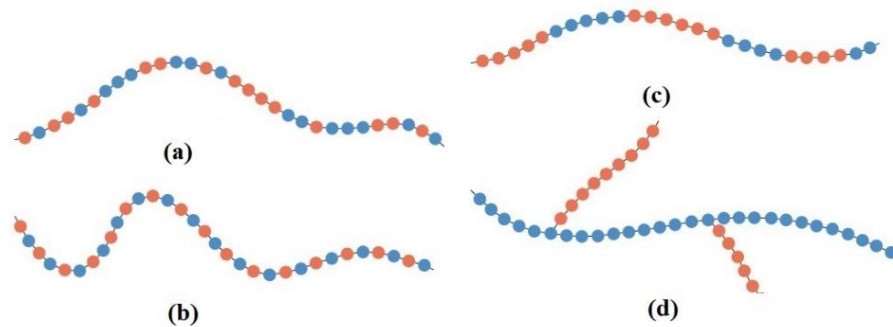


Figura 3.2: Tipi di copolimeri [39].

7. **cristallinità:** le catene di polimeri con un elevato grado di cristallinità (massimo circa 95%) possiedono un ordine ben preciso a lungo raggio, al contrario di quelli amorfi che invece sono caotici (grado di cristallinità 0). I polimeri al contrario di altri materiali non possono essere completamente cristallini, ma avranno sempre una parte amorfa.

Il grado di cristallinità influisce particolarmente su alcune proprietà del polimero, come la densità, la durezza, ma anche la rifrazione della luce. I polimeri amorfi possono essere completamente trasparenti (Figura 3.4). Il grado di cristallinità dipende dalla velocità di solidificazione durante il raffreddamento e va di pari passo con la ramificazione del polimero, infatti esse interferiscono con l’allineamento delle catene ed impediscono la formazione di cristalli ordinati, più lento sarà il processo di raffreddamento più le molecole avranno il tempo di formare una struttura ordinata.

A parità di peso molecolare, la densità di un polimero cristallino è maggiore del corrispondente amorfo, di conseguenza il grado di cristallinità può essere determinato sperimentalmente mediante misure di densità, utilizzando successivamente la seguente formula:

$$\% \text{ cristallinità} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \cdot 100$$

Dove ρ_s è la densità del campione che si vuole determinare, ρ_a è la densità del polimero totalmente amorfo e ρ_c è la densità del polimero perfettamente cristallino [39].

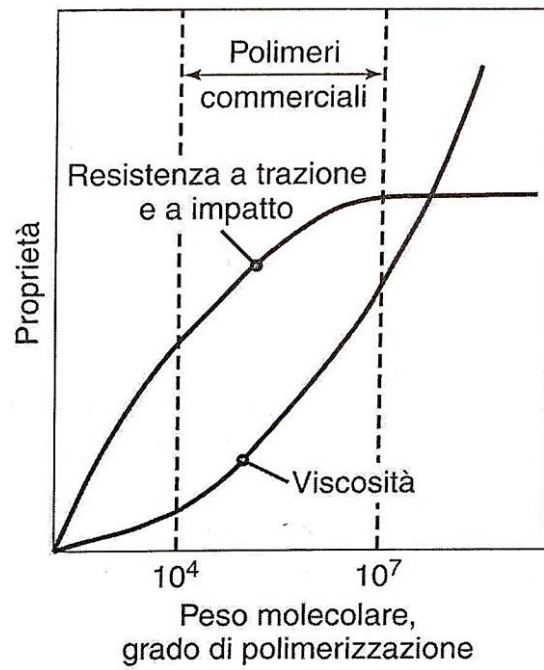


Figura 3.3: Variazione delle proprietà meccaniche all'aumentare del peso molecolare del polimero [38].

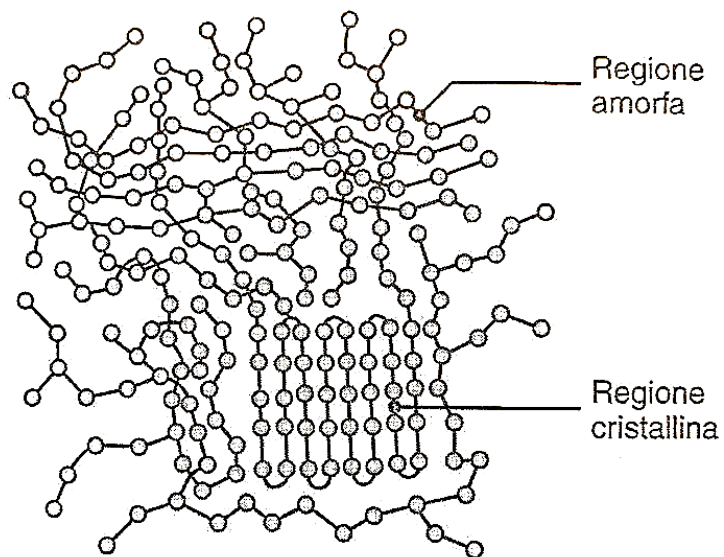


Figura 3.4: Differenze tra un polimero amorfo e uno cristallino [38].

3.1.3 Temperatura di transizione vetrosa

I polimeri cristallini, proprio per via della loro struttura ordinata, presentano una determinata temperatura di fusione (T_m) che segna il passaggio netto tra lo stato liquido e quello solido, tuttavia lo stesso non avviene per un polimero amorfo il quale non possiede un punto specifico di fusione, ma al contrario ha un cambiamento nel suo comportamento meccanico: infatti a basse temperature è duro e fragile mentre a temperature più elevate è gommoso, il punto in cui avviene questo cambiamento è denominato “temperatura di transizione vetrosa” (T_g) proprio perché il comportamento di questi polimeri è simile a quello del vetro.

La temperatura di transizione vetrosa non è uguale per tutti gli amorfi, ma varia da polimero a polimero in base alla sua composizione e struttura. Tuttavia non tutti i polimeri amorfi si comportano allo stesso modo: è questo il caso del policarbonato che pur essendo amorfo non ne presenta le caratteristiche, infatti non è fragile al di sotto della sua T_g ed è tenace a temperatura ambiente ed infatti viene utilizzato per la realizzazione delle calotte esterne dei caschi, ma anche per le visiere.

Inoltre come è possibile vedere dalla Figura 3.5 il volume specifico dei polimeri, sia amorfi che cristallini, aumenta all'aumentare della temperatura, poiché l'ampiezza della vibrazione delle molecole è maggiore [38].

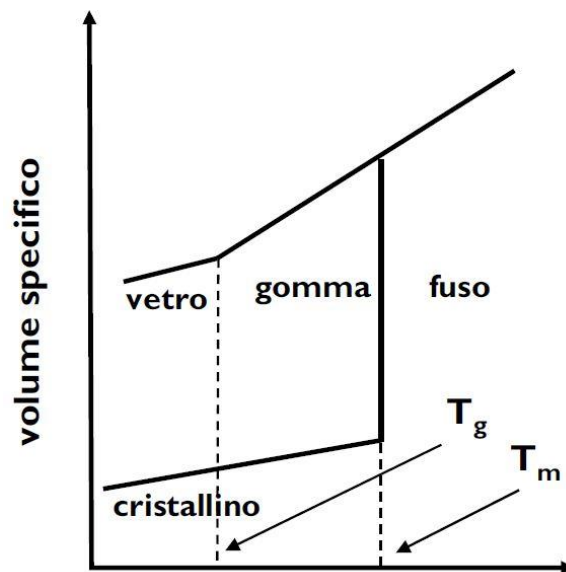


Figura 3.5: Volume specifico in funzione della temperatura, differenze di comportamento tra polimeri amorfi e cristallini [38].

3.1.4 I polimeri termoplastici

Sotto il termine “termoplastici” rientra una categoria di polimeri formati da catene lineari o poco ramificate; se subiscono un aumento di temperatura i legami secondari tra le molecole costituenti si indeboliscono e i polimeri passano così ad uno stato viscoso in cui è possibile dargli svariate forme tramite l’utilizzo di stampi poiché le catene adiacenti possono muoversi più liberamente. Una volta raffreddato ritorna alla sua originale durezza, essendo il processo reversibile. Tuttavia vanno incontro a degradazione se sottoposti a numerosi cicli termici nel tempo. Questo comportamento tipico li rende relativamente morbidi e duttili.

Se gli viene applicato un carico che supera un determinato valore critico il polimero si rompe irrimediabilmente.

L’aumento di temperatura su questo tipo di polimeri ha lo stesso effetto che ha sui metalli, ovvero la resistenza e il modulo di elasticità diminuiscono e la tenacità aumenta. La resistenza all’impatto invece aumenta all’aumentare della temperatura per i polimeri termoplastici, anche se non allo stesso modo per tutti, una modesta variazione di temperatura in alcuni casi porta ad effetti significativi sulla resistenza all’impatto.

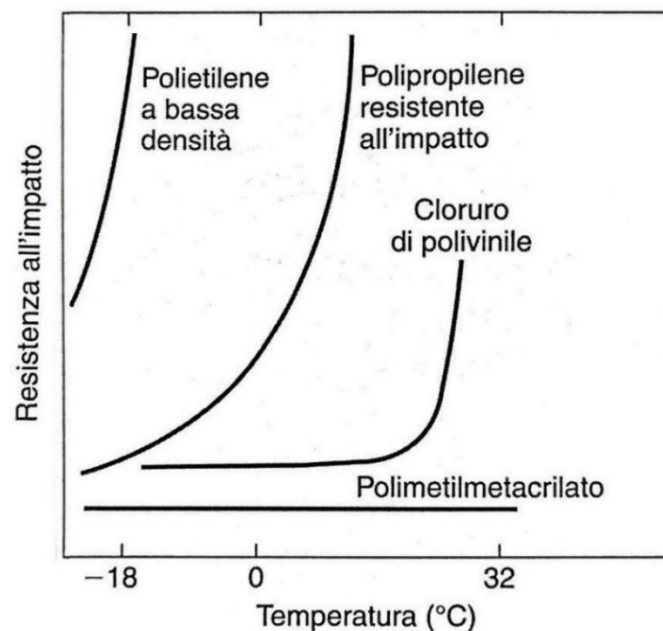


Figura 3.6: Effetto della temperatura sulla resistenza all'impatto di diverse materie plastiche [38].

Nei caschi da motociclista oggi giorno sono utilizzati soprattutto polimeri termoplastici, tra cui:

- acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS);
- poliammidi, tra cui nylon e aramidi (Kevlar);
- policarbonati;
- polistireni.

3.1.5 I polimeri termoindurenti

Durante la polimerizzazione la struttura di questi polimeri si consolida, formando solidi legami covalenti, diventando di fatto un'unica molecola e di conseguenza la forma del componente viene definita in modo permanente, infatti questa reazione di reticolazione è irreversibile il che significa che una volta scaldati e raffreddati questi materiali non modificano più la loro forma anche se sottoposti ad un'ulteriore ciclo termico, anzi se la temperatura aumenta eccessivamente essi tendono ad infiammarsi e a carbonizzarsi completamente.

Questo comportamento fa sì che essi abbiano una migliore stabilità dimensionale rispetto ai polimeri termoplastici e che le loro caratteristiche meccaniche non dipendano né dalla temperatura né dalla velocità di deformazione.

I principali polimeri termoindurenti impiegati nella realizzazione dei caschi sono gli epossidici che vengono utilizzati soprattutto come resine di rinforzo per le fibre, quindi come matrici per i materiali compositi. Gli epossidici vengono utilizzati perché hanno elevate proprietà meccaniche, adesive ed una buona resistenza al calore e all'aggressione chimica, per questi motivi sono idonei ad operare in condizioni di forse stress meccanico.

3.1.6 Comportamento viscoso dei polimeri

La maggior parte dei polimeri non presenta un comportamento newtoniano, ovvero in cui la viscosità (η) è una costante che quindi non dipende dalle condizioni di flusso ed è pari alla pendenza della retta del diagramma della sollecitazione (τ [Pa]) in funzione del gradiente di velocità ($\dot{\gamma}$ [s^{-1}]) denominato "curva di flusso", di cui è possibile vedere di seguito la formula e il grafico in Figura 3.7:

$$\tau = \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma}$$

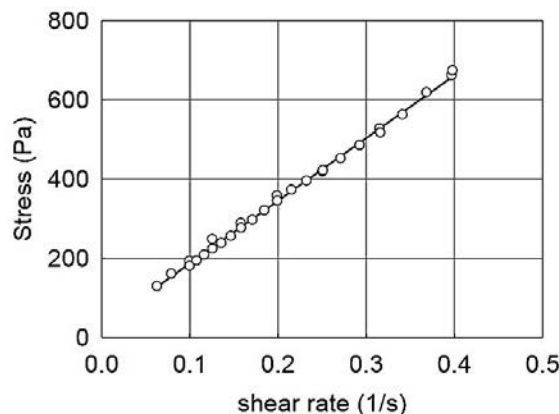


Figura 3.7: Curva di flusso in cui il coefficiente angolare costante è la viscosità η [40].

Solitamente invece il comportamento dei polimeri rientra nella classificazione di fluido non newtoniano e ciò significa che la viscosità varia secondo una legge di potenza (*power law*):

$$\eta = A (\dot{\gamma})^{n-1}$$

dove A è l'indice di consistenza ed η è l'indice di flusso che nel caso degli pseudoplastici è compreso tra 0 e 1, mentre per i dilatanti è maggiore di 1; entrambe le costanti variano da polimero a polimero. La rappresentazione in scala logaritmica di tale formula è una retta di pendenza $n - 1$ che rende molto più facilmente leggibile il suo andamento in un grafico ad assi logaritmici.

Esistono due principali categorie di fluidi non newtoniani in cui rientrano i polimeri: quella più comune è la “pseudoplastica” (*shear thinning*) mentre l'altra è la “dilatante” (*shear-thickening*) (Figura 3.8).

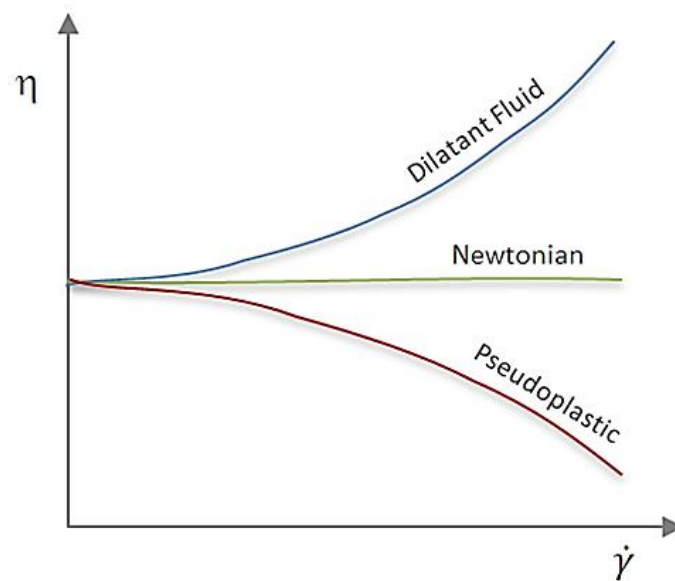


Figura 3.8: Variazione della viscosità in funzione del gradiente di velocità per i tre diversi tipi di fluido: dilatante, newtoniano e pseudoplastico [41].

Per i polimeri con comportamento pseudoplastico la viscosità apparente non è più costante, ma decresce all'aumentare del gradiente di velocità ed aumenta rapidamente all'aumentare del peso molecolare, di conseguenza sarà sempre maggiore di quella del monomero costituente per via delle forze intermolecolari (legami primari e secondari) esistenti tra le molecole. La stessa cosa, ma al contrario, avviene per i polimeri dilatanti, ovvero la viscosità aumenta all'aumentare del gradiente di velocità.

Questo andamento, come detto in precedenza, è riportato in un grafico ad assi logaritmici (Figura 3.9). Per bassi gradienti di velocità si vede che la viscosità ha un andamento costante,

riconducibile al comportamento di un fluido newtoniano ed infatti prende il nome di “*plateau* newtoniano”, ma al crescere del gradiente si nota un progressivo calo della viscosità che raggiunge un andamento lineare e questa è la zona del grafico in cui vale l’espressione della legge di potenza. Infine in alcuni tipi di polimeri può capitare che dopo il tratto lineare si presenti un ulteriore plateau agli alti gradienti di velocità.

In passato sono stati realizzati dei modelli analitici che potessero rappresentare al meglio questo tipo di comportamento inizialmente newtoniano e successivamente non lineare e che riuniscano le due equazioni sopra esposte. Una formula matematica molto utilizzata in questo campo è quella di Cross:

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty})}{1 + (\tau\dot{\gamma})^{1-n}}$$

Dove η_0 è la viscosità newtoniana, il valore del primo *plateau* a bassi valori di gradiente e η_{∞} è invece il valore del secondo *plateau*, quello ad alti valori di gradiente [40] [41].

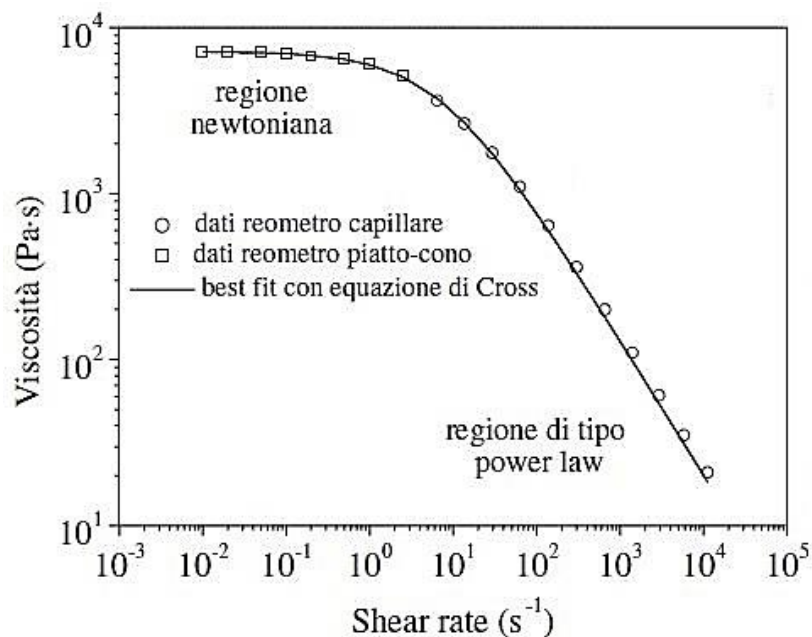


Figura 3.9: Curva di flusso con assi logaritmici per un polimero pseudoplastico [38].

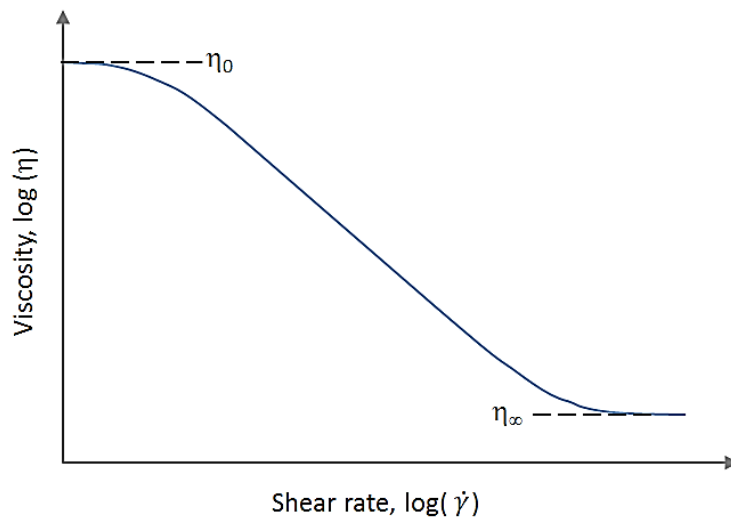


Figura 3.10: Curva di flusso ad assi logaritmici per un polimero pseudoplastico in cui si presenta un secondo plateau per alti gradienti di velocità [41].

In Figura 3.11 è mostrato l'andamento della curva di flusso ad assi logaritmici di alcuni polimeri termoplastici e come è possibile vedere essi hanno un comportamento da fluido non newtoniano pseudoplastico più o meno marcato a seconda del polimero stesso.

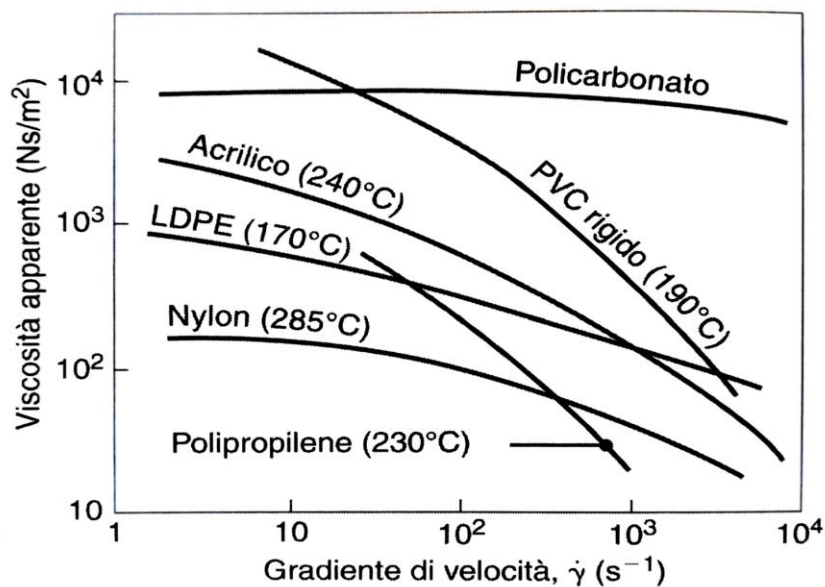


Figura 3.11: Viscosità di alcuni polimeri termoplastici in funzione del gradiente di velocità [38].

Alcune società private ed enti governativi di vari Paesi stanno studiando dei sistemi di protezione balistici che utilizzano i fluidi dilatanti sfruttandone la peculiare capacità di aumentare la viscosità durante un impatto molto veloce come può essere quello di un proiettile. L'impiego di questi materiali insieme ad altri già utilizzati in questo campo, come ad esempio

il Kevlar, permetterebbe la realizzazione di artefatti estremamente leggeri e resistenti ad impatti di proiettili, disperdendo l'energia dell'urto su una superficie del corpo molto ampia, riducendo il trauma subito, tuttavia questi materiali innovativi risultano completamente inutili in caso di attacchi lenti [42].

3.1.7 Proprietà meccaniche dei polimeri

Sulla base del comportamento meccanico i polimeri si possono suddividere in tre categorie (Figura 3.12):

- A. **Polimero fragile:** questo tipo di polimero come suggerisce il nome è molto fragile e se sottoposto a sforzo si rompe pur essendo ancora in campo elastico;
- B. **Polimero plastico:** questo polimero inizialmente si deforma elasticamente, poi subisce snervamento ed infine ha un comportamento plastico fino alla sua rottura, è tipico dei polimeri duttili;
- C. **Polimero elastico:** è il comportamento tipico degli elastomeri, la deformazione è sempre elastica e si comporta come un solido gommoso.

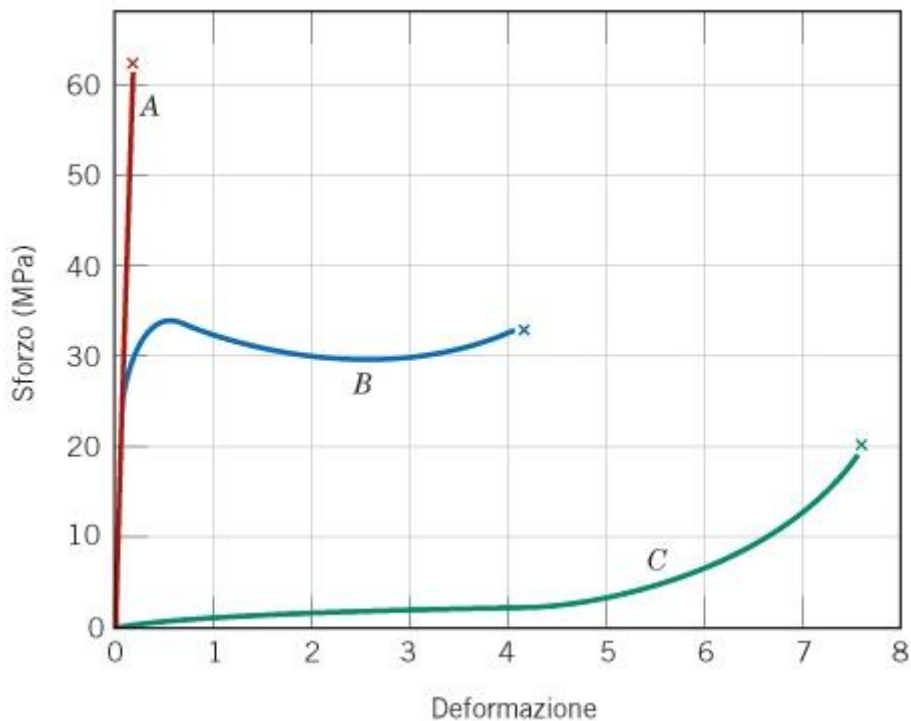


Figura 3.12: Grafico sforzo/deformazione per le tre categorie di comportamento dei polimeri [39].

Il comportamento dei polimeri varia al variare della temperatura, in particolare i polimeri che possiedono una temperatura di transizione vetrosa (T_g) possono rientrare in più di una categoria di comportamento in base alla temperatura che hanno. La temperatura per cui si ha il passaggio dal comportamento fragile a quello duttile è denominata “temperatura di transizione fragile-duttile” (T_β), che non è sempre coincidente con la T_g . Un esempio di ciò è visibile in Figura 3.13, in cui viene rappresentato il comportamento del polimetilmetacrilato (plexiglass): per $T \ll T_\beta$ il comportamento è fragile, ma all’aumentare della temperatura e quindi all’avvicinarsi a quella di transizione fragile-duttile, il comportamento diventa sempre più plastico.

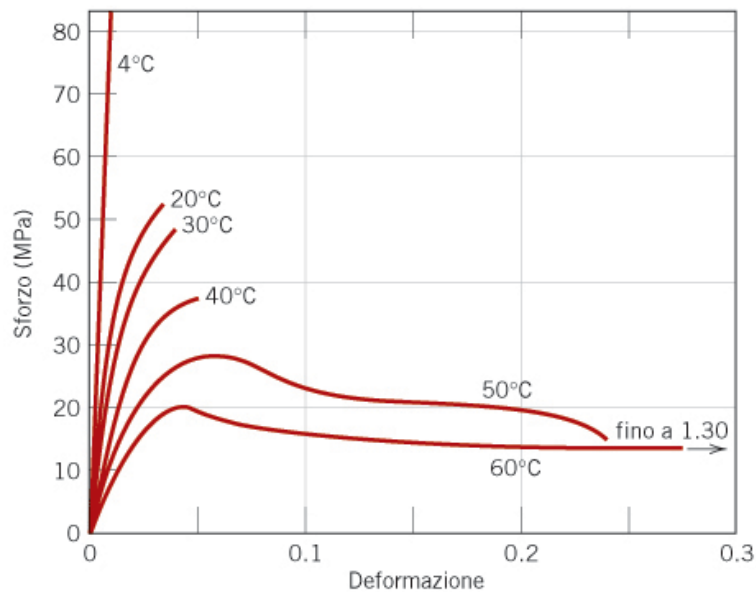


Figura 3.13: Variazione di comportamento in base alla temperatura [39].

Per quanto riguarda i polimeri termoplastici, che normalmente sono duttili, il comportamento è quello denominato (B), visibile nel grafico in Figura 3.12 e riportato nel dettaglio in Figura 3.14.

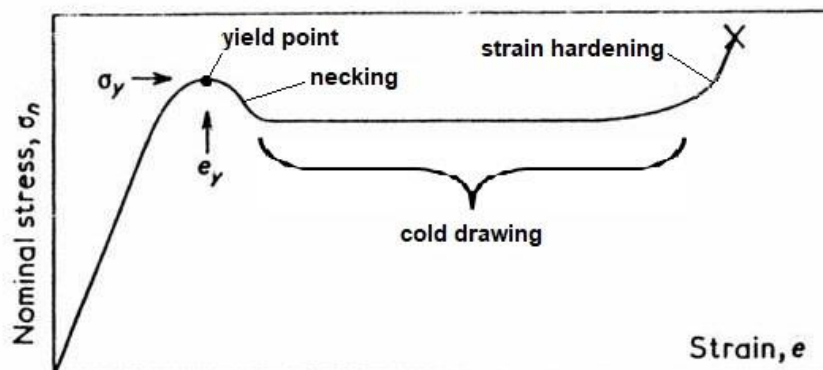


Figura 3.14: Comportamento dei polimeri duttili [43].

Nel punto di snervamento (*yield point*) la deformazione di un provino composto dal polimero in esame e sottoposto a trazione, diventa permanente; tuttavia esso è un punto difficilmente determinabile per via della natura stessa dei polimeri e per questo motivo, per convenzione, lo si fa corrispondere al massimo della curva sforzo/deformazione.

Superato questo punto si forma una strizione localizzata al centro del provino (*neck*) e l'andamento della curva diventa calante. Nelle zone di materiale attorno alla strizione la resistenza alla deformazione aumenta, poiché le molecole sono molto più vicine tra di loro e di conseguenza i legami di van der Waals sono più forti. Questo fa sì che la strizione si espanda tutta la lunghezza del provino e così facendo l'andamento della curva sforzo/deformazione diventa costante e si entra nella zona di scorrimento a freddo (*cold drawing*).

In seguito allo scorrimento a freddo, in alcuni polimeri si verifica l'incrudimento (*strain hardening*) che corrisponde alla zona del grafico in cui la resistenza a trazione aumenta. Questo comportamento è dovuto all'allineamento delle catene polimeriche lungo la direzione in cui agisce la sollecitazione che rende il provino più resistente.

La fine della curva, indicata con una "X", rappresenta la resistenza a trazione o carico di rottura, ovvero è il punto in cui avviene la rottura del provino.

3.1.8 Meccanismi di deformazione dei polimeri

La risposta macroscopica di un polimero alle sollecitazioni meccaniche esterne varia in base ai processi di deformazione che avvengono a livello molecolare ed atomico.

Inoltre in base al tipo di polimero (elastomero o semi-cristallino) si avrà una diversa deformazione a livello molecolare.

Gli **elastomeri** si deformano tramite un parziale srotolamento (*uncoiling*) del reticolo di molecole che forma il polimero, le catene così linearizzate si stirano e si posizionano parallelamente alla direzione di sollecitazione. Se la forzante esterna viene rimossa le catene, e di conseguenza anche il polimero, tornano allo stato iniziale.

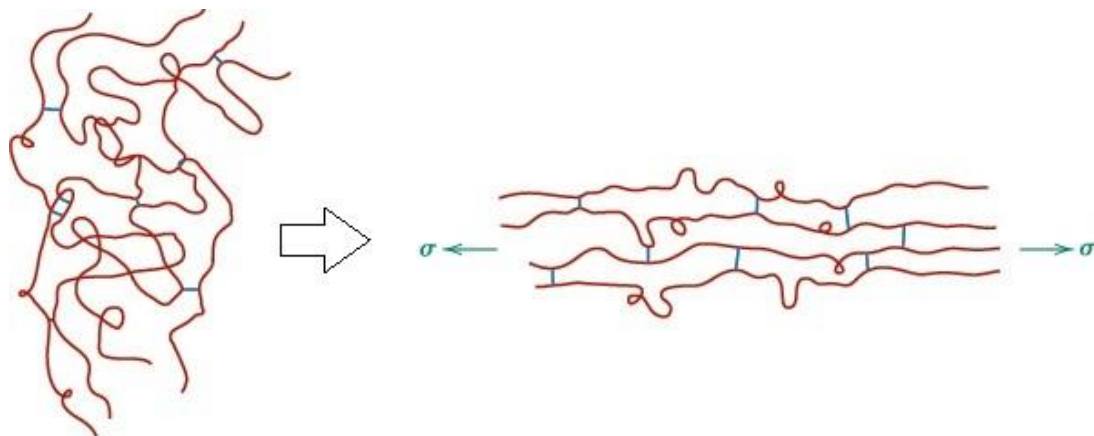


Figura 3.15: Schematizzazione della deformazione di un elastomero [39].

I polimeri **semi-cristallini** invece subiscono inizialmente una deformazione elastica e in seguito una plastica.

Come detto precedentemente un polimero non può mai avere una struttura completamente cristallina, ma possiederà sempre una parte amorfa. Ed è proprio in questa parte amorfa che comincia la deformazione elastica quando il materiale è sottoposto a sollecitazione, allungandosi nella direzione in cui agisce il carico. Successivamente anche le regioni cristalline iniziano a deformarsi e ad allinearsi al carico.

All'aumentare della sollecitazione la deformazione diventa plastica, i blocchi cristallini si separano in blocchi più piccoli, tenuti insieme da catene di collegamento. Infine si ha uno stiramento del materiale, ovvero sia i blocchi, sia le catene di collegamento si allineano alla direzione di trazione [39].

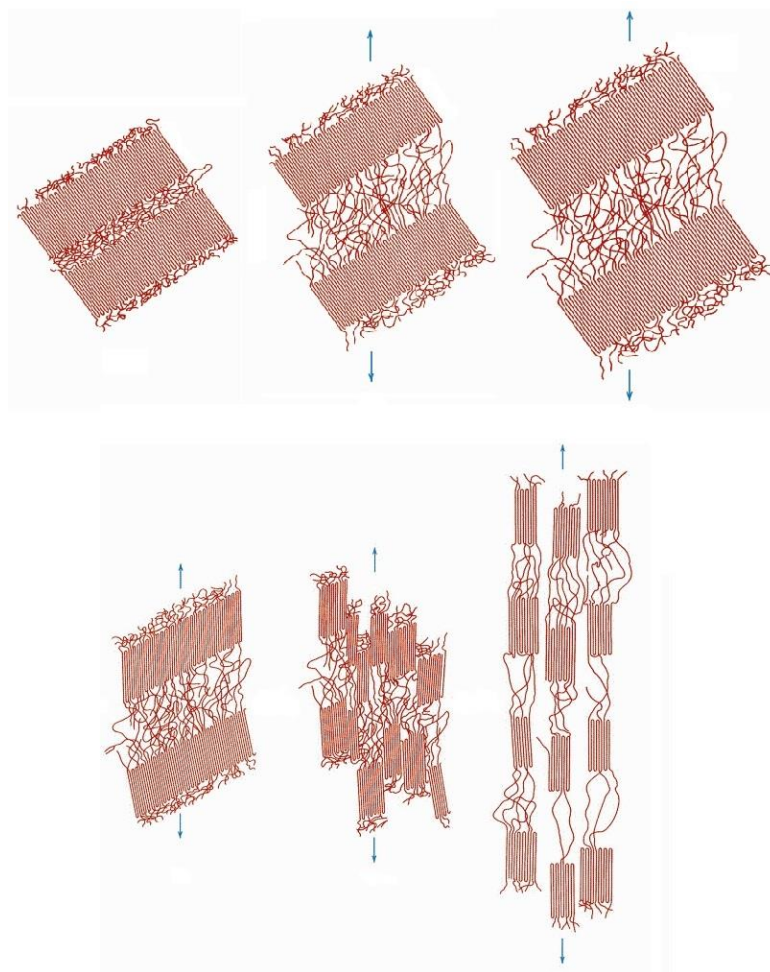


Figura 3.16: Schema deformazione elastica e plastica dei polimeri semi-cristallini [39].

Nei polimeri duttili la frattura è preceduta da significative deformazioni plastiche e si traduce nella separazione in due sole parti, mentre nei polimeri fragili la frattura sopraggiunge prima dello snervamento e quindi delle deformazioni plastiche, in questo caso il meccanismo che porta a frattura è la propagazione di difetti e cricche, solitamente avviene per piccole deformazioni che portano alla formazione di innumerevoli frammenti. I siti più probabili per la nucleazione di cricche sono quelli in cui sono presenti irregolarità nella struttura polimerica.

3.2 Le materie plastiche: accenni sui materiali compositi a matrice polimerica

Un materiale per poter essere definito “composito” deve essere formato da una combinazione di due o più fasi chimicamente insolubili e macroscopicamente distinte tra loro, ma intimamente connesse, denominate fibre e matrice.

Le proprietà del materiale finale dipendono dalle due componenti e sono di molto superiori e quelle dei materiali costituenti presi singolarmente, per questo motivo si realizzano combinazioni volte a sfruttare le caratteristiche di ogni componente per ottenere il composito con le migliori prestazioni possibili.

Le fibre all’interno del composito svolgono un ruolo di rinforzo, poiché sono molto rigide e hanno valori elevati di resistenza specifica, tuttavia prese singolarmente esse sono estremamente fragili, di conseguenza non possono essere impiegate da sole e per questo motivo vengono inserite all’interno di una matrice, che ha resistenza e rigidità molto inferiori ma un’elevata tenacità e quindi essa ha il compito di proteggere le fibre, tenerle separate e stabili nella loro posizione ed inoltre ha la capacità di fermare la propagazione di eventuali cricche.

Esistono diversi tipi di materiali compositi che dipendono dalla forma e dalla disposizione delle fibre nella matrice, ad esempio le fibre possono essere presenti sotto forma di particelle, oppure possono essere lunghe o corte, in altri casi se esse sono disposte in piano possono essere impilate sotto forma di lamine sovrapposte per realizzare laminati, altrimenti può essere realizzata una struttura a sandwich con cuore in *honeycomb* o in schiuma.

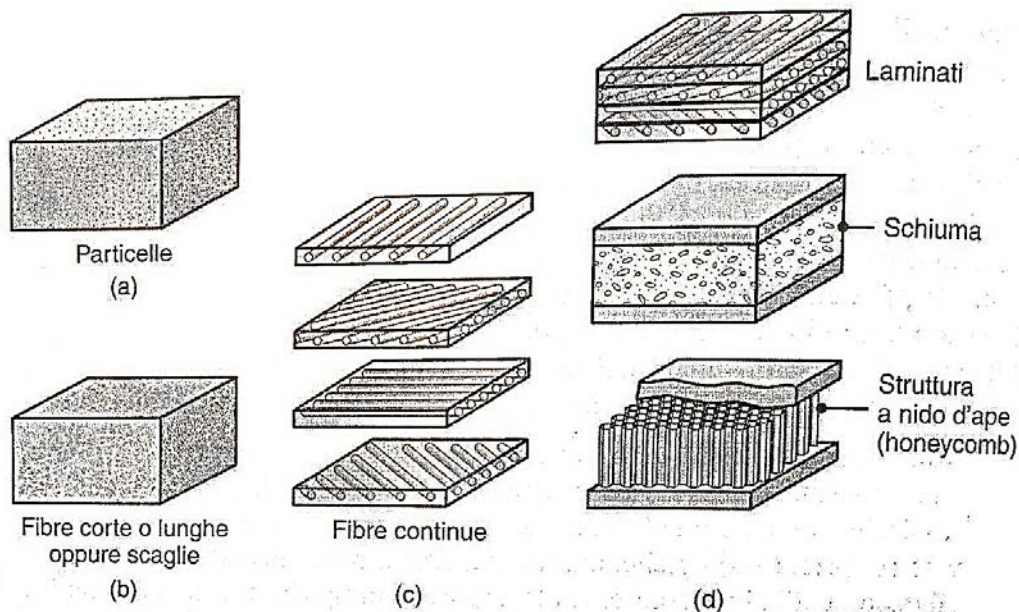


Figura 3.17: Rappresentazione schematica delle tipologie di compositi a matrice polimerica [38].

La percentuale di fibre in un composito può variare da 10 a 60% in volume, non è consigliabile aumentarne eccessivamente la quantità poiché si rischia di far diminuire le proprietà strutturali.

3.2.1 Principali tipi di matrici utilizzati

Le matrici possono essere classificate in base al tipo di materiale con cui sono realizzate e perciò esistono matrici organiche, oppure matrici inorganiche.

Le matrici organiche sono quelle più largamente diffuse al giorno d'oggi e sono:

- **termoindurenti:** sono liquide a temperatura ambiente, ma assumono lo stato solido quando sono portate alla loro temperatura di polimerizzazione e ciò solitamente avviene in autoclave tramite cicli di temperatura e pressione fino alla vetrificazione finale. Le più impiegate di questa tipologia sono le epossidiche, vinilestere, fenoliche, siliconiche e poliammidiche;
- **termoplastiche:** sono allo stato solido a temperatura ambiente, ma assumono uno stato gommoso se riscaldate fino alla loro temperatura di transizione vetrosa; presentano molti vantaggi rispetto alle matrici termoindurenti e per questo motivo si stanno diffondendo sempre più anche nel settore aerospaziale, ad esempio hanno eccellenti capacità di deformazione, elevata resistenza all'umidità e *shelf-life* illimitata, tuttavia presentano ancora degli svantaggi come le alte temperature di processo, l'elevato costo dei materiali necessari e la loro scarsa reperibilità.

Le matrici inorganiche invece si suddividono in:

- **metalliche:** vengono impiegati vari metalli tra cui Alluminio, Nickel, Titanio, Magnesio e le loro leghe, possono essere impiegate fino a temperature di 700°C;
- **ceramiche:** sono le più resistenti al calore, infatti possono sopportare temperature fino a 1000°C.

3.2.2 Principali tipi di fibre utilizzati

Tra tutti i tipi di rinforzo elencati precedentemente le fibre lunghe e continue sono quelle che offrono migliori prestazioni in termini di rigidità e resistenza del materiale finale, per questo motivo sono le più impiegate e in base ad esse variano anche le tecniche di lavorazione dei materiali.

Le più comunemente utilizzate sono:

- **fibre polimeriche:** in particolare vengono utilizzate le fibre aramidiche, il cui nome commerciale è Kevlar, sono molto leggere e hanno elevate caratteristiche di tenacità e resistenza all'impatto, intermedie tra le fibre di vetro e quelle di carbonio, tuttavia sono soggette all'assorbimento dell'umidità che ne riduce le proprietà e a causa della perdita di adesione dalla matrice di cui soffrono, possiedono una bassa resistenza in direzione trasversale, bassa resistenza alla compressione in direzione longitudinale e bassa resistenza al taglio interlaminare;

- **fibre di vetro:** sono una combinazione di ossidi in cui quello principale è il silicio e ad esso vengono aggiunte piccole quantità variabili di calcio, sodio, boro, ferro, ecc. Tra tutte sono le fibre meno costose e in base agli elementi utilizzati per realizzarne il vetro assumono nomi diversi, ad esempio il “tipo E” è un vetro di calcio, alluminio e borosilicato e fornisce una buona combinazione tra tensioni di rottura e modulo elastico. il “tipo S” è formato da magnesio alluminio e silicato e per questo motivo è il più resistente e costoso ed infine il “tipo E-CR” offre una maggiore resistenza alle alte temperature e alla corrosione;
- **Fibre di carbonio:** sono le fibre più costose, ma anche quelle più prestanti in termini di resistenza specifica, infatti presentano una bassa densità, ma elevate resistenza e rigidità e per questo motivo sono le più utilizzate per strutture in composito ad alta performance. [38]

3.2.3 I pre-impregnati o prepreg

L'unione della resina al rinforzo e la successiva stratificazione sono processi molto delicati e solitamente vengono eseguiti manualmente con tecniche sviluppate nel corso degli anni e devono essere svolti in tempi brevi poiché quando i due componenti conservati separatamente entrano in contatto catalizzano con estrema facilità, passando in poco tempo dallo stato liquido a quello solido, impedendo qualsiasi altra operazione. Per colpa di questo fenomeno gli addetti non possono svolgere il lavoro al meglio e quindi tendono ad impiegare grandi quantità di resina, la cui parte eccedente, una volta solidificata, si tramuta in peso superfluo, inoltre il processo manuale, per quanto possa essere svolto accuratamente, porta spesso alla realizzazione di manufatti non perfettamente uniformi, con accumuli di resina in alcune zone, oppure con bolle d'aria ed impurità imprigionate dentro alla resina, che nonostante venga fatta fuoriuscire sotto forma di bolle d'aria durante la cura in autoclave permane comunque nel prodotto finito.

Negli ultimi anni questi problemi sono stati risolti ricorrendo all'utilizzo di una nuova tipologia di materiali denominati “pre-impregnati o *prepreg*”. Infatti le fibre di cui sono composti questi materiali vengono impregnate in sede industriale con un processo automatizzato che prevede il passaggio della fibra attraverso delle vasche contenenti la resina in cui viene completamente impregnata, il vantaggio di questa tecnica è che dopo l'impregnazione la fibra trattata viene fatta passare attraverso delle barre raschiatrici che rimuovono la resina in eccesso lasciando soltanto la giusta quantità distribuita in modo uniforme.

Le fibre così lavorate vengono riscaldate per farle compattare eliminando le bolle d'aria e impurità inevitabilmente presenti dopo la realizzazione, successivamente possono essere stivate e conservate fino alla data di scadenza fornita dal produttore (solitamente dopo 6 mesi dalla sua realizzazione), a patto che siano conservate alla giusta temperatura (solitamente attorno ai -18°C) che ne rallenta la polimerizzazione, la quale ad ogni modo continua seppur lentamente ed infatti oltre il termine limite non risultano più utilizzabili.

Questi fogli pre-impregnati perciò risultano molto più versatili poiché possono essere conservati per lunghi periodi e grazie alla loro lenta polimerizzazione è possibile deporre i fogli con più cura e attenzione producendo così manufatti più precisi, leggeri e prestanti.

Tuttavia per maneggiare e disporre i *prepreg* è necessaria manodopera altamente specializzata e il sito di produzione deve essere dotato di camere pulite e climatizzate, dove l'accesso è ristretto e temperatura, umidità e agenti contaminanti sono strettamente controllati per poter stoccare e lavorare al meglio i componenti finali, infatti i *prepreg* presentano un elevato grado di "appiccicosità" (*tack level*) che li rende particolarmente soggetti all'accumulo di polveri che vanno ad inficiare sulla riuscita del prodotto finale [44].

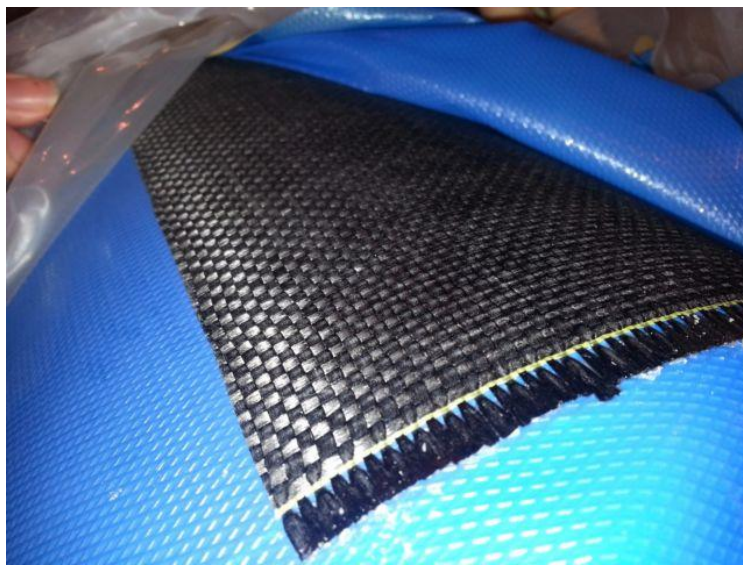


Figura 3.18: Esempio di *prepreg* in fibra di carbonio [44].

3.2.4 Proprietà dei compositi

I materiali compositi sono caratterizzati da una spiccata anisotropia, infatti tutte le loro proprietà meccaniche dipendono dall'orientazione delle fibre all'interno della matrice; dipendono inoltre dalla loro lunghezza e dalla loro percentuale in volume. In particolare i massimi valori di resistenza e rigidità si hanno quando le fibre hanno la stessa orientazione del carico applicato al materiale e per questo motivo i compositi possono essere "personalizzati" in base all'oggetto che devono comporre, in modo tale che la composizione finale sia ottimizzata alle condizioni di utilizzo del componente (Figura 3.19).

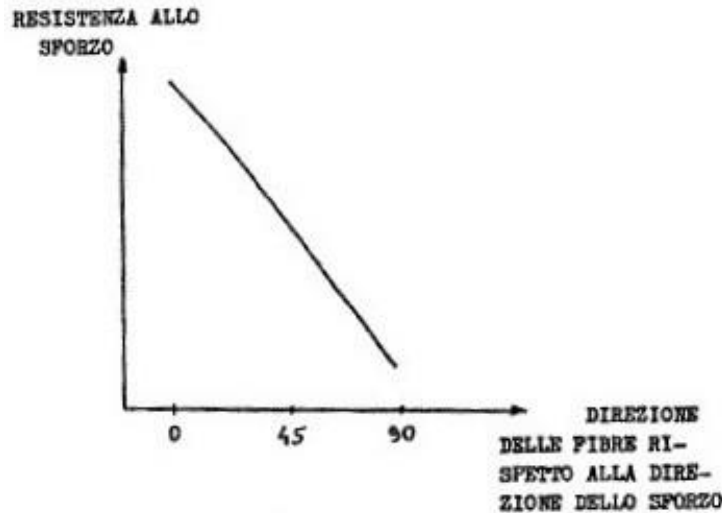


Figura 3.19: Andamento della resistenza allo sforzo in funzione della direzione delle fibre [44].

Un fattore molto importante è la forza del legame tra fibre e matrice, infatti i carichi vengono trasmessi dall'interfaccia tra le due componenti e di conseguenza maggiore è il legame tra le due maggiore sarà la sua resistenza, se tale legame risulta essere troppo debole il materiale può andare incontro a sfilamento della fibra o delaminazione. Tuttavia l'adesione può essere migliorata impiegando speciali trattamenti superficiali sulle fibre.

Per calcolare il modulo elastico longitudinale (E_L), ovvero nella direzione delle fibre, di un materiale composito a fibre lunghe disposte unidirezionalmente è possibile utilizzare il modello di Voigt secondo il quale, per poter essere applicato, devono essere verificate alcune ipotesi:

- legame perfetto tra matrice e fibra, che si traduce in compatibilità delle deformazioni in direzione longitudinale (quella in cui sono disposte le fibre) poiché fibra e matrice lavorano in parallelo: $\varepsilon_L = \varepsilon_{fL} = \varepsilon_{mL}$ dove f è il pedice che indica le fibre e m la matrice;
- comportamento perfettamente elastico, per cui vale la legge di Hooke sia per le fibre che per la matrice: $\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fL}$ e $\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_{mL}$;
- la sezione è omogenea.

Se si applica un carico esterno lungo la direzione delle fibre esso viene diviso tra le fibre e la matrice:

$$F_L = F_f + F_m$$

$$\sigma_L \cdot A_L = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

$$E_L \cdot A_L \cdot \varepsilon_L = E_f \cdot A_f \cdot \varepsilon_{fL} + E_m \cdot A_m \cdot \varepsilon_{mL}$$

Dove σ_L , σ_f e σ_m sono rispettivamente gli sforzi normali applicati al composito, alle fibre e alla matrice e A_L , A_f e A_m invece sono le aree delle rispettive sezioni.

Introducendo ora la frazione volumetrica delle fibre, come il rapporto tra il volume delle fibre e quello totale del composito, che per via dell'omogeneità della sezione è uguale al rapporto delle rispettive aree:

$$\phi = \frac{V_f}{V} = \frac{A_f}{A}$$

Da qui si ricava che:

$$E = E_f \cdot \phi + E_m(1 - \phi)$$

Questa equazione prende il nome di “*Rule of mixtures*” o “Legge delle miscele”.

Invece, considerando sempre lo stesso composito formato da fibre lunghe unidirezionali, per calcolarne il modulo elastico trasversale (E_T) ovvero quello nella direzione perpendicolare alle fibre è possibile applicare il modello di Reuss, per il quale valgono sempre determinate ipotesi:

- fibra e matrice nella direzione trasversale lavorano in serie, di conseguenza in questo caso vale l'uguaglianza tra gli sforzi normali: $\sigma = \sigma_f = \sigma_m$;
- la deformazione complessiva nella direzione trasversale è la somma di quella delle fibre e della matrice sempre nella direzione trasversale: $\varepsilon_T = \varepsilon_{fT} + \varepsilon_{mT}$;
- anche in questo caso il comportamento è perfettamente elastico e di conseguenza vale la legge di Hooke.

Da queste ipotesi si ricavano le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} \varepsilon_T \cdot V &= \varepsilon_{fT} \cdot V_f + \varepsilon_{mT} \cdot V_m \\ \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_{mT} &\quad \text{e} \quad \sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fT} \end{aligned}$$

Che sostituendo nella prima:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{E_T} &= \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot V_m \\ E_T^{-1} &= E_f^{-1} \cdot \phi + E_m^{-1}(1 - \phi) \end{aligned}$$

Tuttavia questi due metodi non sono precisi, in particolare Voigt sovrastima i risultati ottenuti dai dati sperimentali, mentre Reuss li sottostima, ed entrambi rappresentano il caso limite, ma se si disponessero due lamine con le fibre orientate a 0 e 90°C è possibile ricorrere al metodo di Hill che esegue una media tra gli altri due:

$$E_H = \frac{E_V + E_R}{2}$$

Dove i pedici indicano le iniziali dei rispettivi metodi (Hill, Voigt e Reuss).

Un andamento dei valori ottenuti con tali metodi al variare della frazione volumetrica di fibre è visibile in Figura 3.20. [44]

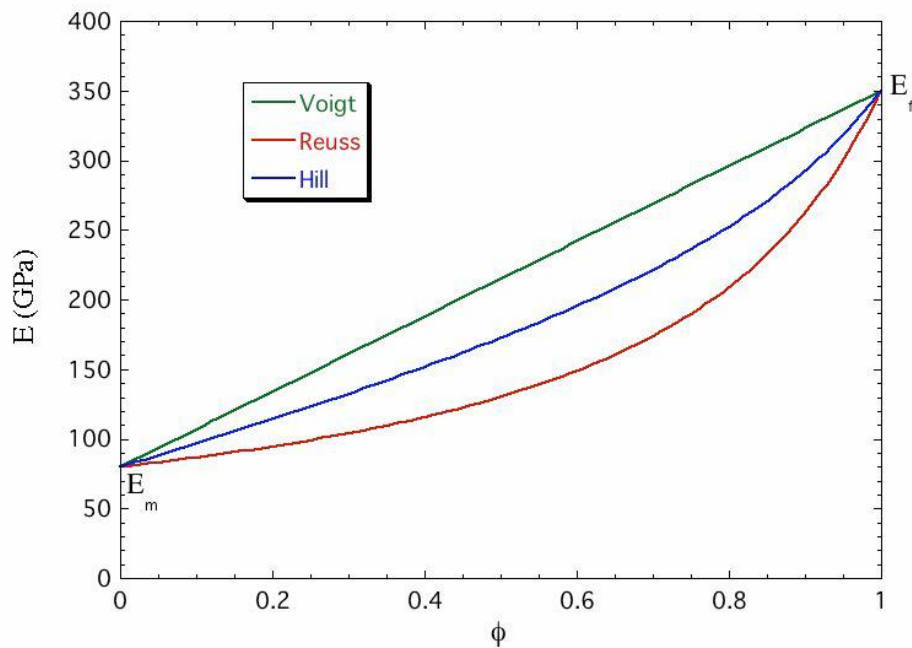


Figura 3.20: Valori del modulo elastico ottenuti dai metodi di Voigt, Reuss e Hill al variare della frazione volumetrica di fibre [44].

3.3 Materiali attualmente in uso nei caschi

Come accennato nel Paragrafo 2.5, in questo capitolo saranno trattati i materiali che costituiscono ogni componente di un casco.

3.3.1 Policarbonato e ABS

Tra i due polimeri termoplastici quello che solitamente viene impiegato è il policarbonato (PC), presenta buone caratteristiche chimiche e meccaniche, infatti resiste bene all'aggressione di acidi minerali, di idrocarburi alifatici come la benzina, dei grassi e dell'acqua sotto i 70 °C, sopra a tale temperatura si ha una graduale decomposizione chimica.

Le proprietà meccaniche, quali allungamento, carico a rottura, resistenza all'urto e alla flessione, aumentano linearmente col peso molecolare del polimero fino al raggiungimento di un plateau in corrispondenza del peso molecolare pari a 22000 [45].

Un altro polimero termoplastico utilizzato per la realizzazione delle calotte è l'Acrilonitrile Butadiene Stirene, più comunemente noto come ABS; deriva dallo stirene polimerizzato insieme all'acrilonitrile in presenza di polibutadiene, le cui proporzioni possono variare dal 15% al 35% di acrilonitrile, dal 5% al 30% di butadiene e dal 40% al 60% di stirene. Queste percentuali sono fondamentali per le caratteristiche meccaniche finali dell'ABS.

L'ABS presenta elevate proprietà meccaniche di durezza e resistenza all'impatto, la quale varia in base alla quantità di polibutadiene rispetto agli altri due polimeri componenti e si mantiene su livelli elevati anche a basse temperature. È resistente a solventi, alcool, vari tipi di acidi ed oli, tuttavia è infiammabile se esposto a temperature elevate che lo faranno sciogliere ed entrare in ebollizione [46].

La lavorazione di tali materiali è facile e veloce anche se all'uscita dallo stampo, prima di effettuare qualsiasi altra operazione, è necessario levigare il prodotto per rimuovere le inevitabili imperfezioni dovute all'utilizzo degli stampi.

Inoltre si prestano bene all'applicazione delle vernici sia di finitura superficiale sia di decorazione, anche se devono essere utilizzate solamente sostanze chimiche compatibili per evitare di danneggiare le superfici e di conseguenza anche la loro resistenza.

Per questi motivi sono materiali che vengono impiegati per la realizzazione delle calotte esterne dei caschi, anche se tra tutti quelli che vengono impiegati non sono i più efficienti sia in termini di prestazioni che di peso.

Questi materiali vengono utilizzati anche per la realizzazione delle visiere e al contrario di quanto avviene per le calotte per esse sono quelli ottimali poiché sono molto duri e resistenti e per questi motivi resistono bene ai graffi e alle abrasioni.

Nonostante i numerosi aspetti positivi essi non sono, come già accennato, i materiali più pregiati con cui vengono realizzate le calotte esterne ed infatti il costo dei caschi realizzati con questi

materiali termoplastici è inferiore a quello di altri che impiegano materiali più performanti e resistenti. Per questo motivo in tali caschi lo strato di rivestimento interno deve essere più spesso con un conseguente aumento delle dimensioni e del peso totale [47].

Un altro aspetto negativo di questi materiali plastici è la loro sensibilità agli sbalzi termici infatti tendono a dilatarsi con l'aumentare della temperatura e a restringersi con il diminuire e a lungo andare ciò porta a deformazioni permanenti [48].

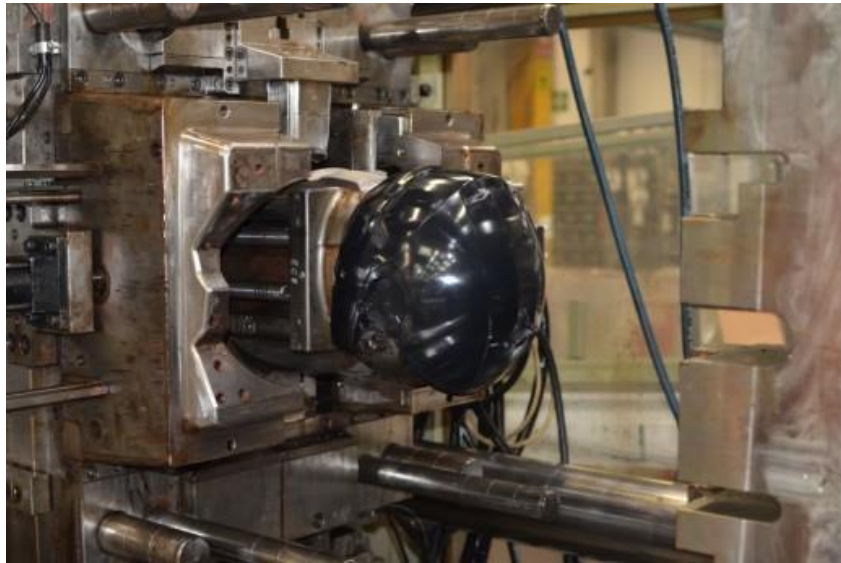


Figura 3.21: Calotta esterna in policarbonato appena estratta dallo stampo [49].

3.3.2 Fibre di vetro, carbonio e Kevlar

I caschi più costosi e prestanti hanno la calotta esterna realizzata in materiale composito. Possono essere utilizzate fibre di vetro, di carbonio e di kevlar, oppure un'unione di tutte e tre. Oltre alle fibre è necessaria una resina termoindurente in vinilestere con base epossidica. Le fibre aramidiche, ovvero il Kevlar, sono le più indicate per lo stampaggio di una calotta in quanto si mantengono sempre molto resistenti ed elastiche e si rompono molto difficilmente, anche se sottoposte a forze elevate.

Il processo di formazione avviene all'interno di una camera pulita ed è interamente realizzato a mano stendendo e disponendo con precisione i fogli di *prepreg* già pronti negli stampi, facendo attenzione a fare aderire perfettamente alle forme dello stampo. Terminata questa operazione vengono sigillati all'interno di un sacco a vuoto, collegato, per mezzo di bocchette, a delle pompe aspiranti che creano appunto il vuoto. Questa operazione è necessaria per espellere la resina in eccesso e l'aria intrappolata al suo interno sotto forma di bolle, così facendo gli strati di *prepreg* aderiscono perfettamente tra di loro [44].

Successivamente il manufatto, liberato dal sacco, viene chiuso all'interno di un altoforno che completa la polimerizzazione dei *prepreg* portando la temperatura a quella di reticolazione della resina utilizzata. Al termine di queste operazioni il casco viene estratto dallo stampo e la calotta

in fibre composite deve essere rifinita tagliando il materiale in eccesso che si genera utilizzando lo stampo ed il taglio può avvenire manualmente oppure grazie all'utilizzo di lame ad acqua robotizzate [49].



Figura 3.22: Estrazione di un casco in composito dal suo stampo, si nota la parte in eccesso che successivamente verrà rimossa [48].

Alcune aziende produttrici di caschi da moto si ispirano ai caschi realizzati per la Formula 1 ed integrano anche nei loro prodotti il sistema “PB-SNC”, dove “PB” è l’acronimo di “Peripherally Belted” e consiste in una zona di rinforzo nelle aree maggiormente colpite durante gli impatti ovvero la fascia sopra alla visiera, mentre “SNC” significa “Structural Net Composite” ed è una rete in materiale di rinforzo strutturale annegata tra gli strati di fibra di carbonio che migliora l’integrità dell’involucro e la gestione dell’impatto. Questo sistema consente di rimuovere peso dalla parte superiore della calotta, riducendo quindi il peso complessivo del casco ed abbassa il centro di gravità, con conseguente miglioramento dell’equilibrio e minore affaticamento per un maggiore comfort del pilota [25].

Le calotte realizzate con questi materiali sono molto più resistenti, dure e leggere rispetto a quelle realizzate con polimeri termoplastici e per questo motivo avranno bisogno di uno strato meno spesso di rivestimento interno che si traduce in una generale diminuzione di peso e dimensioni del casco finito.

3.3.3 EPS o polistirene espanso

Il polistirene è un polimero termoplastico dalla struttura lineare derivante dallo stirene. A temperatura ambiente è un solido vetroso; al di sopra della sua temperatura di transizione vetrosa, circa 100 °C, acquisisce plasticità ed è in grado di fluire; comincia a decomporsi alla temperatura di 270 °C. È noto per le sue caratteristiche isolanti ed infatti nei caschi viene utilizzato per formare i rivestimenti interni

Nella sua forma espansa si presenta come una schiuma bianca (ma può anche essere colorato per ragioni estetiche) e molto leggera, infatti la sua densità varia tra 20 kg/m³ e 50 kg/m³. La densità nella sua funzione di protezione dagli urti gioca un ruolo fondamentale perché se risulta essere troppo alta, il rivestimento interno sarà troppo duro e quindi assorbirà la forza d'impatto meno uniformemente.

Il polistirene espanso si ottiene immergendo in acqua granuli di polistirene e aggiungendo una quantità variabile dal 2 all'8% del totale di pentano, che essendo insolubile in acqua viene fatto diffondere nei granuli tramite un'azione di compressione. Grazie a questo procedimento i granuli possono essere stoccati per qualche mese prima di subire l'espansione.

L'espansione vera e propria crea una schiuma di polistirene iniettando nei granuli vapore acqueo alla temperatura di circa 120 - 130 °C che ne provoca il rammollimento ed il successivo rigonfiamento dovuto all'ebollizione del pentano in essi contenuto. In seguito vengono inseriti nello stampo che darà la forma finale al componente, qui vengono pressati e sinterizzati, ovvero trasformati in un solido unico ed indivisibile [50]. I granuli durante questo procedimento non si espandono tutti allo stesso modo e di conseguenza non avranno tutti la stessa densità, tuttavia ciò non risulta essere un problema, infatti i rivestimenti interni dei caschi solitamente non presentano una distribuzione uniforme della densità e questo avviene per far sì che essi svolgano al meglio il compito di assorbire l'energia dell'urto. Di seguito sono elencate le zone in cui è necessario avere una densità maggiore o minore:

- zona anteriore: la densità ottimale è di 50 kg/m³ poiché in questa zona l'area che deve assorbire l'urto è piccola e pertanto una fodera più dura risulta più adeguata per prevenire il danneggiamento irreversibile del rivestimento;
- zona superiore: la densità ottimale è di 28/34 kg/m³ poiché qui l'area che deve assorbire l'energia è molto estesa;
- zona laterale e posteriore: la densità ottimale è di 38 kg/m³ poiché in queste due zone l'area è mediamente estesa rispetto alle altre due [51].



Figura 3.23: Rivestimenti interni dei caschi realizzati in EPS [49].



Figura 3.24: Stampo utilizzato per la realizzazione dei rivestimenti interni in EPS [49].

Negli ultimi anni si stanno sviluppando nuovi materiali che possano andare a sostituire il polistirene espanso, migliorando sempre più l'assorbimento degli urti dei caschi. È questo il caso di un materiale denominato Koroyd®, realizzato saldando termicamente insieme piccoli tubi in copolimeri a bassa densità, ognuno dei quali è formato a sua volta da due cilindri concentrici; quando il casco subisce un urto essi si deformano e si rompono, assorbendo l'energia d'impatto, che immagazzinano per poi rilasciarla gradualmente nel tempo. Si ritiene che possa essere almeno del 30% più efficiente dell'EPS.

3.3.4 Poliuretano

Il poliuretano è un polimero la cui catena è costituita da legami uretanici ottenuto tramite reazione chimica da parte di due agenti, di-isocianato e poliolo; la presenza di catalizzatori permette di aumentare la velocità della reazione e quella di altri additivi, come ad esempio i tensioattivi nel caso di poliuretani espansi, di abbassare la tensione superficiale e quindi favorire la formazione di una schiuma lavorabile.

Nei caschi viene utilizzato nella sua forma espansa flessibile per realizzare la fodera interna, grazie alle sue innumerevoli caratteristiche ottimali per questo tipo di componente. Esso infatti si presenta come quasi idrorepellente ed è permeabile al vapore permettendo la traspirazione, di conseguenza non è soggetto alla formazione di umidità; queste due caratteristiche lo rendono perfetto per gli interni di un casco poiché permettono la corretta gestione del sudore dell'occupante e non creano umidità; inoltre ha una grande stabilità di dimensione ovvero se si deforma, riacquista in poco tempo le sue dimensioni iniziali, senza danneggiarsi [52].

3.3.5 Nylon

Il nylon è una famiglia particolare di poliammidi sintetiche alifatiche e vengono principalmente usati come fibra tessile.

È il principale materiale con cui si realizzano i cinturini di sicurezza dei caschi.

3.4 Materiali assorbitori di energia

La principale funzione dei caschi da motocicletta, come è stato esposto nei capitoli precedenti, è quella di proteggere il cranio dell'utilizzatore dagli urti e impatti ad alta velocità. Per fare ciò i caschi devono assorbire e dissipare al meglio l'energia dell'urto per limitare il più possibile l'entità del danno sul cervello, che, se il rivestimento protettivo del casco è ben progettato in termini di spessore e correttezza del materiale, non vedrebbe mai una forza superiore a quella di schiacciamento della schiuma.

Per questo motivo il rivestimento interno dei caschi, componente preposto a questa funzione, viene realizzato con materiali denominati "assorbitori di energia" e cioè materiali che hanno la specifica capacità di assorbire l'energia dell'urto e limitare il numero e l'entità dei rimbalzi. Per poter essere considerato tale un materiale deve in primo luogo essere poroso, la porosità infatti permette di assorbire l'energia convertendo l'energia cinetica in altre forme attraverso la creazione di superfici di frattura, deformazioni plastiche o viscoelastiche delle pareti delle celle che formano la sua struttura, per questo motivo vengono utilizzati "solidi cellulari" come ad esempio le schiume o le strutture ad *honeycomb*.

Le proprietà meccaniche delle schiume sono legate principalmente alla loro complessa microstruttura e alle proprietà del materiale base di cui sono formate, in particolare dipendono da quattro fondamentali caratteristiche:

1. la **densità relativa**, ovvero il rapporto tra la densità finale della schiuma e quella del polimero solido, indica anche le quantità relative di solido e fluido presenti;
2. il **tipo di polimero** che costituisce la schiuma e il **tipo del fluido** contenuto all'interno delle celle;
3. la **morfologia** della struttura cellulare, ovvero il tipo di celle, loro dimensioni e la tipologia di connessione tra di loro;
4. l'**anisotropia** della schiuma, ovvero l'orientazione delle celle [53].

3.4.1 I solidi cellulari

Con il termine "solidi cellulari" si indica una categoria di materiali interamente formati da celle, ovvero delle unità ben riconoscibili e distinte tra loro, delimitate da soli spigoli (celle aperte) o anche da facce (celle chiuse). Sono materiali bifasici in cui la fase gassosa coesiste con quella solida, in particolare si creano quando un gas viene disperso uniformemente all'interno di un solido. La porosità di tali materiali è estremamente elevata infatti circa il 75 - 95% del volume totale è costituito da spazi vuoti e per questo motivo la densità finale della schiuma risulta sempre inferiore a quella del solido che forma la struttura preso singolarmente.

In natura questo tipo di struttura cellulare viene ripresa in molti ambiti diversi, ad esempio si può trovare nel tessuto osseo, nei coralli e nelle spugne.

Attualmente i solidi cellulari sono molto impiegati sia nell'industria manifatturiera che in quella strutturale poiché ottimizzano le caratteristiche meccaniche del materiale di cui sono composti,

minimizzandone il peso, il che li rende ottimi per applicazioni in cui esso gioca un ruolo a sfavore, come ad esempio nell'ambito aerospaziale o, come nel caso in esame, negli strumenti di protezione personale. Negli anni sono state perfezionate tecniche di realizzazione di schiume sia metalliche (solitamente alluminio) che polimeriche, tra cui ad esempio il polistirene e il poliuretano espansi (Figura 3.25) [54] [55].

Le celle, come accennato poco sopra, vengono suddivise in base alla loro struttura, possono essere infatti aperte o chiuse. La principale differenza tra le due tipologie è la presenza di una membrana che ricopre le celle chiuse, inesistente invece in quelle aperte che sono interconnesse tra di loro e semplicemente formate da spigoli (Figura 3.27).

In una schiuma a celle aperte il fluido viene espulso durante la compressione, mentre nelle schiume a celle chiuse la membrana impedisce al fluido di fuoriuscire comportando una sua ulteriore compressione che esso immagazzina come energia, la quale verrà poi recuperata una volta scaricata la schiuma [56].

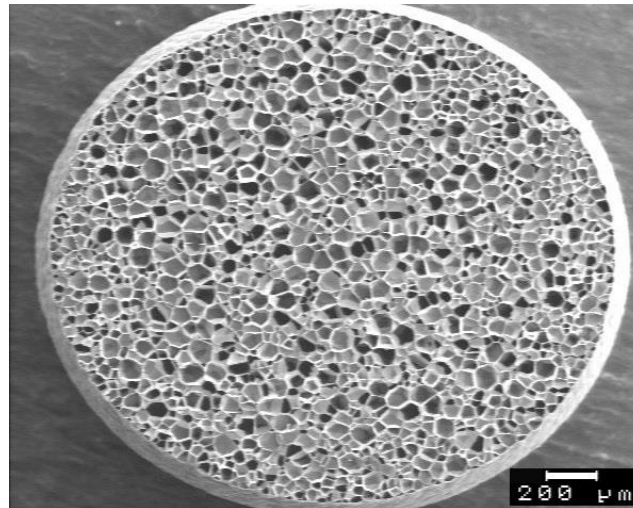


Figura 3.25: Polistirene espanso visto al microscopio [44].

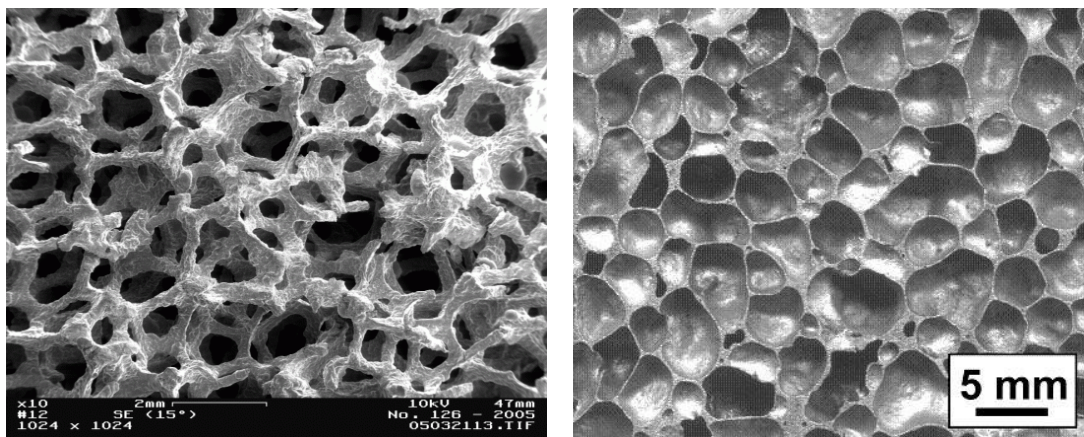


Figura 3.26: Differenze tra celle aperte (a sinistra) e celle chiuse (a destra) di alluminio mostrate al microscopio [54].

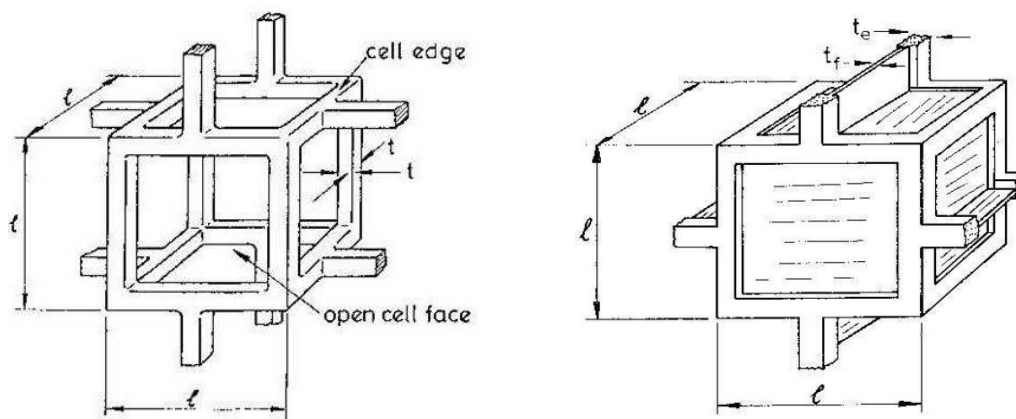


Figura 3.27: Schema di una cella aperta (a sinistra) e di una cella chiusa (a destra) [57].

3.4.2 Comportamento a compressione dei materiali assorbitori di energia

In Figura 3.28 sono riportati i grafici teorici di tensione/deformazione per due tipici materiali assorbitori di energia sottoposti a compressione uniassiale, di cui il primo è una schiuma elastomerica, mentre il secondo è una schiuma elasto-plastica.

Le differenze tra i due casi sono minime. In entrambi si nota inizialmente un comportamento elastico del materiale, in cui la tensione aumenta linearmente con la deformazione, la quale tuttavia è ancora recuperabile una volta scaricata la struttura.

Nella seconda fase invece è presente una zona a plateau in cui avviene lo schiacciamento del materiale ed il conseguente collasso delle celle. Il comportamento in questa regione dipende dal tipo di schiuma: può avvenire per deformazione plastica (schiuma elasto-plastica), buckling delle pareti delle celle (schiume elastomeriche) o rottura (schiume fragili); è caratterizzata da una deformazione continua a sollecitazione relativamente costante ed è la sezione del grafico in cui il materiale assorbe l'energia dell'urto. Maggiore è questa zona più il materiale riesce ad assorbire energia.

Al termine del plateau i grafici hanno un andamento crescente e si entra nella zona di densificazione, in cui il materiale è completamente schiacciato e collassato. Pertanto inizia a comportarsi come un materiale solido, ovvero incapace di assorbire altra energia e per questo motivo un ulteriore aumento del carico porta ad una sua compressione. Questa zona viene definita anche di "backup" poiché rappresenta l'ultima riserva di energia del materiale prima della sua completa rottura ed è quindi una zona di sicurezza nel caso in cui si verificano urti eccezionali che esulano dai carichi per cui il componente era stato progettato.

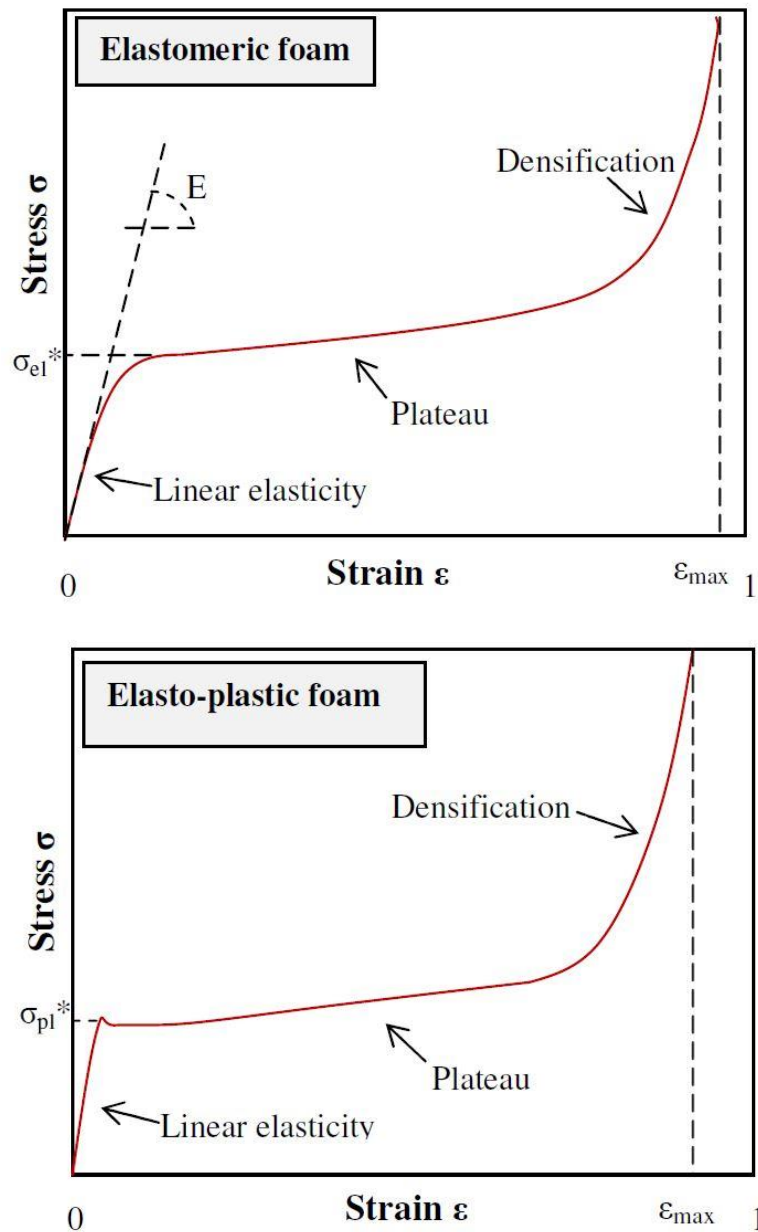


Figura 3.28: Grafici tensione/deformazione per due materiali assorbitori di energia, una schiuma elastomerica (sopra) e una elasto-plastica (sotto) [53].

L'energia assorbita per unità di volume (U) è calcolabile come l'area sottesa dalla curva nel grafico appena riportato:

$$U = \int_0^{\epsilon_{max}} \sigma d\epsilon$$

In Figura 3.29 invece è possibile vedere la differenza di comportamento tra un materiale solido elastico ed una schiuma. La linea tratteggiata rappresenta il limite massimo di tensione che il componente può sopportare e di conseguenza l'energia assorbita ottimale viene calcolata come l'area sottostante alla curva fino al punto di intersezione di quest'ultima con la massima sollecitazione consentita, in questo modo si nota la differenza di energia assorbita tra i due tipi di materiale: minima nel caso di materiale elastico e molto maggiore nel caso della schiuma.

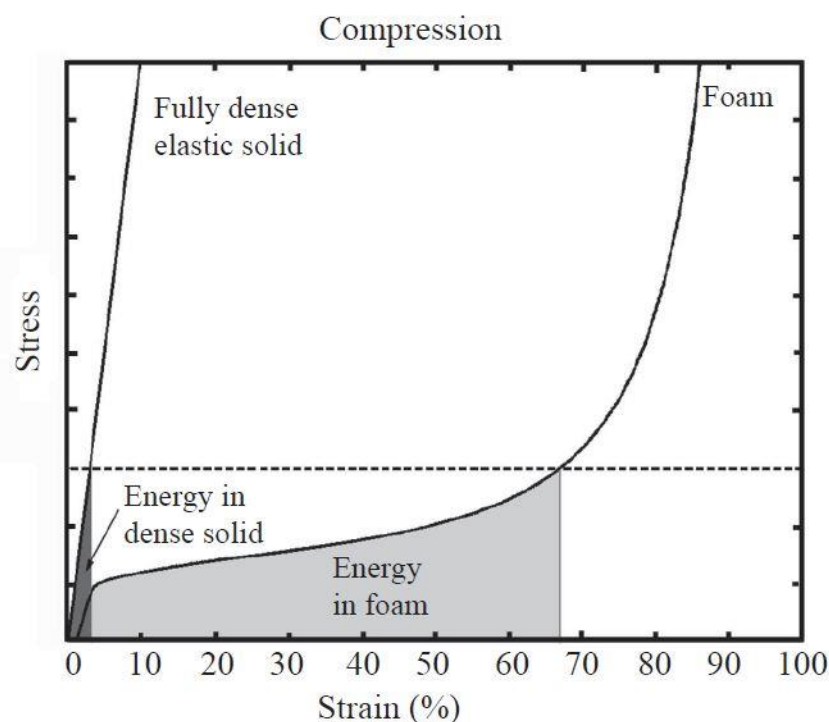


Figura 3.29: Confronto comportamento alla compressione di un materiale elastico e una schiuma [58].

Per quanto riguarda gli impatti che coinvolgono la testa e quindi il cervello i rimbalzi sono da evitare il più possibile poiché aumentano il rischio di lesioni cerebrali e possono comportare anche l'insorgere di traumi al collo. Per questo motivo è preferibile avere una regione elastica minore e più rigida in modo tale da limitare l'energia elastica accumulata, che a sua volta limita il rimbalzo.

Molte schiume polimeriche mostrano una dipendenza elevata dalla velocità di deformazione, il cui aumentare comporta sia l'aumento del modulo elastico, sia quello della tensione costante del plateau ed una diminuzione della deformazione. Ciò è dovuto a due contributi separati: il primo è derivato dalla sensibilità alla velocità di deformazione del materiale polimerico di base da cui viene prodotta la schiuma, la quale ne eredita le caratteristiche, di cui si è già parlato nei paragrafi precedenti, ovvero la viscosità per la maggior parte dei polimeri decresce all'aumentare della temperatura e della velocità di deformazione. Il secondo contributo invece è dato dal fluido contenuto all'interno delle celle della schiuma, infatti quando essa viene

compressa, il fluido (solitamente aria) si deforma o è costretto a fluire da una cella all'altra. In una schiuma a celle aperte, l'aria viene espulsa durante la compressione e ciò induce forze viscosse che dipendono anche dalla velocità di deformazione [53].

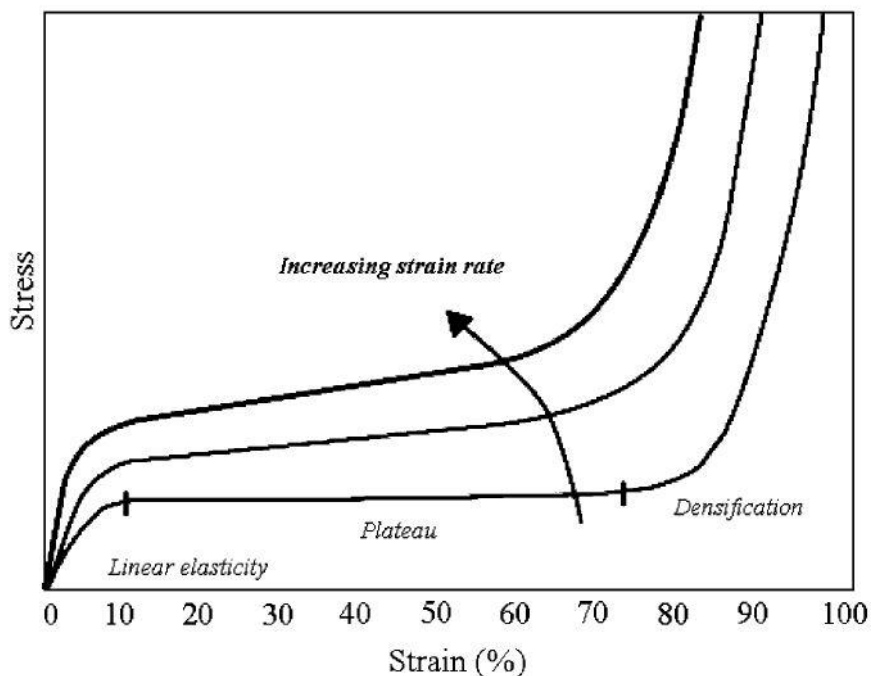


Figura 3.30: Effetto dell'aumento della velocità di deformazione sulla risposta del materiale [59].

3.4.3 Modelli analitici del comportamento a compressione

Il comportamento di questi materiali può essere descritto analiticamente tramite dei modelli che sono stati sviluppati negli anni da diversi studiosi, in particolare essi si suddividono in due categorie: fenomenologici e micro-meccanici. I primi mirano a trovare la migliore corrispondenza del comportamento meccanico sperimentale senza avere un rapporto diretto con la fisica del fenomeno, i secondi invece si basano sull'analisi dei meccanismi di deformazione della struttura del materiale.

3.4.3.1 Il modello di Gibson

Uno dei primi e più semplici modelli che vengono tuttora utilizzati è quello di Gibson ed è anche quello che si trova alla base del grafico tensione/deformazione rappresentato in Figura 3.28. Il modello di Gibson infatti è un modello micro-meccanico che suddivide il comportamento della deformazione in funzione della tensione dei materiali assorbitori di energia in tre zone: lineare elastica, plateau e densificazione. Esse sono descritte dalle seguenti equazioni:

- Zona lineare elastica:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{se} \quad \sigma \leq \sigma_{snervamento}$$

- Zona plateau:

$$\sigma = \sigma_{snervamento} \quad \text{se} \quad \varepsilon_{snervamento} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_D \left(1 - D^{-\frac{1}{m}}\right)$$

- Zona di densificazione:

$$\sigma = \sigma_{snervamento} \frac{1}{D} \left(\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_D - \varepsilon}\right)^m \quad \text{se} \quad \varepsilon > \varepsilon_D \left(1 - D^{-\frac{1}{m}}\right)$$

$$\varepsilon_D = 1 - C_D \rho$$

Dove σ ed ε sono rispettivamente la tensione e la deformazione ingegneristiche considerate positive nella compressione come in questo caso, E è il coefficiente angolare del tratto lineare nella zona elastica, $\sigma_{snervamento}$ è la tensione di snervamento del materiale, ε_D invece è un valore caratteristico della deformazione nella zona di densificazione che dipende da un parametro empirico C_D funzione della densità del materiale base della schiuma da determinare interpolando i dati sperimentali, mentre D ed m sono dei coefficienti. Tutti questi valori sono calcolabili tramite specifiche formule basate sulla micromeccanica della struttura del materiale.

Celle aperte

Per quanto riguarda le celle aperte la deformazione causa una flessione degli spigoli della cella e la variazione del modulo elastico E con la densità del materiale è modellata, sempre secondo Gibson, dalle seguenti relazioni:

$$\frac{E}{E_S} \approx \left(\frac{\rho}{\rho_S}\right)^2$$

Dove E e ρ sono rispettivamente il modulo elastico e la densità della schiuma, mentre E_S e ρ_S sono il modulo elastico e la densità del materiale base di cui è formata la schiuma.

Questa equazione indica che il modulo di Young, una volta dato il materiale base e quindi nota la sua densità, è dipendente soltanto dalla densità della schiuma e per questo motivo la formula soprastante può essere semplificata introducendo un coefficiente C_E che può essere valutato sia per via teorica sia interpolando i dati sperimentali:

$$E = C_E \rho^2$$

Sempre per le schiume con celle aperte Gibson ha modellato anche la variazione della tensione di collasso plastico della schiuma (ovvero la tensione per cui inizia la zona plateau) con la densità, tramite la seguente equazione:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{yS}} \approx 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^{3/2}$$

Dove σ_y e ρ sono rispettivamente la tensione di collasso plastico e la densità della schiuma, mentre σ_{yS} e ρ_S sono la tensione di snervamento e la densità del materiale base solido. Come per il modulo elastico anche qui si può scrivere l'equazione appena mostrata in modo più semplice, introducendo il coefficiente C_y :

$$\sigma_y = C_y \rho^{3/2}$$

Celle chiuse

Nelle celle chiuse invece, oltre alla flessione degli spigoli, si aggiunge la compressione del fluido contenuto all'interno delle celle, come già accennato in precedenza. La pressione di tale fluido aumenta a causa della sollecitazione a cui è sottoposto. Inoltre si verifica un ulteriore fenomeno dovuto alla deformazione a trazione delle facce delle celle chiuse, perpendicolarmente alla direzione di compressione.

In questo caso quindi si adotta un modello che comprenda tutti i contributi appena descritti:

$$\frac{E}{E_S} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^2 + C'_1 (1 - \phi) \frac{\rho}{\rho_S} + \frac{p_0 (1 - 2\nu)}{E_S (1 - \rho/\rho_S)}$$

Dove E , ρ e ν sono rispettivamente il modulo elastico, la densità e il coefficiente di Poisson equivalente della schiuma, mentre E_S e ρ_S sono il modulo elastico e la densità del materiale base di cui è formata la schiuma, ϕ è la frazione di spigoli delle celle e di conseguenza si identifica $(1 - \phi)$ come la frazione di superficie delle pareti delle celle; C_1 e C'_1 invece sono delle costanti determinate tramite parametri geometrici, i cui valori comunemente utilizzati valgono 1 per entrambi ricavati da vari risultati sperimentali ed infine p_0 indica la pressione del fluido all'interno delle celle chiuse.

Il primo addendo rappresenta il contributo dato dalla flessione degli spigoli delle celle, il secondo indica la trazione delle membrane delle celle e l'ultimo descrive il contributo del fluido.

Per schiume con celle regolari, il parametro ϕ può essere calcolato con precisione in base alla morfologia geometrica della struttura; per le schiume a cellule chiuse più comuni, Gibson fornisce un valore di ϕ compreso tra 0.6 e 0.8 a seconda del tipo di materiale. Invece per le schiume irregolari è molto più difficile da determinare analiticamente, quindi lo si approssima dalle immagini di microtomografia realizzate sul materiale stesso.

Se la pressione del fluido interna è prossima a quella dell'atmosfera esterna p_0/E_S sarà molto inferiore al rapporto E/E_S e di conseguenza il terzo termine dell'equazione può essere trascurato, così facendo in questa eventualità il modulo elastico effettivo della schiuma dipende soltanto da ϕ e dalla densità relativa.

La formula fornita da Gibson per la tensione di deformazione plastica che avviene nella zona plateau, nelle celle chiuse, è la seguente:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{yS}} = C_3 \left(\phi \frac{\rho}{\rho_S} \right)^{\frac{3}{2}} + C_4 (1 - \phi) \frac{\rho}{\rho_S} + \frac{p_0 - p_{atm}}{\sigma_{yS}}$$

Dove σ_y e ρ sono rispettivamente la tensione di collasso plastico e la densità della schiuma, mentre σ_{yS} e ρ_S sono la tensione di snervamento e la densità del materiale base solido, p_0 è la pressione del fluido all'interno delle celle e p_{atm} è la pressione atmosferica; C_3 e C_4 sono dei coefficienti a cui solitamente viene assegnato il valore di 0.3 e 0.4 derivandoli dai dati sperimentali [60] [60].

Dipendenza dalla velocità di deformazione

Come precedentemente detto il comportamento di una schiuma dipende anche dalla velocità di deformazione, che può essere attribuita a due contributi diversi. Il primo deriva dal solido polimerico, mentre il secondo contributo dal fluido nelle celle della schiuma.

Una relazione per la dipendenza dalla velocità di deformazione della resistenza allo snervamento di un polimero è data da Eyring:

$$\sigma_{yS} = \frac{kT}{v_{act}} + \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C_3} \right)$$

$$C_3(T) = \frac{\dot{\epsilon}_0}{2} \cdot e^{-\left(\frac{\Delta U}{kT}\right)}$$

Dove σ_{ys} è la tensione di snervamento del materiale base solido, k è la costante di Boltzmann, T è la temperatura attuale, mentre v_{act} è un cosiddetto volume di attivazione, $\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione e C_3 è un parametro dipendente dalla temperatura secondo l'equazione sopra indicata, in cui $\dot{\epsilon}_0$ è una proprietà del materiale e ΔU è l'energia di attivazione.

Sempre dai dati forniti da Gibson si nota che σ_{ys} aumenta linearmente con il logaritmo della velocità di deformazione, come mostrato dalla seguente equazione:

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys}^0 \left(1 - \frac{A \cdot T}{T_g} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \right) \right)$$

In cui σ_{ys}^0 è il valore della tensione di collasso plastico a 0 K, A è una proprietà del materiale e T_g è la temperatura di transizione vetrosa del polimero base [53].

3.4.3.2 Il modello di Rusch

Un altro modello che si utilizza è quello di Rusch, in questo caso si tratta di un modello fenomenologico, la cui formulazione è data dalla somma di due leggi di potenza:

$$\sigma = A \cdot \epsilon^m + B \cdot \epsilon^n \quad \text{con} \quad 0 < m < 1 \text{ e } 0 < n < \infty$$

Anche in questo caso, σ ed ϵ sono rispettivamente la tensione e la deformazione ingegneristiche considerate positive nella compressione. Il primo addendo modella la zona elastica e quella plateau, mentre il secondo si occupa di quella di densificazione, A e B invece sono dei parametri dipendenti dalla densità al contrario di m ed n .

Tuttavia questo modello presenta dei difetti poiché non riesce a descrivere al meglio la zona di densificazione dove, come conseguenza della compressione, i vuoti interni alla struttura scompaiono progressivamente ed il materiale tende a comportarsi come un materiale solido con modulo elastico crescente.

3.4.4 Differenze tra strutture *bending-dominated* e *stretch-dominated*

Per poter determinare se una struttura è *bending-dominated* o *stretch-dominated* è necessario ricorrere all'utilizzo del **Criterio di Maxwell**, una regola algebrica che, basandosi sulle caratteristiche geometriche e strutturali di una cella, permette di determinarne il tipo di comportamento.

Per le geometrie bidimensionali e tridimensionali le formule sono rispettivamente le seguenti:

$$M = b - 2j + 3$$

$$M = b - 3j + 6$$

Dove con b si indica il numero di strutture, mentre con j le articolazioni senza attrito.

Se $M < 0$ la struttura è un meccanismo, ovvero possiede uno o più gradi di libertà e, nelle direzioni in cui questi consentono spostamenti, non ha rigidità. Se le sue articolazioni però vengono bloccate, come avviene nei solidi cellulari, gli spigoli delle celle si piegano quando la struttura è sottoposta ad un carico (Figura 3.31.a). Di conseguenza queste strutture hanno un comportamento di tipo *bending-dominated*, ovvero dominato dalla flessione.

Se $M = 0$ la struttura non è più un meccanismo, se caricata esternamente i suoi componenti sopportano sollecitazioni di compressione e trazione e la struttura è di tipo *stretch-dominated*, ovvero dominata dall'allungamento. In questo caso bloccando le articolazioni non si ottengono significative variazioni nel comportamento, come invece avveniva per il caso precedente, poiché la struttura è molto più rigida (Figura 3.31.b).

Grazie a ciò è possibile affermare che le strutture *stretch-dominated* hanno un'efficienza strutturale molto più alta di quelle delle strutture *bending-dominated*.

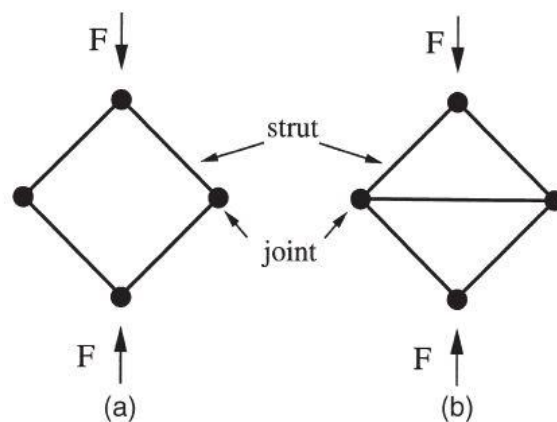


Figura 3.31: Differenze tra un meccanismo (a) e una struttura (b) [61].

In Figura 3.32 è possibile vedere diversi tipi di celle poliedriche studiati secondo il Criterio di Maxwell. Le geometrie che riportano la denominazione “no” non soddisfano il criterio e di conseguenza sono dei meccanismi ($M < 0$) e quindi strutture *bending-dominated* mentre le altre con la scritta “yes” lo soddisfano e pertanto sono strutture *stretch-dominated*.

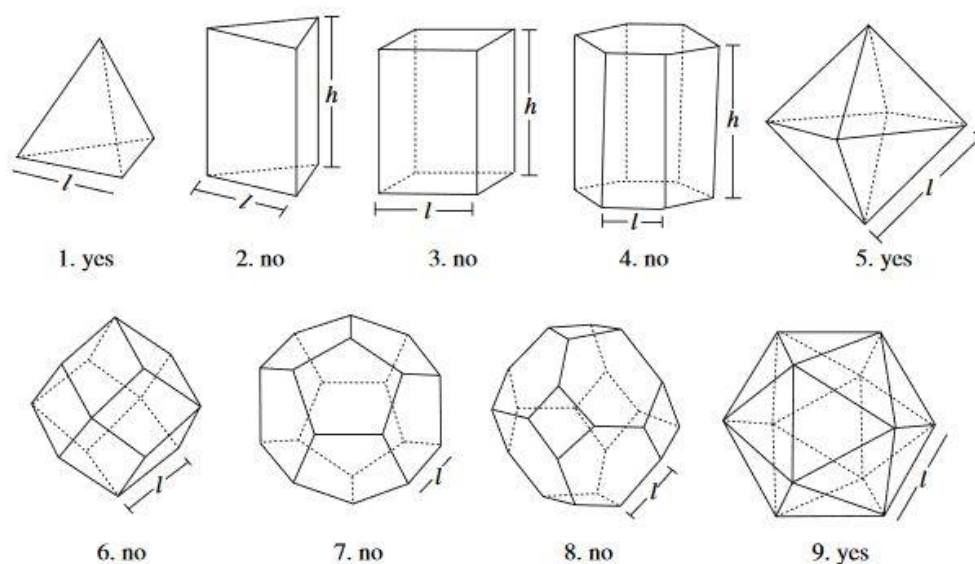


Figura 3.32: Tipi di celle poliedriche [61].

La deformazione della maggior parte delle schiume, sia a celle aperte sia a celle chiuse, è “*bending-dominated*”. Come conseguenza di questo comportamento si ha che la loro rigidità è molto inferiore a quella che invece possiedono le strutture “*stretch-dominated*”, che solitamente caratterizzano le strutture reticolari con celle triangolari. Per esempio una schiuma con densità relativa pari a 0.1 (ovvero in cui le pareti delle celle solide occupano il 10% del volume) è meno rigida di un fattore 10 di una struttura reticolare con la stessa densità relativa.

Le strutture *bending-dominated* sono connesse da articolazioni a bassa connettività. La peculiare forma di queste strutture causa la flessione degli spigoli delle celle quando sottoposte a dei carichi esterni. Contrariamente a quanto si possa pensare anche quando la struttura è formata da celle chiuse la deformazione è principalmente flessionale poiché tali membrane che teoricamente dovrebbero sopportare gli sforzi membranali, in realtà sono talmente sottili che, così come gli spigoli di quelle aperte, vanno in buckling per carichi molto bassi e il loro contributo alla rigidità della struttura è minimo.

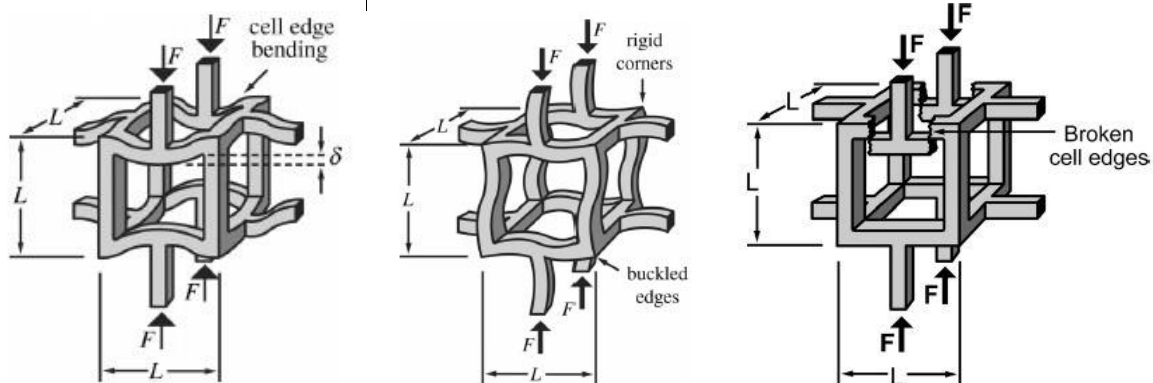


Figura 3.33: Deformazione flessionale, di buckling e di frattura per una cella aperta [62].

Il comportamento meccanico delle strutture *bending-dominated* è quello tipico dei materiali assorbitori di energia, infatti la curva tensione/deformazione presenta i tre range di comportamento mostrati nei capitoli precedenti, come si vede in Figura 3.34.

Le strutture *stretching-dominated* invece possiedono determinate caratteristiche geometriche che permettono loro di sopportare carichi di tensione e compressione. Ad esempio se tale materiale viene sottoposto ad un carico di trazione, non essendo un meccanismo, la struttura risponde con un suo allungamento elastico.

Questa differenza di comportamento è visibile anche nel grafico sforzo/deformazione, infatti inizialmente presenta una maggiore rigidezza e il tratto elastico ha un picco molto elevato, successivamente si assiste ad un *softening* in cui la resistenza del materiale cala molto in seguito a deformazioni plastiche o di buckling, per poi giungere anche in questo caso alla densificazione.

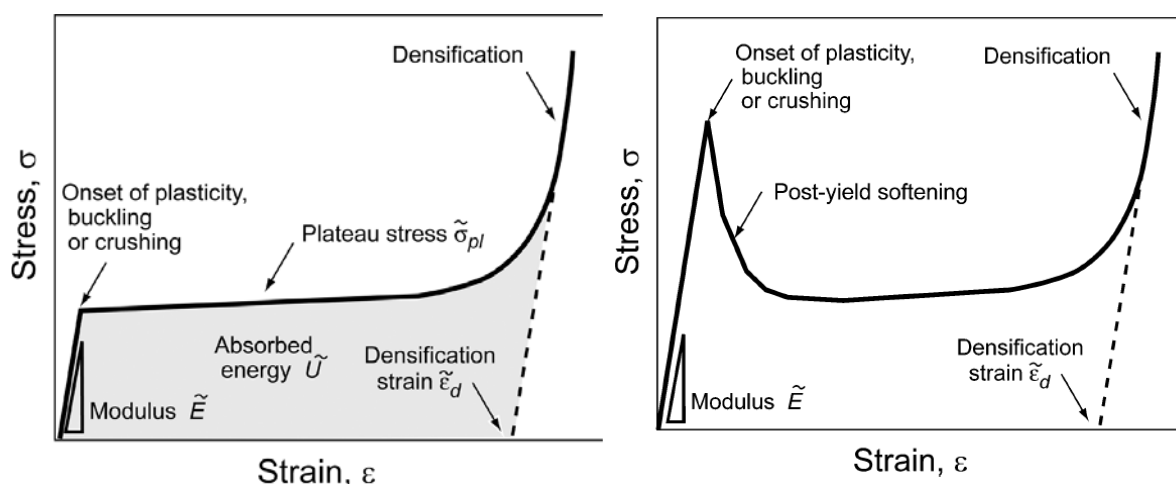


Figura 3.34: Curva sforzo/deformazione di una struttura *bending-dominated* (a sinistra) e di una *stretch-dominated* (a destra) [62].

Entrambe le tipologie di strutture nel punto di massimo della curva possono subire deformazione plastica, buckling o frattura, a seconda della tipologia di materiale di cui sono formate. In particolare le schiume duttili collassano per deformazione plastica (flessione o allungamento a seconda della tipologia di struttura), quelle elastomeriche per buckling elastico degli spigoli e quelle fragili per successive fratture degli spigoli.

Il modulo elastico e la tensione di snervamento perciò in una struttura *stretch-dominated* sono molto più elevati di quelli di una *bending-dominated* con la stessa densità relativa.

Per questi motivi la prima tipologia è adatta ad applicazioni in cui è richiesta una buona rigidità e un peso ridotto, tuttavia questo li rende invece non particolarmente adatti all'assorbimento dell'energia. Infatti, come è possibile vedere anche dalla curva in Figura 3.34, il plateau necessario per l'assorbimento dell'energia non è idoneo, poiché non è lungo e piatto come invece dovrebbe essere ed inoltre il picco del campo elastico è troppo elevato [62].

3.5 Strutture gerarchiche reticolari vs schiume

Fino ad adesso si è parlato di materiali assorbitori di energia come schiume polimeriche, tuttavia negli ultimi anni la ricerca si sta muovendo per cercare di realizzare altre tipologie innovative di materiali che possano andare a sostituire le schiume all'interno di questa categoria. In particolare si stanno diffondendo sempre più studi e test riguardanti le strutture gerarchiche reticolari realizzate grazie all'ausilio di stampanti 3D.

Una struttura gerarchica reticolare è un insieme intimamente connesso di celle, le quali possono avere geometrie uguali o diverse, che va a formare un reticolo. Lo scopo è quello di creare strutture resistenti capaci di sopportare carichi elevati utilizzando una minima quantità di materiale in modo tale da essere il più leggero possibile.

I materiali composti da strutture gerarchiche reticolari si differenziano dalle strutture reticolari impiegate nel campo dell'ingegneria strutturale per via delle dimensioni delle celle, infatti nel primo caso esse sono dell'ordine dei millimetri o micrometri e questo consente loro di poter essere considerate come un materiale vero e proprio e non come un insieme di sotto-strutture. Per questo motivo possono essere studiati come i materiali monolitici classici, facendo riferimento ad effettive proprietà meccaniche, che variano con la densità, l'aspect ratio, la forma e la geometria delle celle [62].

In realtà anche le schiume possono essere considerate strutture reticolari allo stesso modo di quelle appena esposte, ma la differenza tra di esse è principalmente dovuta alla forma, alla dimensione e alla direzione delle celle di cui sono composte.

Le schiume infatti presentano una struttura porosa irregolare, fortemente dipendente dal processo di realizzazione dal polimero che le caratterizza. La dimensione delle celle in una qualsiasi schiuma non è mai uniforme, ma anzi è distribuita staticamente con varianza molto elevata che non permette di definire una dimensione precisa delle celle. Per questo motivo infatti si parla di "dimensione caratteristica" che è data dalla media dei valori della distribuzione.

La disposizione delle celle dipende fortemente dal processo di formazione e accrescimento che le vede coinvolte durante la realizzazione della schiuma. In quasi tutte le schiume è possibile identificare una direzione preferenziale di accrescimento delle celle e questo fa sì che il materiale finale abbia caratteristiche anisotrope. L'anisotropia della schiuma è quantificabile tramite la seguente formula:

$$R = \frac{\overline{L_{max}}}{\overline{L_{min}}}$$

Ovvero come il rapporto tra la dimensione media massima e quella media minima riscontrabili all'interno della schiuma. Normalmente tale valore si attesta attorno a 1.3 [55].



Figura 3.35: Confronto tra un'immagine ricavata tramite microscopio di una schiuma in polistirene espanso dove è possibile vedere la randomicità nelle dimensioni delle celle e l'anisotropia della schiuma [55] e alcuni esempi di campioni di strutture reticolari [63].

Le strutture reticolari, al contrario, presentano una geometria perfetta e regolare poiché vengono realizzate ad hoc tramite stampanti 3D specializzate. In questo modo si ha il pieno controllo sulla geometria e posizione delle celle all'interno del materiale e così facendo si possono avere le caratteristiche meccaniche desiderate a seconda del tipo di applicazione.

Inoltre per i filamenti da utilizzare con la stampante si può spaziare tra una vasta gamma di materiali polimerici con le proprietà e caratteristiche meccaniche più disparate che il produttore fornisce insieme ai filamenti. In questo modo chi realizza materiali con questa tecnologia ha un'ampia scelta adattabile alle esigenze specifiche. Di conseguenza anche il grafico tensione/deformazione visto nei capitoli precedenti per le schiume avrà forme diverse, variabili a seconda delle caratteristiche scelte.

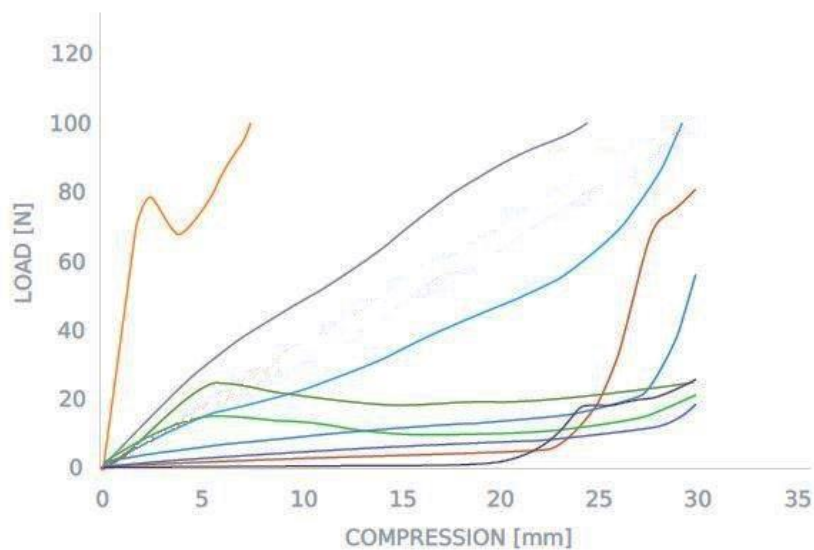


Figura 3.36: Curve tensione/deformazione per nove diverse strutture reticolari progettate ad hoc [64].

Capitolo 4

Modelli e analisi FEM

In questo elaborato sono state studiate quattro diverse strutture reticolari realizzate ognuna con tre differenti tipi di materiale.

Lo studio è stato svolto tramite simulazioni al calcolatore, impiegando il software che sfrutta gli elementi finiti LS-DYNA®, sviluppato dalla *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC). La scelta del programma da utilizzare è ricaduta su questo particolare pacchetto software poiché esso è specializzato nella simulazione di molti problemi complessi del mondo reale, svolgendo principalmente analisi agli elementi finiti non lineari, dinamiche e transitorie, in particolare è un ottimo strumento per simulare gli impatti, infatti viene adoperato nelle industrie automobilistica, aerospaziale e militare.

Sono state condotte prove di schiacciamento delle strutture in esame replicando un test di compressione svolto in laboratorio, composto da una piastra (denominata “*striker*”) che va ad impattare su di un’incudine (“*anvil*”), entrambe rappresentate come corpi rigidi indeformabili. Le strutture in esame invece sono realizzate sotto forma di provini cubici, formati dal materiale che si vuole testare. Si è scelto di studiare strutture reticolari per valutare il loro comportamento all’impatto e vedere le differenze tra la risposta fornita da strutture *bending-dominated* e *stretch-dominated*, inoltre sono state scelte geometrie con dimensione delle celle variabile lungo lo spessore del cubo per vedere se ciò permette di aumentare l’assorbimento di energia e quindi il livello di protezione del casco su cui sono inseriti, rispetto a quelle con le celle costanti.

Dalle simulazioni saranno ricavati i seguenti dati: l’aspetto della deformata finale, l’andamento della forza e dello spostamento lungo la direzione di sollecitazione nel tempo, il grafico forza/spostamento e l’energia assorbita che saranno poi confrontati con i valori sperimentali ottenuti dai test effettuati in laboratorio.

4.1 Geometria dei modelli

Come precedentemente detto sono stati realizzati quattro diversi tipi di strutture reticolari. La dimensione e la forma del provino però è la stessa in tutti i casi, ovvero un cubo di 40 mm per lato. I parametri che si è deciso di far variare sono la geometria e l’altezza delle celle che compongono la struttura. In ogni tipologia però il numero di celle è fisso ed infatti sono sempre presenti 5 righe e 5 colonne di celle in ogni faccia, per un totale di 125. Ad ognuna delle strutture è stato assegnato un nome: R_Pr, R_Tet, H_Pr e H_Tet.

Sono state scelte queste specifiche geometrie poiché rappresentano le due tipologie di strutture: infatti le geometrie denominate R_Pr e H_Pr sono *bending-dominated*, mentre R_Tet e H_Tet sono *stretch-dominated*.

Oltre alle strutture reticolari sono stati simulati anche l'incudine e lo *striker*.

4.1.1 Incudine

L'incudine è stata replicata come un semplice parallelepipedo, di dimensioni 160x100x15 mm, visibili in Figura 4.1.

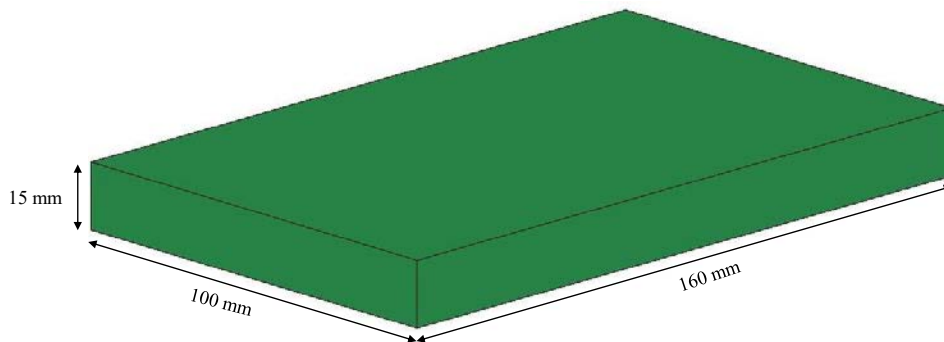


Figura 4.1: L'incudine con le sue dimensioni.

4.1.2 Striker

Lo *striker* invece è stato riprodotto come un cilindro di spessore 10 mm e diametro 60 mm, come mostrato in Figura 4.2.

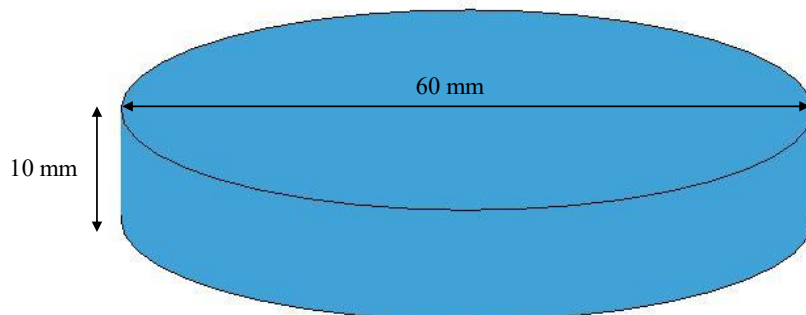


Figura 4.2: Lo *striker* con le sue dimensioni.

4.1.3 R_Pr

Questa struttura è la più semplice e regolare, il cubo è suddiviso in celle tutte uguali tra di loro, essendo cubiche anch'esse, ognuna delle quali ha i lati di 8 mm.

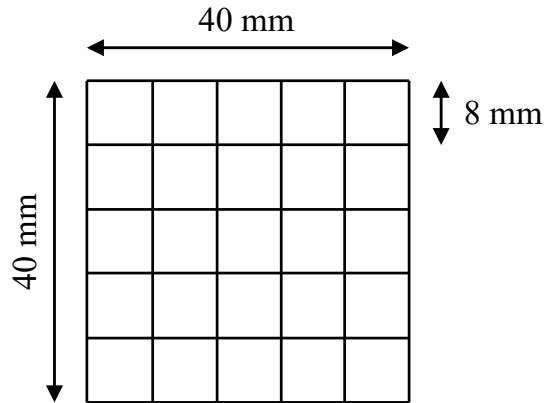


Figura 4.3: Schema del modello con struttura R_Pr.

4.1.4 R_Tet

Questa struttura è simile alla precedente, infatti è formata da cubetti di lato 8 mm, ma al contrario della precedente in ogni cella sono presenti anche le diagonali, che rendono la geometria interna del provino prismatica. La presenza di questi elementi diagonali rende la struttura più rigida.

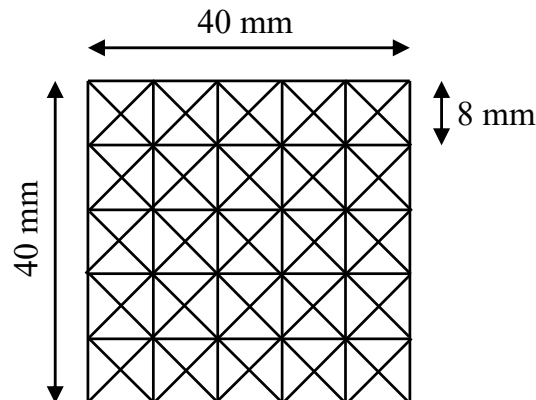


Figura 4.4: Schema del modello con struttura R_Tet.

4.1.5 H_Pr

Questa struttura non presenta più una geometria con celle cubiche, infatti esse possiedono sempre larghezza e profondità di 8 mm, ma l'altezza aumenta progressivamente dall'alto verso il basso. Nella Tabella 4.1 è possibile vedere la variazione dell'altezza delle celle in ogni lato

del cubo in base alla riga in cui si trovano, per un totale di 40 mm che, come precedentemente detto, è la dimensione del cubo.

Tabella 4.1: Variazione dell'altezza delle celle in base alla riga in cui sono disposte.

Riga	Altezza [mm]
1°	2.7
2°	5.3
3°	8
4°	10.7
5°	13.3

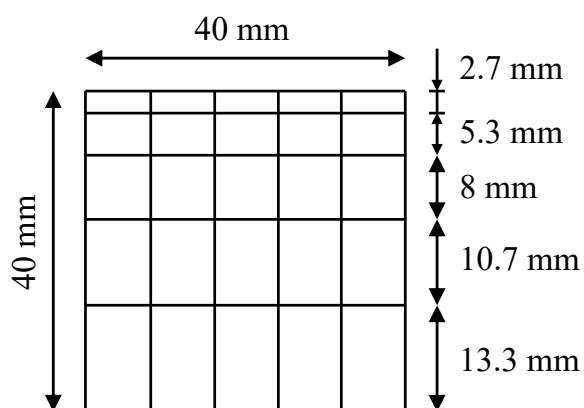


Figura 4.5: Schema del modello con struttura H_{Pr} .

4.1.6 H_{Tet}

Anche in questa struttura le celle non hanno tutte la stessa altezza, ma variano secondo le dimensioni mostrate in Tabella 4.1. In questo caso però all'interno di ognuna di esse sono presenti le diagonali, che come nel caso sopra indicato, formano una geometria prismatica e aumentano la rigidità.

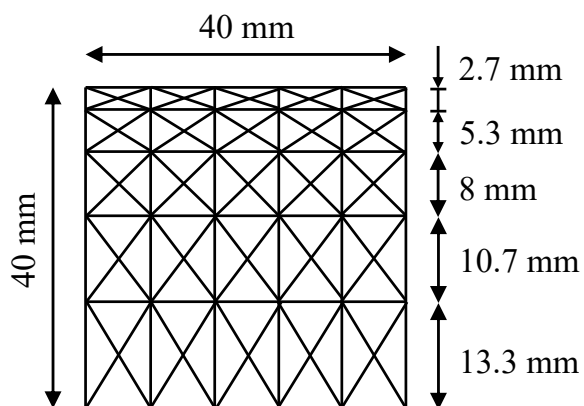


Figura 4.6: Schema del modello con struttura H_{Tet} .

4.2 Materiali utilizzati

Di seguito verranno illustrati i materiali impiegati per la realizzazione del modello, ovvero saranno mostrate le proprietà di tutti i materiali utilizzati e i modelli comportamentali scelti dalla libreria interna del software.

Per i due componenti rigidi sono stati utilizzati dei materiali metallici, mentre per la struttura reticolare, come già anticipato, sono stati impiegati tre diversi materiali polimerici che verranno illustrati nel dettaglio nei prossimi paragrafi.

4.2.1 Striker e incudine

Questi due componenti sono stati realizzati impostando il materiale con la tipologia n° 20 “*MAT_RIGID” poiché si vuole che essi si comportino come corpi rigidi dal momento che la loro rigidità relativa è molto più grande di quella della struttura reticolare.

Per i due componenti è stato scelto l'acciaio, tuttavia per lo *striker* è stata impostata una densità molto maggiore rispetto a quella dell'incudine nonostante essi siano entrambi realizzati con lo stesso materiale.

Tale scelta è dovuta al fatto che nel macchinario utilizzato per i test in laboratorio sopra allo *striker* sono presenti delle masse aggiuntive che servono per controllare l'energia dell'impatto, ma in questo modello si è preferito non replicarle fedelmente per evitare di complicarlo. La presenza di queste masse è stata quindi inglobata all'interno della densità del materiale che compone lo *striker*.

In particolare si è proceduto facendo in modo che lo *striker* avesse come peso totale (pari a 4.159 kg) il suo vero e proprio (0.2205 kg) sommato a quello delle masse aggiuntive (3.9385 kg).

Conoscendo la massa totale e il volume del cilindro, pari a $28.274 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$, è stato possibile calcolare la nuova densità fittizia da applicare allo *striker*.

$$\rho_{striker} = \frac{m_{totale}}{V_{striker}} = \frac{4.159 \text{ kg}}{28.274 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} = 1.471 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} = 1.471 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

In Tabella 4.2 è possibile vedere un riassunto delle proprietà meccaniche dei materiali impiegati per questi due componenti rigidi.

Tabella 4.2: Proprietà dei due materiali utilizzati per lo striker e l'incudine.

	Striker	Incudine
Densità ρ [kg/m³]	1.471·10 ⁵	7.80·10 ³
Modulo di Young E [GPa]	200	200
Modulo di Poisson ν	0.3	0.3
Massa [kg]	4.159	1.872

4.2.2 Struttura reticolare

Come già anticipato sono stati utilizzati tre diversi materiali polimerici per realizzare la struttura reticolare, in particolare sono materiali che vengono utilizzati per la realizzazione di oggetti con stampanti 3D, in quanto i provini veri e propri sono stati realizzati con una stampante di questo tipo.

I materiali sono: Durable, Elasto 95 e Flexible.

Tali materiali sono polimerici, di conseguenza hanno un comportamento elasto-plastico, fortemente dipendente dalla velocità di deformazione, per questo motivo è stato necessario inserirli all'interno del software come una specifica tipologia di materiale: n° 03 “*MAT_PLASTIC_KINEMATIC”, che sfrutta il modello comportamentale di Cowper–Symonds per calcolare la velocità di deformazione e i suoi effetti sulle altre proprietà del materiale.

Assieme ai modelli di Johnson-Cook e Zerilli-Armstrong, quello di Cowper–Symonds è uno dei modelli applicati più utilizzati nel campo della ricerca sperimentale. La principale differenza tra di essi consiste in come tengono conto degli effetti della velocità di deformazione.

Il modello di Cowper–Symonds, al contrario di quello di Johnson-Cook non tiene conto dell'influenza della temperatura nel comportamento tensione/deformazione del materiale. Esso consiste nel moltiplicare la tensione di snervamento per un determinato coefficiente (CS) che dipende dalla velocità di deformazione $\dot{\epsilon}$ e dalle costanti C e p :

$$CS = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}}$$

Con tale coefficiente la formula della tensione di snervamento (σ_y) diventa:

$$\sigma_y = \left(\sigma_0 + \beta \cdot \frac{E_t \cdot E}{E - E_t} \cdot \epsilon_{eff}^p\right) \cdot CS$$

Dove σ_0 è la tensione di snervamento di riferimento, E è il modulo di Young del materiale, E_t è il modulo tangenziale, β è il coefficiente di incrudimento, ε_{eff}^p è l'effettiva deformazione plastica e CS è il coefficiente di Cowper–Symonds.

Il problema principale legato ai parametri che considerano gli effetti della velocità di deformazione è che non possono essere semplicemente misurati, quindi vengono determinati empiricamente attraverso speciali processi sperimentali e di ottimizzazione. Nel caso in esame tali costanti sono state calcolate in modo tale da fittare al meglio i dati sperimentali disponibili [65].

Anche per alcune delle proprietà meccaniche dei tre materiali non è stato possibile recuperare i valori esatti in quanto il produttore dei materiali non fornisce tutti i dati necessari per lo sviluppo delle simulazioni in questione. Ed inoltre non sono disponibili neanche i risultati sperimentali relativi alle curve tensione/deformazione da cui è possibile estrapolare alcuni di essi.

Un esempio di ciò è dato dal modulo tangenziale (E_t) infatti, come si vede dalla seguente formula fornita dai manuali di LS-Dyna, per poter determinare tale parametro è necessario essere a conoscenza dei valori di tensione e deformazione reali (*true stress* e *true strain*):

$$E_t = \frac{E_h \cdot E}{E_h + E} \quad \text{con} \quad E_h = \frac{\text{true stress} - \sigma_y}{\text{true strain} - \text{true stress}} \cdot E$$

Di conseguenza è stato necessario calcolare, tramite i dati disponibili, in maniera tuttavia approssimativa i valori mancanti, facendo in modo che le curve risultanti ricalcassero il più possibile quelle sperimentali. Per questi motivi i modelli comportamentali implementati in queste simulazioni non saranno precisi al 100%, ma sarà presente un inevitabile errore che, ad ogni modo, è accettabile ed i risultati ottenuti possono comunque essere considerati affidabili.

Di seguito, in Tabella 4.3, sono riportati i valori dei materiali impiegati per la realizzazione della struttura reticolare.

Tabella 4.3: Proprietà dei tre materiali utilizzati per la struttura reticolare.

	Durable	Elasto 95	Flexible
Densità ρ [kg/m³]	$1.04 \cdot 10^3$	$1.22 \cdot 10^3$	$1.105 \cdot 10^3$
Modulo di Young E [GPa]	1.26	0.12	0.56
Modulo di Poisson ν	0.3	0.3	0.3
Tensione di snervamento σ_y [GPa]	$3.18 \cdot 10^{-2}$	$9.00 \cdot 10^{-3}$	$8.50 \cdot 10^{-3}$
Modulo tangenziale E_t [GPa]	$6.50 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-2}$	$5.60 \cdot 10^{-2}$
Coefficiente di incrudimento β	0	0	0
FS	5.5	5.5	5.5
C	$8.20 \cdot 10^{-2}$	$8.20 \cdot 10^{-2}$	$8.20 \cdot 10^{-2}$
p	4.51	4.51	4.51

Come indicato precedentemente “ β ” è il coefficiente di incrudimento, compreso tra 0 (cinematico) e 1 (isotropico). In questo caso esso vale 0 e di conseguenza l’incrudimento è cinematico.

Nell’incrudimento isotropico il centro della superficie di snervamento è fisso, ma il suo raggio è funzione della deformazione plastica. Invece nell’incrudimento cinematico è il raggio della superficie di snervamento ad essere fisso, mentre il centro trasla nella direzione della deformazione plastica [66].

“FS” invece indica l’effettiva deformazione plastica per gli elementi erodenti. “C” e “p” invece sono i parametri del modello di Cowper–Symonds precedentemente illustrati. I valori ad essi assegnati sono stati ricavati da precedenti studi eseguiti su un modello composto da Nylon [67]. Nonostante esso non sia il materiale costituente utilizzato in questo elaborato, sono comunque stati impostati i valori appartenenti ad esso poiché, come già detto in precedenza, non è stato possibile ricavarli sperimentalmente dalle strutture in questione dal momento che non si hanno a disposizione i dati necessari. Ad ogni modo non è sbagliato utilizzare dei valori simili poiché tutti i polimeri trattati sono termoplastici, di conseguenza hanno un comportamento simile.

Il **Durable** è un materiale polimerico impiegato come filamento per le stampanti 3D, realizzato dall’azienda Formlabs, di colore giallo trasparente. La sua composizione chimica è data da una miscela di esteri dell’acido metacrilico, un polimero termoplastico. Grazie al basso modulo, all’elevato allungamento e all’elevata resistenza agli urti, questo materiale può essere impiegato per realizzare parti in grado di piegarsi senza rompersi, con un’elevata resistenza alla deformazione e minimo attrito. Grazie a queste sue caratteristiche il Durable è una plastica resistente e flessibile, adatta per la prototipazione di parti in polipropilene, infatti le sue proprietà meccaniche sono molto simili a quelle di questo polimero.

Inoltre per ottenere proprietà meccaniche ottimali, i componenti realizzati con Durable al termine della stampa devono essere lavate e lasciate ad asciugare ed infine esposte ad un trattamento di post-curing [68].

L’**Elasto 95** è anch’esso un materiale che viene utilizzato per realizzare filamenti per stampanti 3D ed è formato da un polimero termoplastico, il poliuretano. È caratterizzato da un’elevata elasticità ma anche una buona robustezza, infatti il numero 95 che segue il nome del materiale sta ad indicare la sua durezza nella scala shore, in particolare l’Elasto rientra nella categoria A, quella delle plastiche semi-rigide [69].

Il **Flexible**, così come gli altri due materiali appena esposti, è un polimero utilizzabile come filamento per stampanti 3D di colore grigio chiaro, formato da una miscela di esteri dell’acido metacrilico. L’impiego tipico di questo materiale è per la realizzazione di parti in grado di piegarsi e comprimersi facilmente, con un ritorno alla forma iniziale senza deformazioni permanenti. Per questo motivo viene impiegato per aggiungere ergonomia a determinati componenti che ne necessitano. Tuttavia può rompersi se viene esposto a forze di allungamento eccessive [70].

Flexible e Durable sono adatte alla realizzazione di oggetti che richiedono un determinato grado di flessibilità, ma a differenza della prima, il Durable risulta più indicato quando occorre mantenere un buon livello di rigidità.

Per quanto riguarda la massa invece, ogni struttura ne presenta una diversa che varia in base al materiale utilizzato. In Tabella 4.4 sono riportati i valori di massa per ogni singolo caso.

Un diverso peso tra le strutture influisce sul tipo di comportamento che esse avranno nei confronti dello schiacciamento.

Tabella 4.4: Valori delle masse per ogni struttura reticolare in base al materiale costituente.

	Durable	Elasto 95	Flexible
$m_{H\ Pr}$ [kg]	$1.4115 \cdot 10^{-2}$	$1.6558 \cdot 10^{-2}$	$1.4997 \cdot 10^{-2}$
$m_{H\ Tet}$ [kg]	$3.7321 \cdot 10^{-2}$	$4.3780 \cdot 10^{-2}$	$3.9653 \cdot 10^{-2}$
$m_{R\ Pr}$ [kg]	$1.4115 \cdot 10^{-2}$	$1.6558 \cdot 10^{-2}$	$1.4997 \cdot 10^{-2}$
$m_{R\ Tet}$ [kg]	$3.6752 \cdot 10^{-2}$	$4.3113 \cdot 10^{-2}$	$3.9049 \cdot 10^{-2}$

Grazie alle masse (m) delle strutture fornite dal software e dal volume dei cubi ($V = 64000 \text{ mm}^3$) è stato possibile calcolare anche le densità delle strutture intese come componente (ρ_S) e da esse le densità relative ($\bar{\rho}$) come solitamente si fa per le schiume, utilizzando le seguenti formule:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_S}{\rho} \quad \text{con} \quad \rho_S = \frac{m}{V}$$

I valori risultanti da tali calcoli sono visibili in Tabella 4.5.

Tabella 4.5: Densità e densità relative percentuali delle quattro strutture per ognuno dei tre materiali.

	Durable	Elasto 95	Flexible
ρ_S_{HPr} [kg/m³]	$2.2054 \cdot 10^2$	$2.5872 \cdot 10^2$	$2.3433 \cdot 10^2$
ρ_S_{Htet} [kg/ m³]	$5.8314 \cdot 10^2$	$6.8407 \cdot 10^2$	$6.1959 \cdot 10^2$
ρ_S_{RPr} [kg/ m³]	$2.2055 \cdot 10^2$	$2.5872 \cdot 10^2$	$2.3433 \cdot 10^2$
ρ_S_{Rtet} [kg/ m³]	$5.7425 \cdot 10^2$	$6.7364 \cdot 10^2$	$6.1014 \cdot 10^2$
$\bar{\rho}_{HPr}$ %	21.21	24.88	22.53
$\bar{\rho}_{Htet}$ %	56.07	65.78	59.58
$\bar{\rho}_{RPr}$ %	21.21	24.88	22.53
$\bar{\rho}_{Rtet}$ %	55.22	64.77	58.67

I dati così ottenuti mostrano che i valori di densità delle strutture sono leggermente superiori a quelli che solitamente hanno i materiali leggeri, come le schiume, che vanno da 20 a 120 kg/m³ [71].

4.3 Modelli FEM in LS-Dyna

Nel software di simulazione che si occupa della modellazione FEM dei componenti, LS-PrePost, sono stati replicati gli elementi che formano l'apparato.

Lo *striker* e l'incudine sono stati impostati come corpi rigidi, poiché la loro massa e la loro rigidità sono di molto superiori a quelle della struttura reticolare ed inoltre la loro eventuale deformazione non è importante ai fini di questo elaborato.

I modelli con le celle semplici in tutto comprendono 7120 elementi di cui 5500 sono solidi tridimensionali e 1620 sono beam monodimensionali, per un totale di 8340 nodi. Mentre quelli con le celle prismatiche sono formati da 10120 elementi che, come nel caso precedente, comprendono 5500 elementi solidi tridimensionali e 4620 beam monodimensionali, per un totale di 10465 nodi.

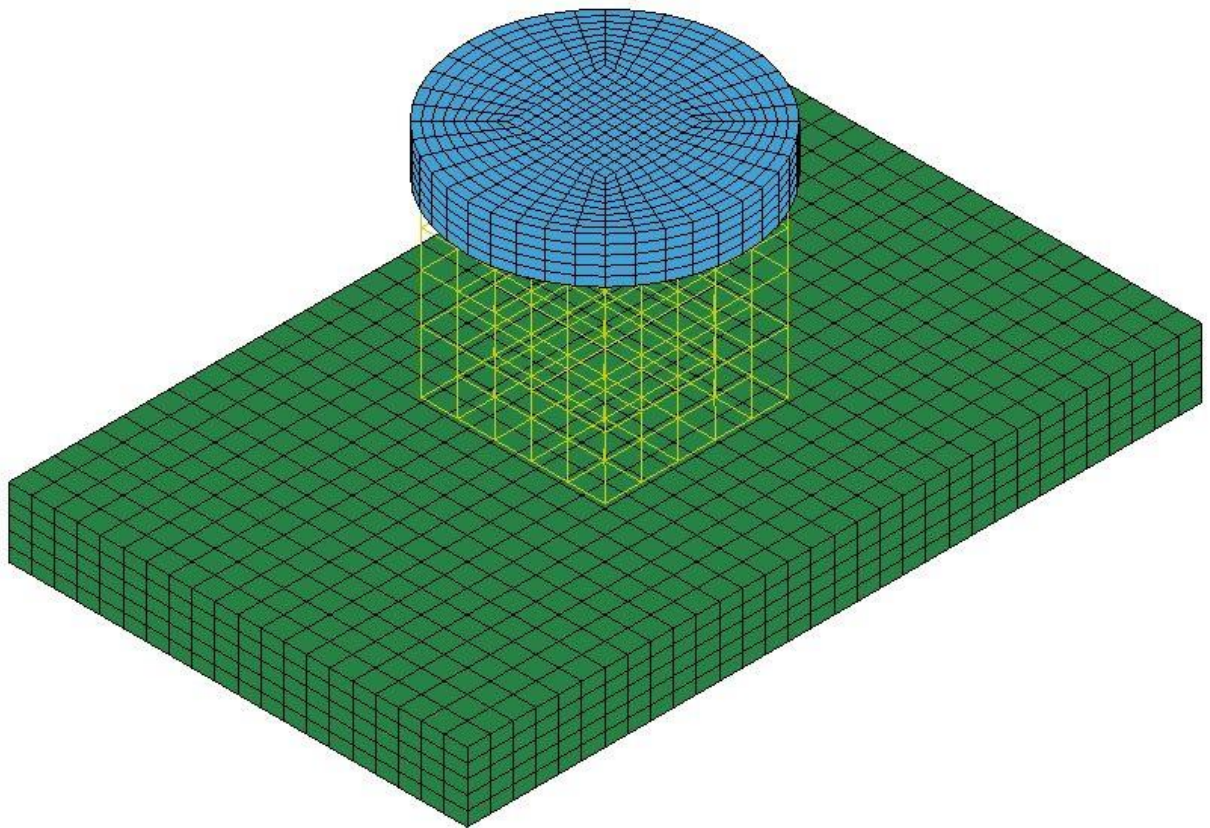


Figura 4.7: Assieme del modello FEM con i tre componenti.

4.3.1 Striker e incudine

Questi due componenti sono stati realizzati con 5500 elementi solidi tridimensionali a quattro nodi di tipo “solid” (*ELEMENT_SOLID) utilizzando le impostazioni di default, ovvero sono stati impostati come “constant stress solid element”.

4.3.2 Struttura reticolare gerarchica

La struttura reticolare è stata realizzata con 1620 elementi monodimensionali a due nodi di tipo “beam” tubolari (*ELEMENT_BEAM). In particolare è stato imposto il diametro esterno, pari a 2mm e il diametro interno pari a 0 in quanto la sezione deve essere piena e non tubolare, ad entrambi i nodi formanti l’elemento così da ottenere una sezione costante per tutta la sua lunghezza.

Tutti gli altri parametri, così come per gli elementi solidi, sono stati lasciati con le impostazioni di default del software.

In Figura 4.8 sono visibili tutte e quattro le strutture esaminate in questo elaborato, sono state rappresentate con la modalità visiva “beam prism” per mettere meglio in risalto la forma e la disposizione degli elementi beam all’interno della struttura.

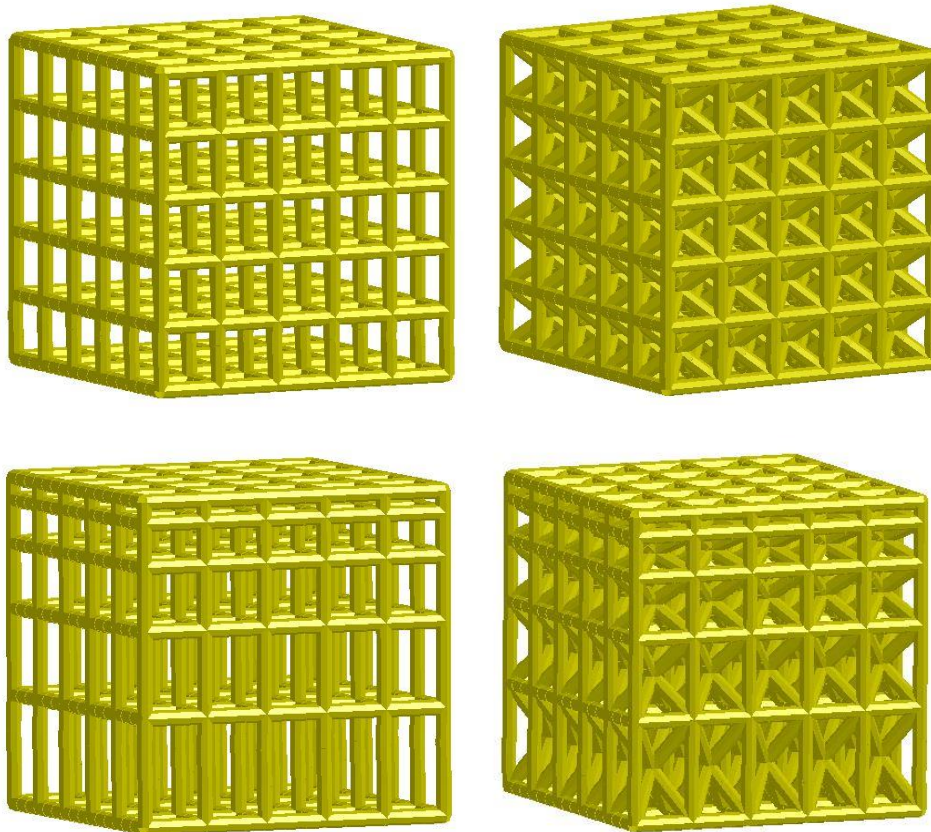


Figura 4.8: Vista in modalità “beam prism” di tutte e quattro le strutture esaminate.

4.4 Set up delle simulazioni

Come già esposto in precedenza le simulazioni sono state svolte cercando di riprodurre nel modo più fedele possibile i test svolti in laboratorio, per questo motivo è stato necessario imporre determinate condizioni iniziali e al contorno.

4.4.1 Condizioni al contorno: vincoli

Sono stati applicati due vincoli alla struttura, un incastro e un carrello.

Il vincolo di incastro, che vede bloccati i movimenti in tutti e sei i Gradi di Libertà (GdL) è stato applicato nei nodi alla base dell'incudine.

Il vincolo di appoggio invece blocca tutti i GdL tranne quello di traslazione lungo l'asse z che è la direzione in cui avviene la sollecitazione durante il test ed è stato applicato a tutti i nodi della mesh dello *striker*.

4.4.2 Condizioni al contorno: contatto

Un'altra condizione al contorno molto importante che è stata impostata all'interno dei modelli è il contatto tra i componenti, ovvero il contatto tra *striker*-struttura reticolare e tra struttura reticolare-incudine.

Questa condizione è necessaria per poter studiare come i componenti presenti nel modello interagiscono tra di loro, soprattutto durante l'impatto. Nel caso particolare è stato scelto il tipo di contatto: `"*CONTACT_AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE"`.

Nei test d'impatto come quello in esame possono verificarsi deformazioni molto grandi e di conseguenza può risultare complesso, se non impossibile, determinare a priori dove avverrà il contatto. Tali motivi rendono le opzioni di contatto automatico un'ottima soluzione in questi casi, in quanto questa tipologia di contatto non è orientata e perciò è in grado di rilevare la penetrazione proveniente da entrambi i lati di un elemento. Un altro pregio dei contatti automatici è che funzionano meglio di quelli normali nei casi in cui c'è una mesh disgiunta.

In questo caso il tipo di contatto avviene tra un elemento beam e la superficie di un elemento solido e perciò rientra in una categoria particolare non molto comune nell'ambito delle simulazioni da impatto. Quando il modello prevede un incontro tra un elemento beam e una piastra o solido il software rileva il contatto soltanto quando uno dei nodi dell'elemento beam entra in contatto con gli altri elementi. Di conseguenza il contatto non viene rilevato se è il segmento del beam ad entrare in contatto (Figura 4.9).

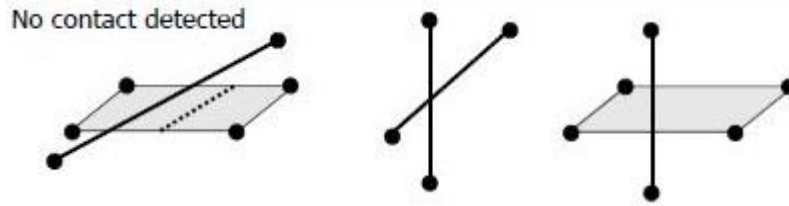


Figura 4.9: Esempi di contatto non rilevato [72].

La scelta della tipologia di contatto è ricaduta su quella mostrata poco sopra poiché è l'unica che permette di rilevare il contatto lungo tutta l'intera lunghezza dell'elemento beam.

Questo tipo di contatto viene definito "one-way" ovvero unidirezionale poiché consente di trasferire carichi di compressione dai nodi "slave" ai segmenti "master". I contatti one-way sono particolarmente appropriati nel caso in cui il lato master è impostato come corpo rigido. Il controllo della penetrazione avviene solo per i nodi slave. Questo implica che i nodi master non subiscono nessun controllo e di conseguenza c'è il rischio di penetrazione con le zone di mesh degli slave non soggette alla condizione al contorno di contatto, per ovviare a questo problema è consigliabile definire come componente slave quello con la mesh più raffinata, mentre come master quello con la mesh più grezza in modo tale da scongiurare la possibilità che si abbia penetrazione (Figura 4.10). Per questi motivi nei modelli realizzati la struttura reticolare composta da elementi beam è sempre stata identificata come lato slave, mentre i due componenti rigidi come master [73].

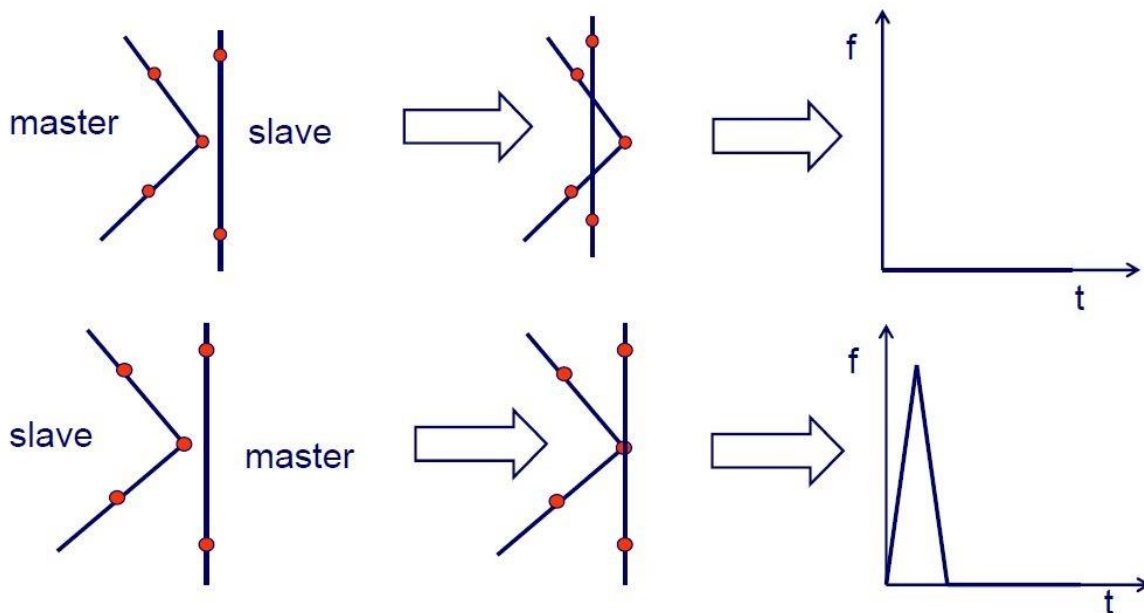


Figura 4.10: Differenze di contatto con un master con mesh raffinata e slave grezza e viceversa [72].

La maggior parte dei tipi di contatto, e quello in esame non fa differenza, si basano sul *penalty method*, applicabile sia ai corpi rigidi che a quelli deformabili. Tale metodo si basa su un

algoritmo che considera il contatto formato da molle elastiche in compressione disposte in modo tale da resistere alla penetrazione. La rigidità delle molle fittizie è denominata “*penalty stiffness*” (k) e determina l’entità della forza nei nodi di contatto, essa dipende dalle caratteristiche dell’elemento a cui è applicato il contatto: volume (V), area del segmento (A) e rigidità (K), moltiplicate per un coefficiente denominato “*penalty scale factor*” (α) che di default ha un valore pari a 0.1.

$$k = \frac{\alpha \cdot K \cdot A^2}{V}$$

La rigidità dell’elemento è calcolata sulla base della risposta del materiale alle sollecitazioni. È inoltre possibile impostare una profondità massima di penetrazione, oltre la quale la forza di contatto viene settata a 0 [72].

4.4.3 Condizioni iniziali

Come condizione iniziale è stata impostata la velocità di discesa dello striker.

La velocità è stata impostata tramite il comando “*INITIAL_VELOCITY”, dove sono state scelte l’entità, la direzione (che in questo caso è lungo l’asse z negativo) e i nodi a cui applicarla, ovvero tutti i nodi appartenenti alla mesh dello *striker*.

In primo luogo è stata impostata pari a 4.4 m/s poiché era la velocità impostata durante i test sperimentali svolti in laboratorio, di conseguenza i risultati così ottenuti dalle simulazioni possono essere confrontati con quelli sperimentali. Successivamente è stata fatta variare per vedere l’effetto che la velocità di impatto ha sulle strutture. In particolare è stato scelto di imporre velocità pari a 1, 2 e 7.5 m/s.

Oltre alla velocità è stato impostato un tempo massimo di durata della simulazione, pari a 30 ms per le simulazioni con velocità pari a 4.4 m/s poiché è il tempo di durata del test sperimentale. Così facendo è possibile avere un confronto il più possibile diretto.

Per le altre simulazioni invece il tempo massimo varia in base alla risposta che si ottiene, ovvero si è scelto di imporre un intervallo di tempo sufficiente perché si verifichi lo schiacciamento massimo della struttura reticolare. Se l’intervallo viene esteso oltre questo limite è possibile osservare anche il rimbalzo della struttura, tuttavia non è un comportamento che si vuole indagare e pertanto si è deciso di ometterlo. Ciò che avviene in seguito al massimo schiacciamento sarà mostrato solo tramite le deformate delle strutture per valutare se si verifica o no il ritorno alla forma iniziale.

Un'ulteriore condizione iniziale del modello è l'altezza iniziale dello *striker*, infatti la sua posizione all'istante 0 non è a contatto con la struttura, ma più in alto, a circa 1 mm di distanza da essa, come è possibile vedere in Figura 4.11.

Questo gap iniziale sarà visibile nei grafici ottenuti dalle simulazioni e pertanto dovrà essere rimosso per poter vedere soltanto la risposta del modello alla sollecitazione.

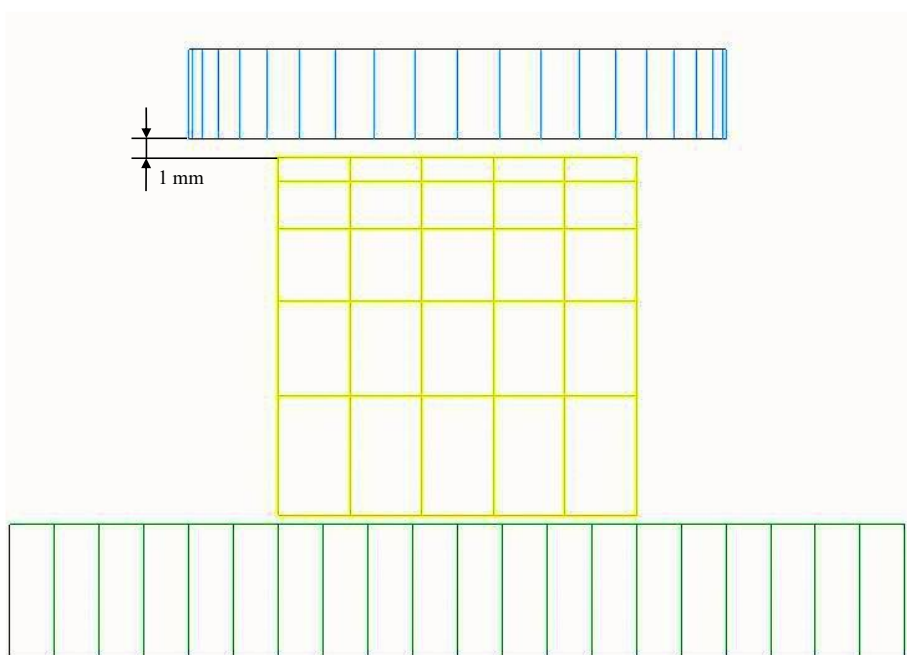


Figura 4.11: Posizione iniziale dello striker.

Capitolo 5

Risultati delle simulazioni

Come riportato precedentemente, in questo Capitolo verranno presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni svolte per questo elaborato. In particolare verranno esposti nel seguente ordine: come prima cosa verrà mostrato il confronto tra i risultati ottenuti dai test sperimentali in laboratorio e quelli delle simulazioni con cui si è validato il modello, successivamente saranno riportati i grafici per ognuna delle quattro strutture esaminate per ciascuno dei tre materiali scelti in risposta alle diverse velocità di impatto prestabilite, in seguito saranno presentate alcune delle deformate più significative. Inoltre saranno mostrati i valori di alcune importanti caratteristiche estrapolate dalle simulazioni in ognuno dei casi esaminati, come la massima reazione vincolare sopportata dalla struttura, il massimo schiacciamento verificato e l'energia assorbita.

5.1 Confronto risultati analisi FEM vs risultati sperimentali

In questo Paragrafo verranno esposti i confronti tra i risultati ottenuti dalle simulazioni FEM svolte in ambiente LS-Dyna con quelli registrati durante le prove sperimentali in laboratorio, sotto forma di grafici forza/tempo. È stato scelto di effettuare il confronto con questa particolare tipologia di grafico poiché permette un paragone più preciso e diretto dei valori ricavati in entrambi i casi. E proprio in nome di questo confronto istante per istante il time step delle simulazioni è stato impostato pari a 0.002 ms, così da avere lo stesso numero di valori delle prove sperimentali.

In ognuno dei grafici riportati si può notare che l'andamento di entrambe le curve, sperimentale e numerica, è simile: si vedono infatti lo stesso numero di picchi e ventri, tuttavia l'entità e la posizione di essi non è la stessa. Nella maggior parte dei casi infatti la curva ricavata dalle simulazioni presenta valori molto più elevati rispetto a quella sperimentale e la posizione dei massimi e minimi è spostata più avanti nel tempo.

Le cause di queste differenze possono essere ricercate, come detto nel Capitolo precedente, nelle proprietà meccaniche e visco-plastiche dei materiali inseriti all'interno del simulatore, le quali non rispecchiano propriamente quelle reali, ma sono soltanto un'approssimazione.

Un'altra causa che porta a queste differenze è data dalle inevitabili imperfezioni presenti nelle strutture reticolari reali dovute al processo produttivo che ne ha visto la realizzazione, al contrario del modello FEM che invece presenta caratteristiche ideali. Tali imperfezioni possono essere di tipo geometrico, ad esempio possono essere presenti vuoti o crepe nel materiale e i punti di giunzione tra una cella e l'altra e le dimensioni stesse delle celle e degli spigoli non saranno mai perfetti come invece accade nel modello agli elementi finiti; un'altra imperfezione

si può riscontrare nella distribuzione della massa che non sarà perfettamente omogenea. In Figura 5.1 infatti si nota come nei vertici delle celle ci sia una maggiore concentrazione di materiale, cosa che invece non è presente nei modelli numerici.

Un'altra differenza è data dal fatto che il software non tiene in considerazione l'eventualità che alcune parti della struttura possano rompersi e separarsi dal resto del componente, infatti non prevede fenomeni di rottura, ma soltanto di failure tramite buckling e flessione.

In Figura 5.1 e Figura 5.2 è possibile notare che sui modelli testati in laboratorio sono avvenuti fenomeni che hanno portato alla rottura di alcuni spigoli in determinate celle. L'asportazione di materiale si è verificata in particolare nelle celle con spigoli più lunghi e quindi più soggette al buckling, che in questo caso ha portato alla loro rottura in seguito al raggiungimento e superamento del carico critico limite che potevano sopportare. Questo comportamento è confermato anche dalle celle più piccole che infatti non hanno subito fratture. Inoltre la rottura degli spigoli è avvenuta in corrispondenza dei vertici delle celle, essendo essi dei punti fragili per la struttura, in cui si concentrano maggiormente gli sforzi.

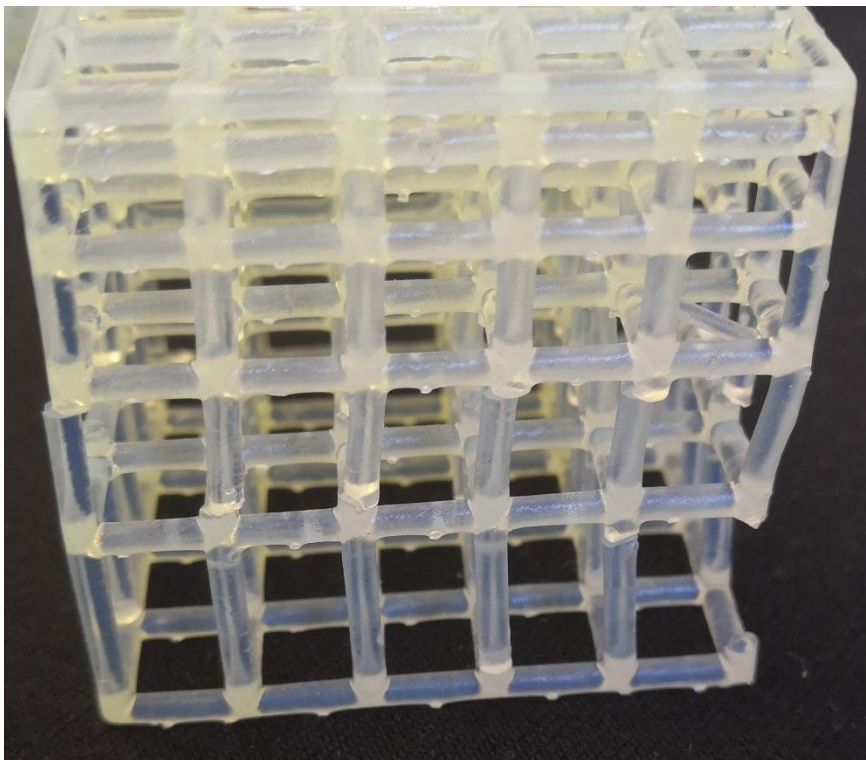


Figura 5.1: Una struttura reticolare dopo il test sperimentale di laboratorio.

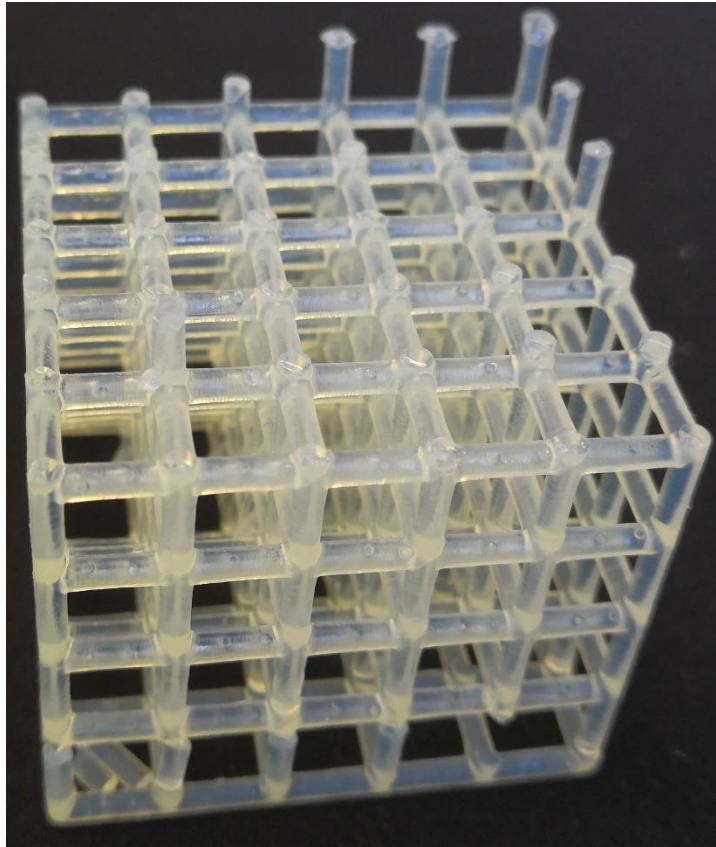


Figura 5.2: Altro esempio di struttura reticolare dopo i test di laboratorio.

Tuttavia sono presenti anche dei casi in cui i picchi e i ventri della curva sperimentale risultano maggiori di quella numerica, come ad esempio avviene in Figura 5.5, la motivazione di ciò può essere dovuta proprio al fatto che si verifica una parziale o completa rottura delle celle che invece nel modello numerico non avviene ma, in compenso, si traduce in una diminuzione della resistenza dovuta a fenomeni di buckling o flessione che non portano però a rottura.

Infine, come già anticipato, i picchi nelle curve numeriche si verificano più avanti nel tempo rispetto a quelle reali e ciò può essere dovuto al fatto che la struttura FEM è più resistente di quella reale per i motivi sopra citati, e perciò i fenomeni di instabilità si verificano ad istanti temporali maggiori.

Le deformazioni ottenute tramite le simulazioni saranno esposte nel dettaglio successivamente, nel Paragrafo 5.4.

5.1.1 Durable

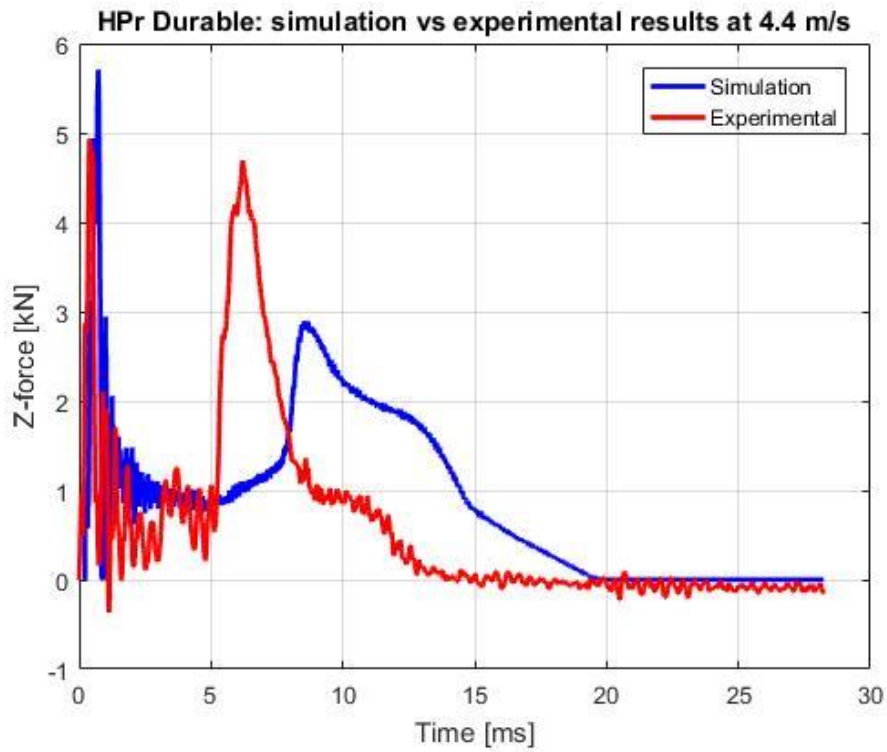


Figura 5.3: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Pr in Durable.

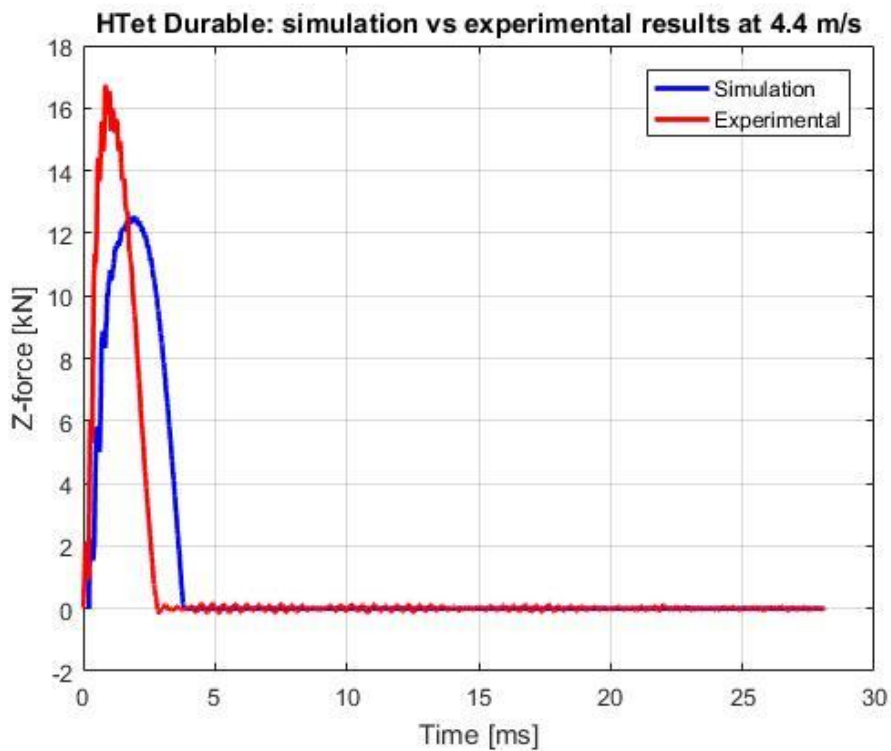


Figura 5.4: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_Tet in Durable.

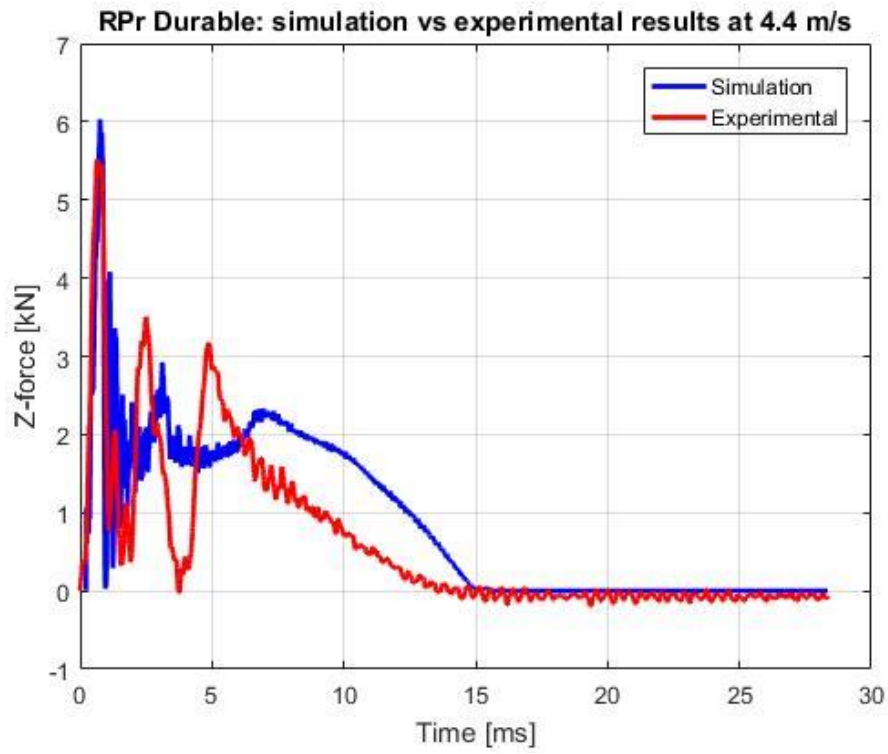


Figura 5.5: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Pr in Durable.

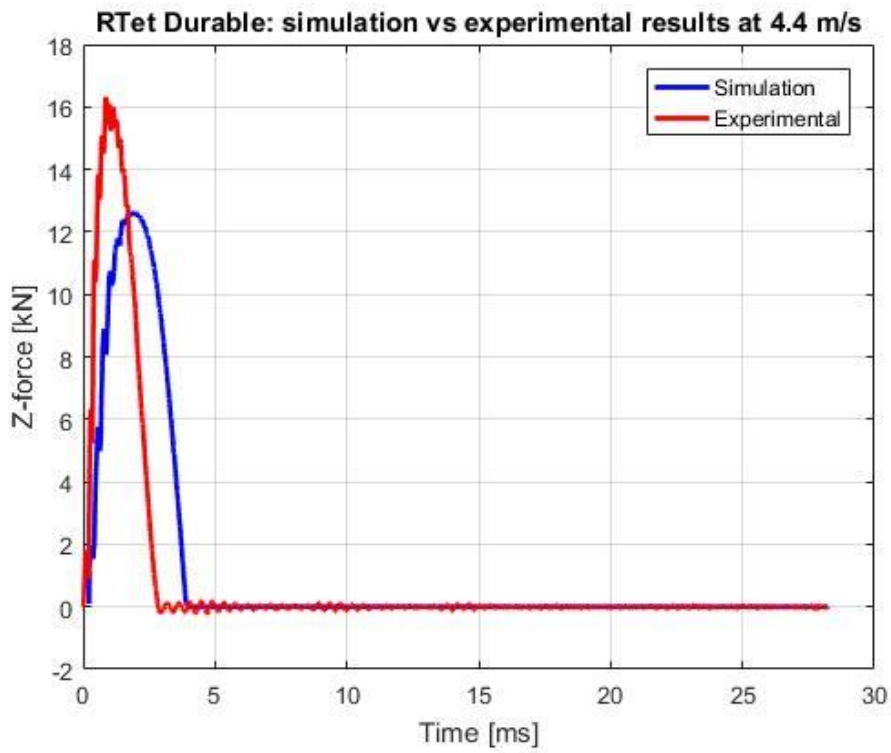


Figura 5.6: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Tet in Durable.

5.1.2 Elasto 95

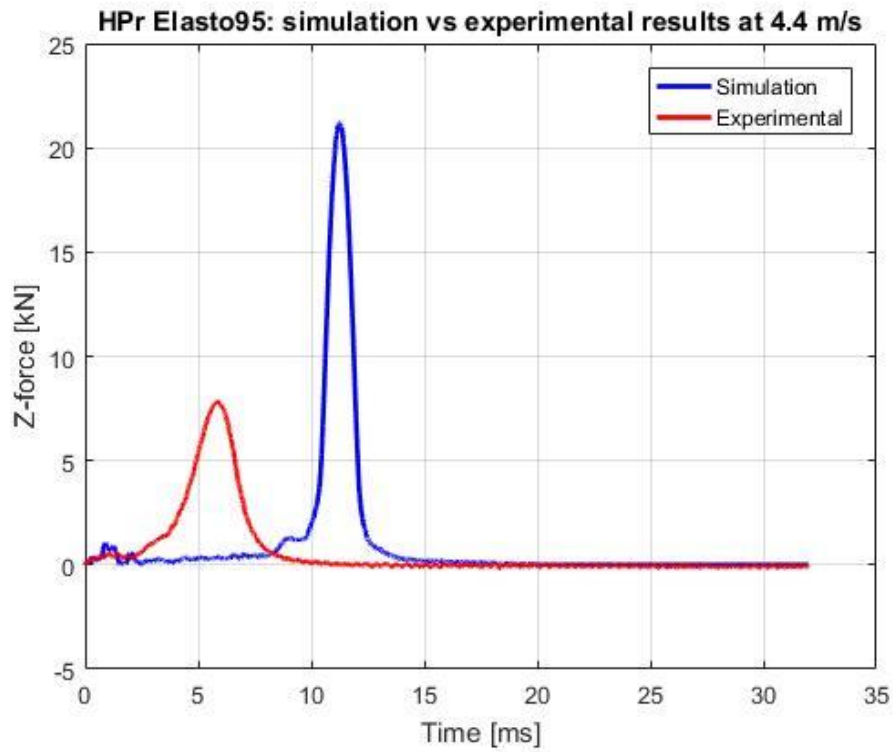


Figura 5.7: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_{Pr} in Elasto 95.

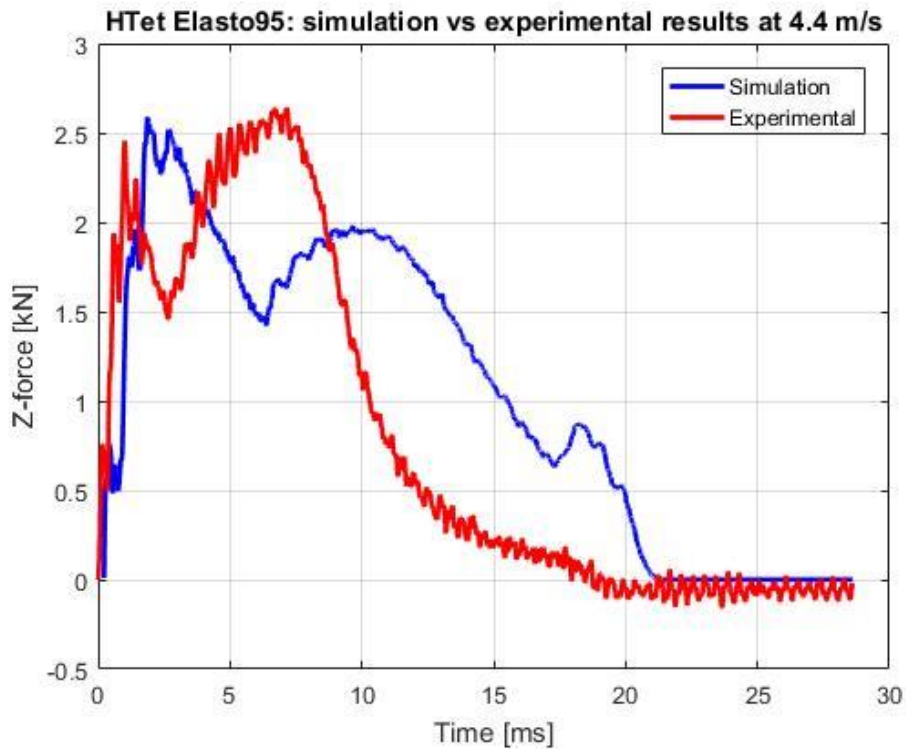


Figura 5.8: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_{Tet} in Elasto 95.

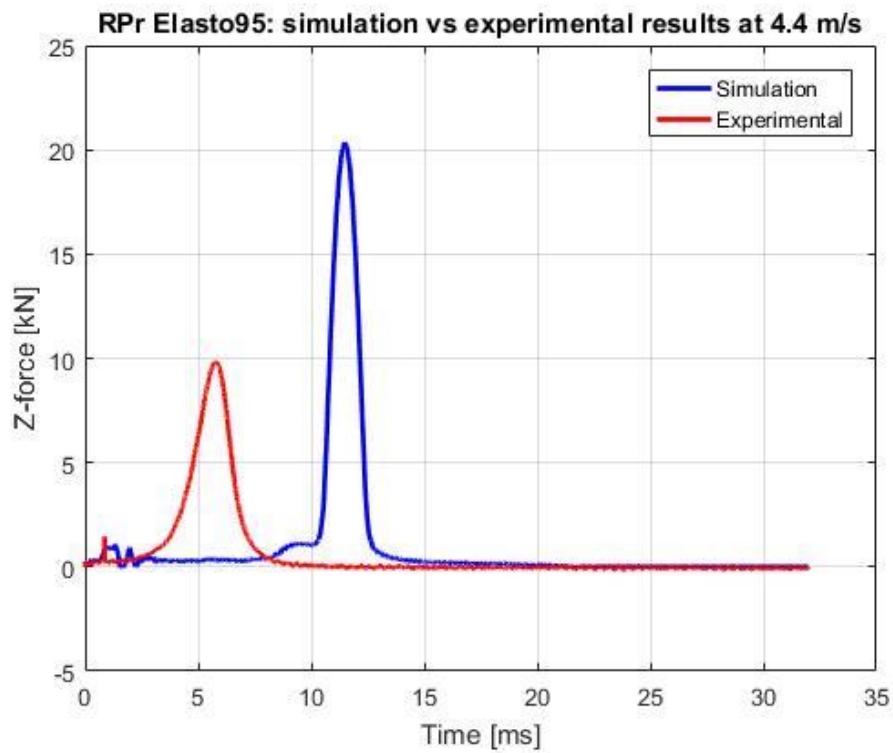


Figura 5.9: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Pr in Elasto 95.

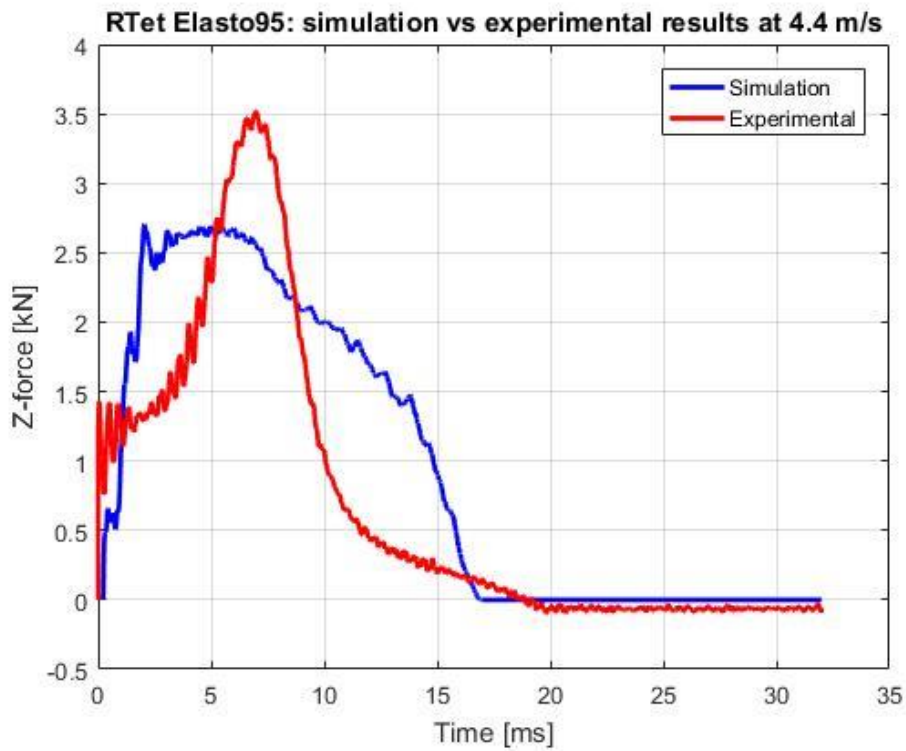


Figura 5.10: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Tet in Elasto 95.

5.1.3 Flexible

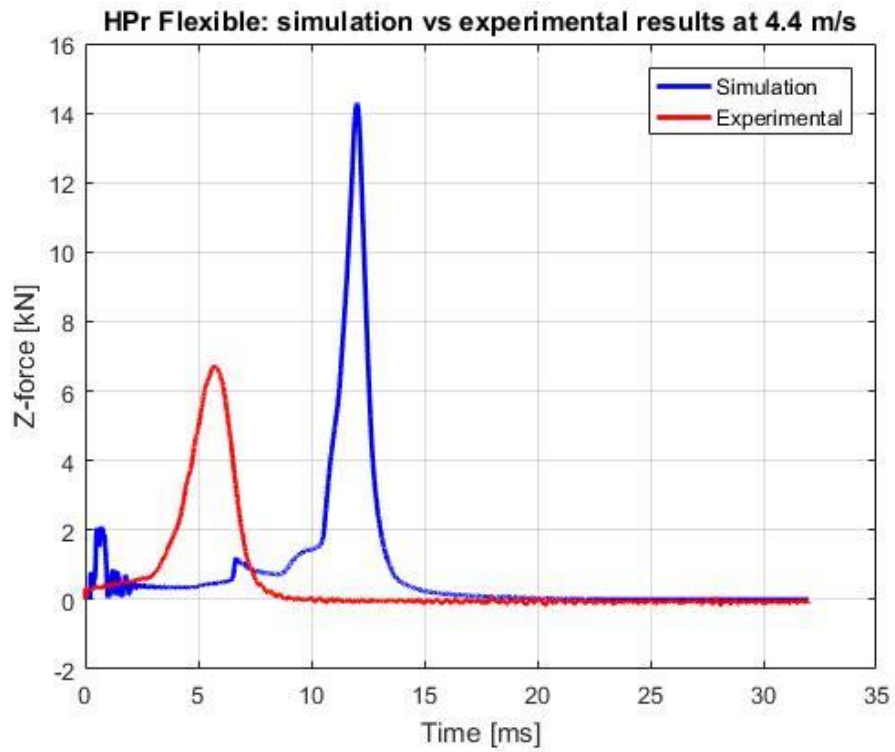


Figura 5.11: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_{Pr} in Flexible.

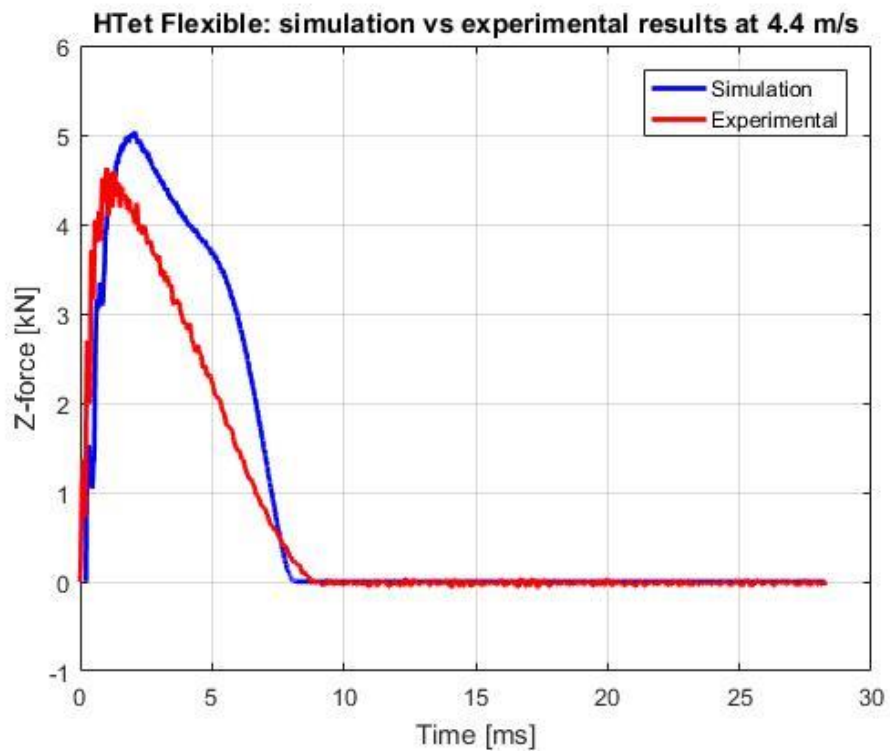


Figura 5.12: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura H_{Tet} in Flexible.

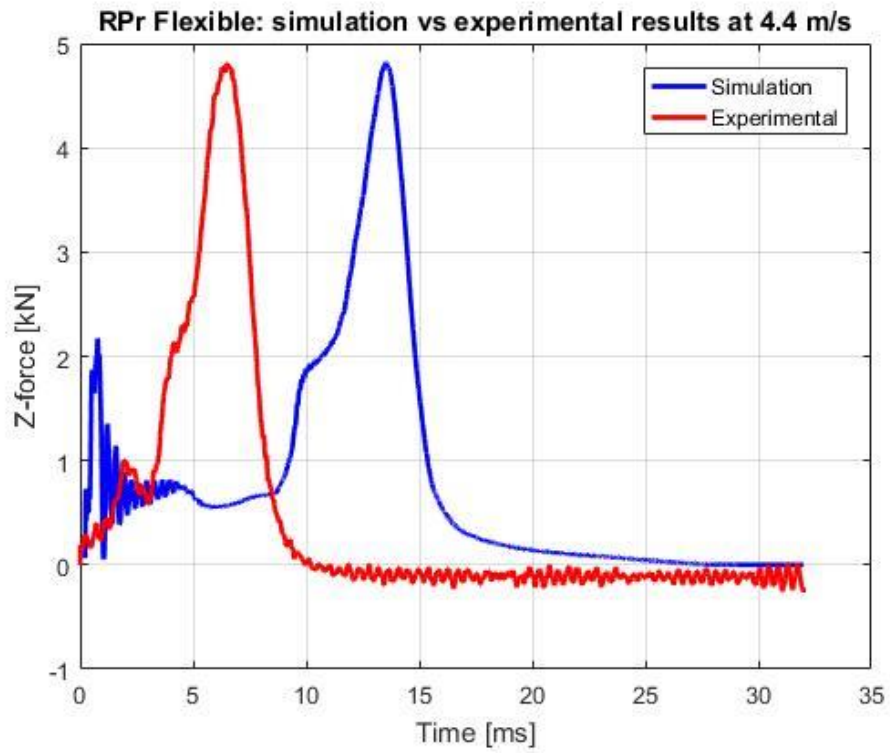


Figura 5.13: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Pr in Flexible.

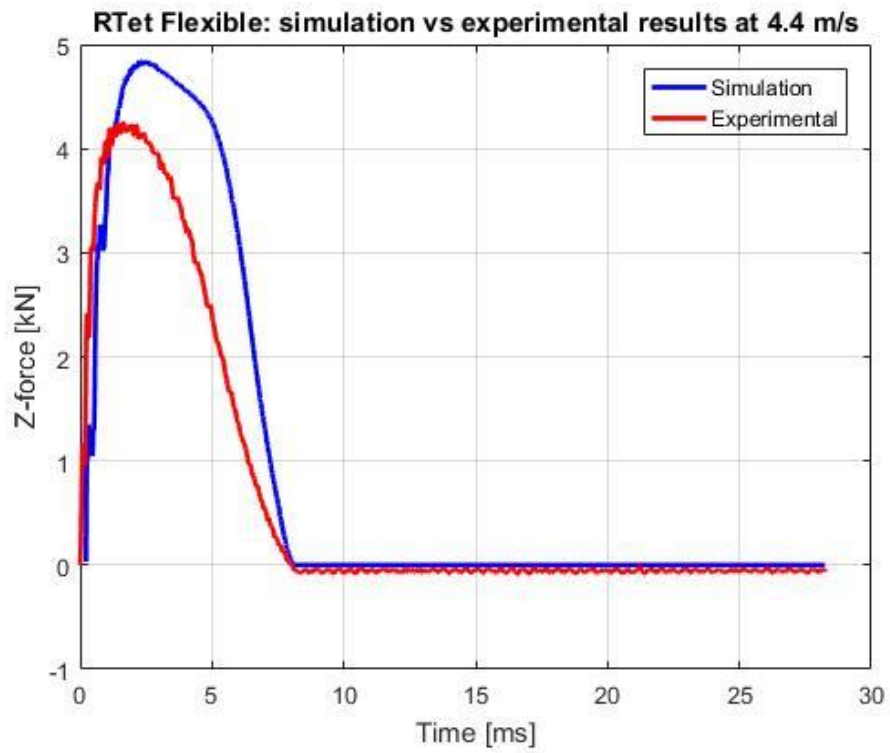


Figura 5.14: Confronto dati sperimentali e simulazione per la struttura R_Tet in Flexible.

5.2 Risultati ottenuti variando la velocità di impatto

Per poter valutare il comportamento delle strutture in un più ampio range operativo sono state eseguite ulteriori simulazioni con diverse velocità di impatto, in aggiunta a quelle eseguite a 4.4 m/s. I modelli FEM utilizzati per tali simulazioni sono sempre gli stessi e pertanto anche esse non saranno veritiere al 100% ed inoltre non esistono prove sperimentali con cui poter operare un confronto.

La velocità di impatto influisce sulla velocità di deformazione e per questo motivo si attende un diverso comportamento da parte delle strutture dal momento che esse sono realizzate con materiali polimerici, i quali sono fortemente influenzati dalla velocità di deformazione come è stato spiegato nei Capitoli precedenti.

Un ulteriore contributo al comportamento finale della struttura, oltre a quello del materiale costituente, viene dato dal fatto che essa è una struttura reticolare e quindi, in base al tipo di sollecitazione, ogni cella può avere un comportamento diverso.

Quando la velocità di deformazione è bassa o quasi-statica tutte le celle rispondono alla sollecitazione in modo uniforme poiché gli stress sono distribuiti istantaneamente tra di esse, mentre quando la velocità di deformazione è molto alta le celle non sono in equilibrio e più è elevata meno possibilità ci sono che la struttura risponda uniformemente come invece avviene quando è bassa [71].

Questo comportamento è visibile nei risultati ottenuti nelle simulazioni che verranno presentate di seguito. I grafici mostrati in questo Paragrafo riportano le curve forza/spostamento, interrotte nel momento in cui lo *striker* si trova nel punto più basso della sua corsa, un istante prima dell'inizio del rimbalzo. La forza riportata è la reazione vincolare tra la struttura reticolare e lo *striker* lungo l'asse *z*, ovvero la direzione in cui agisce la sollecitazione, mentre lo spostamento è lo schiacciamento che la struttura subisce ad opera dello *striker*.

5.2.1 Risultati con velocità di impatto 1 m/s

Alla velocità iniziale di 1 m/s si nota che le strutture più rigide, quelle con le celle poliedriche ovvero H_Tet e R_Tet (Figura 5.16 e Figura 5.18), proprio per via della loro rigidità, non si deformano ed infatti lo schiacciamento massimo delle due tipologie di struttura si verifica per spostamenti molto piccoli, compresi tra gli 0.5 e 2 mm, nei primi secondi di simulazione.

La situazione non cambia particolarmente da un materiale all'altro, infatti per tutti e tre il comportamento è simile, anche se lo schiacciamento massimo e la forza massima registrata variano da materiale a materiale. In particolare il Durable risulta essere il materiale più rigido poiché per esso lo schiacciamento massimo si verifica per gli spostamenti più piccoli e con la reazione vincolare maggiore. Questo comportamento molto rigido del Durable si nota anche per le altre due tipologie di struttura, H_Pr e R_Pr (Figura 5.15 e Figura 5.17), infatti la reazione vincolare registrata è molto elevata e lo spostamento a cui si verifica tale picco è minimo.

Per gli altri due materiali invece il comportamento è diverso, infatti essi permettono una maggiore deformazione della struttura come è possibile vedere nei grafici in cui lo spostamento può arrivare fino a 7 mm. La forma dei grafici realizzati per le strutture in Elasto 95 inoltre è molto simile a quella tipica dei materiali assorbitori di energia poiché dopo un primo picco iniziale segue una regione a plateau.

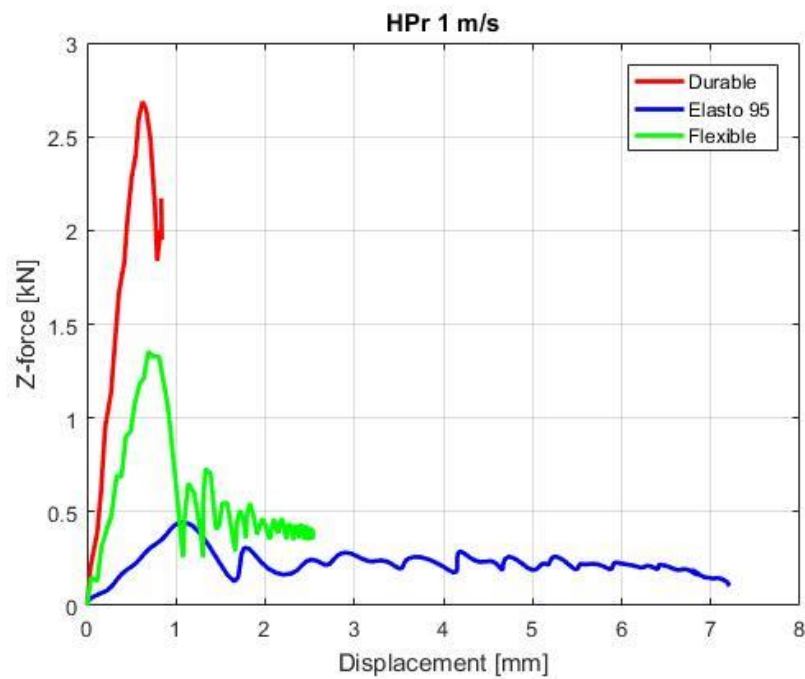


Figura 5.15: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.

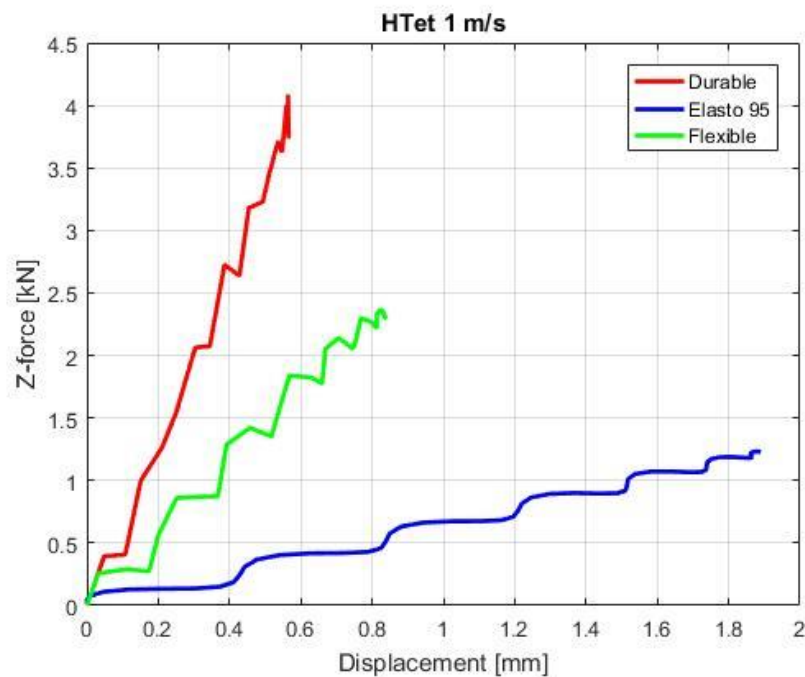


Figura 5.16: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.

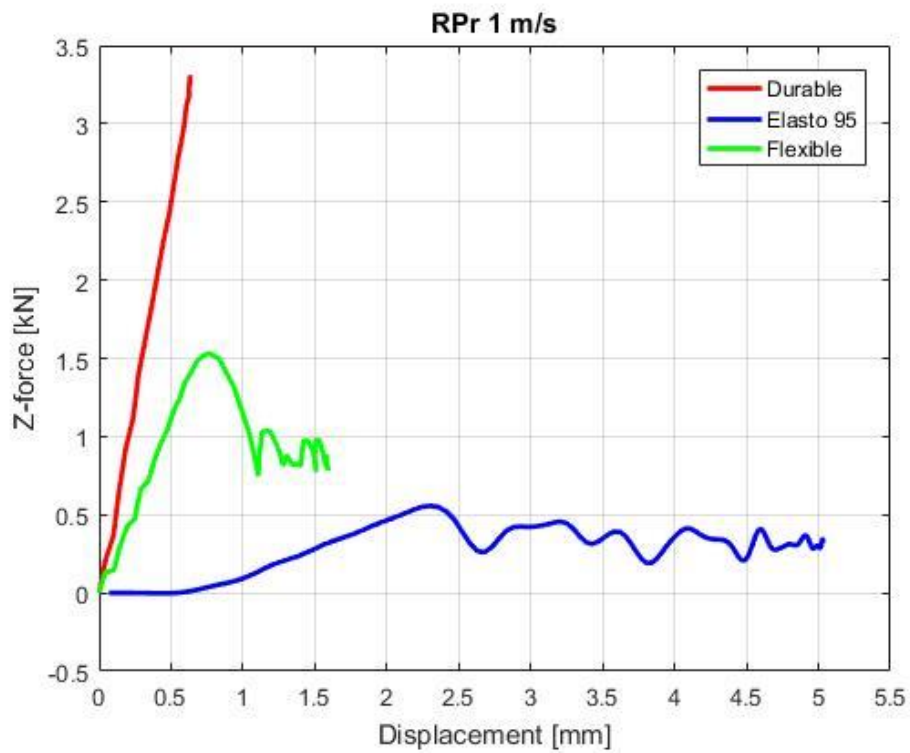


Figura 5.17: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.

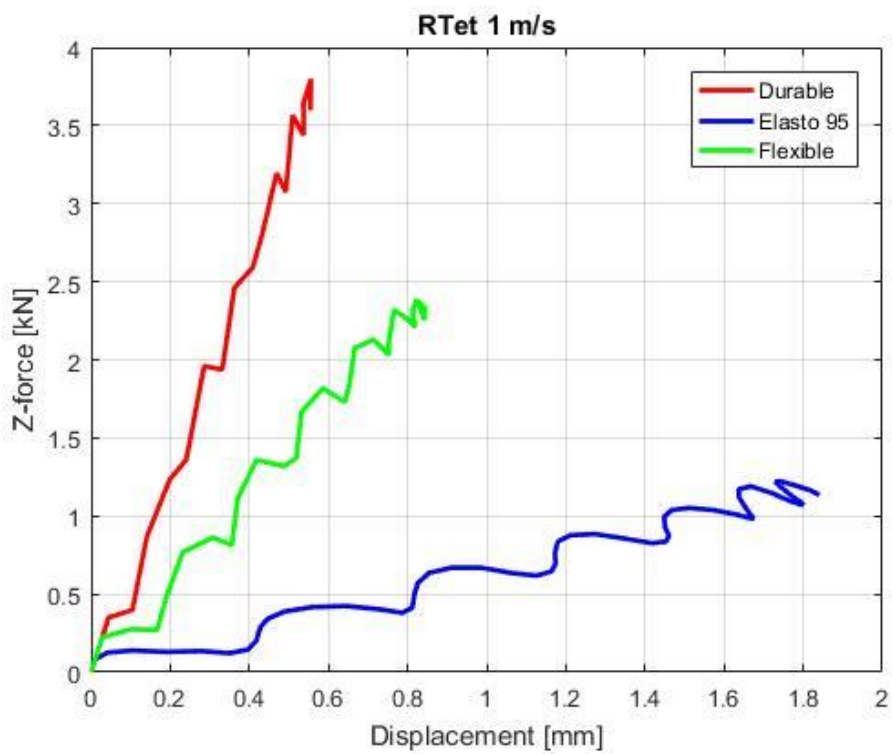


Figura 5.18: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 1 m/s.

5.2.2 Risultati con velocità di impatto 2 m/s

Alla velocità di 2 m/s l'andamento dei grafici forza/spostamento delle due strutture rigide H_Tet e R_Tet (Figura 5.20 e Figura 5.22) non si discosta in maniera significativa da quello registrato per 1 m/s, l'unica differenza riscontrabile è nell'entità delle reazioni vincolari e degli spostamenti, in quanto sono circa il doppio di quelli precedenti, come era prevedibile dal momento che la velocità è raddoppiata.

Anche per le altre due strutture, H_Pr e R_Pr (Figura 5.19 e Figura 5.21), il comportamento è simile con quanto avveniva con la velocità iniziale di 1 m/s, però in entrambi i casi l'entità della reazione vincolare, pur aumentando, non raddoppia come per le strutture a celle poliedriche, mentre lo schiacciamento massimo invece è più che raddoppiato. Ciò avviene per tutti e tre i materiali, anche se quello con il comportamento più adatto allo scopo di assorbitore di energia continua a confermarsi l'Elasto 95 per via della forma che i suoi grafici assumono.

La maggiore entità della velocità iniziale con cui lo *striker* colpisce le strutture consente quindi un maggior schiacciamento delle stesse, in tutti i casi esaminati.

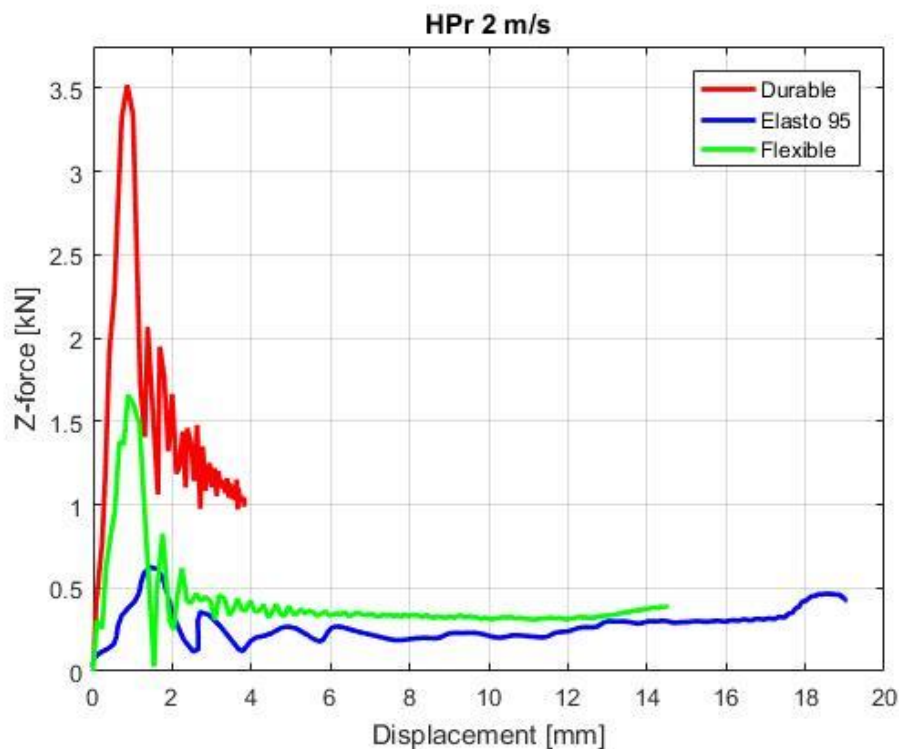


Figura 5.19: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.

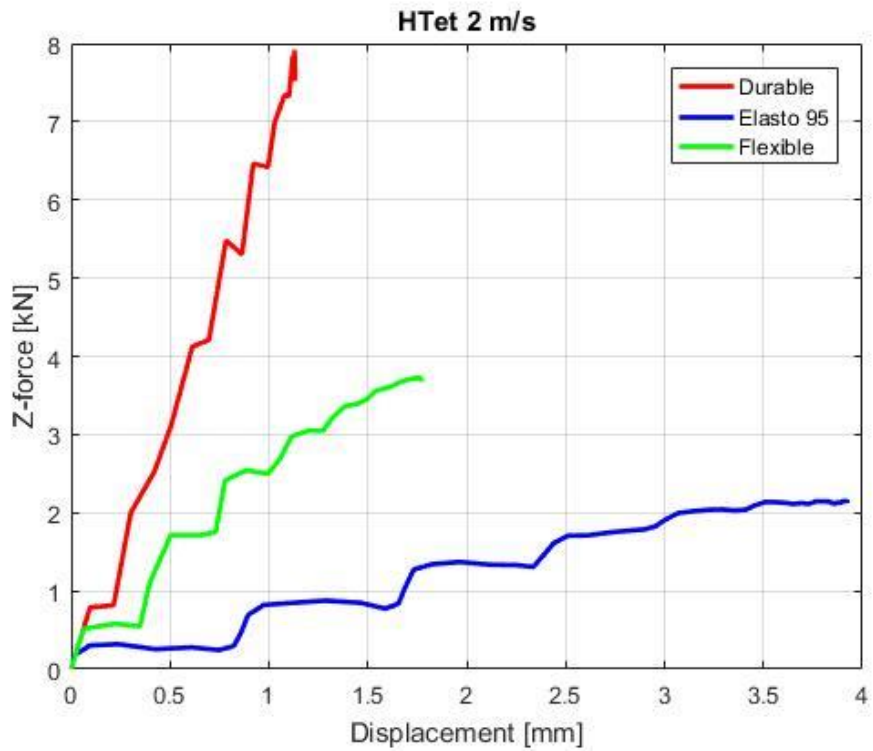


Figura 5.20: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.

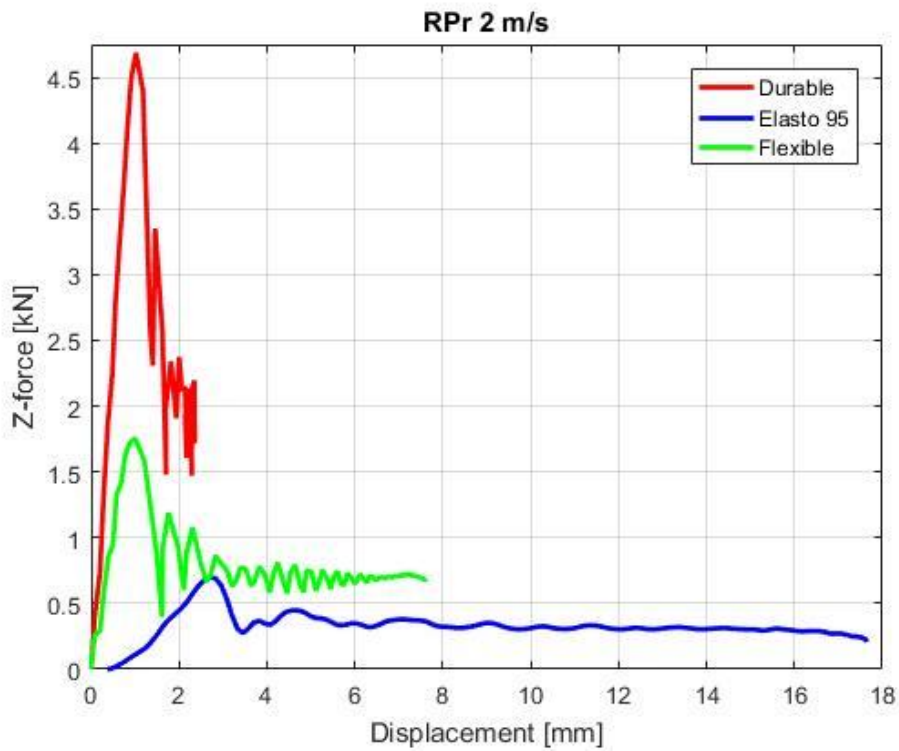


Figura 5.21: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.

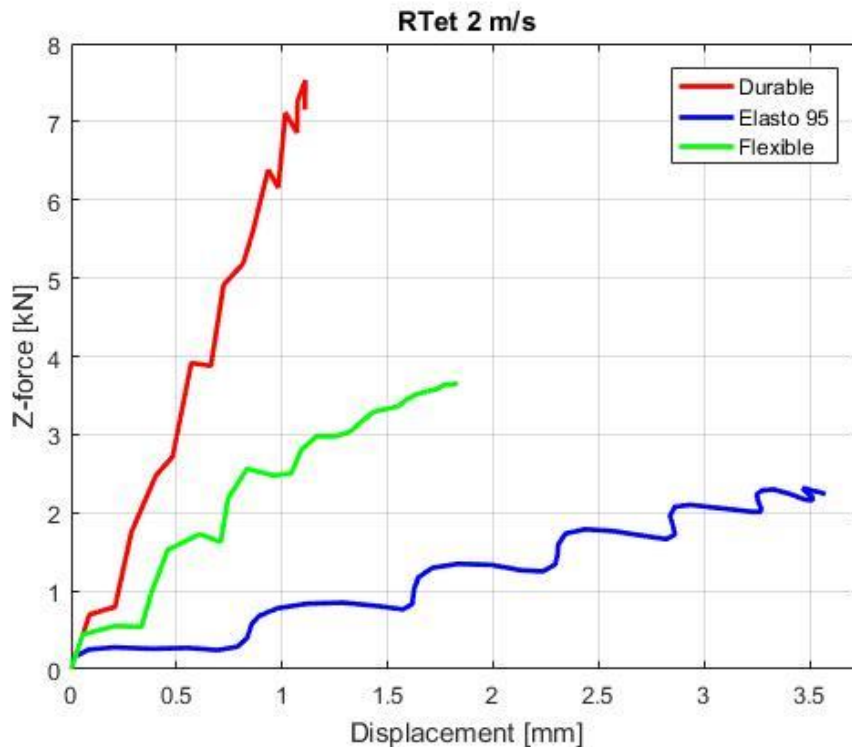


Figura 5.22: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 2 m/s.

5.2.3 Risultati con velocità di impatto 7.5 m/s

Come era atteso, dal momento che la velocità impostata è di conseguenza anche la velocità di deformazione è molto elevata, tutte e quattro le strutture assumono un comportamento molto diverso da quello che dimostravano alle velocità più basse.

In questo caso infatti la velocità è talmente elevata che tutte le strutture si schiacciano completamente, senza prima avere la possibilità di deformarsi tramite fenomeni di flessione e buckling per assorbire l'energia dell'urto.

Ciò avviene in particolar modo per le strutture con celle semplici, H_Pr e R_Pr (Figura 5.23 e Figura 5.25) in cui per tutti e tre i materiali si assiste ad un lungo tratto in cui la reazione vincolare è circa 0 per poi terminare con picchi molto elevati che corrispondono all'istante in cui la struttura è completamente collassata e lo *striker* entra in contatto con l'incudine. Lo stesso andamento è riscontrabile anche per le strutture H_Tet e R_Tet quando sono realizzate in Elasto 95 e Flexible (Figura 5.24 e Figura 5.26), mentre invece la situazione è diversa per il Durable, per il quale l'andamento continua ad essere simile a quanto avveniva per velocità più basse, con reazioni vincolari elevate e spostamenti massimi piccoli. Questo conferma la sua natura di materiale molto più rigido rispetto agli altri due.

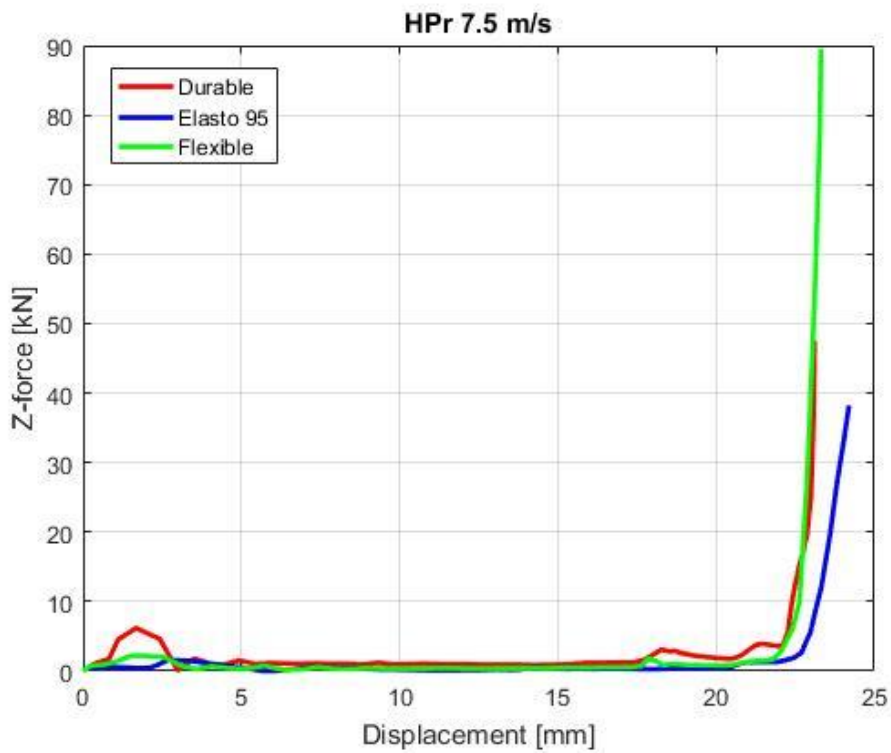


Figura 5.23: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.

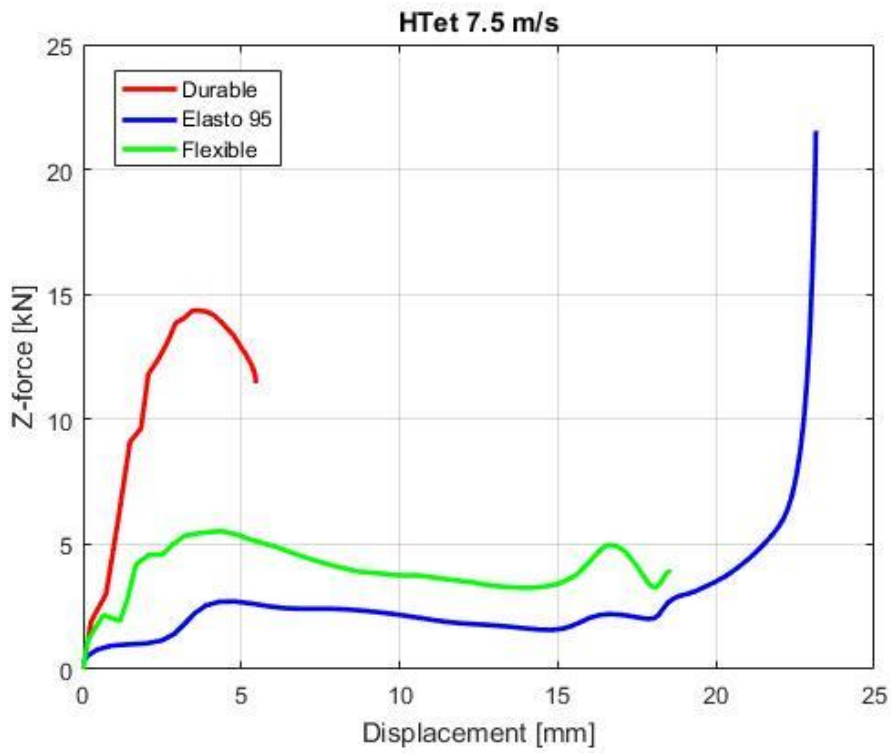


Figura 5.24: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.

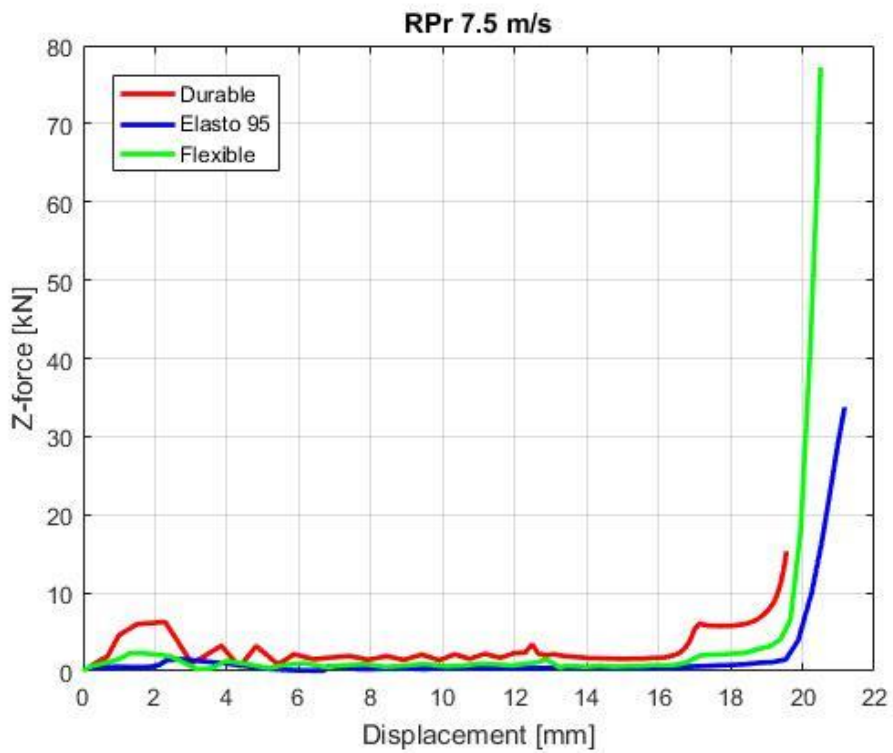


Figura 5.25: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.

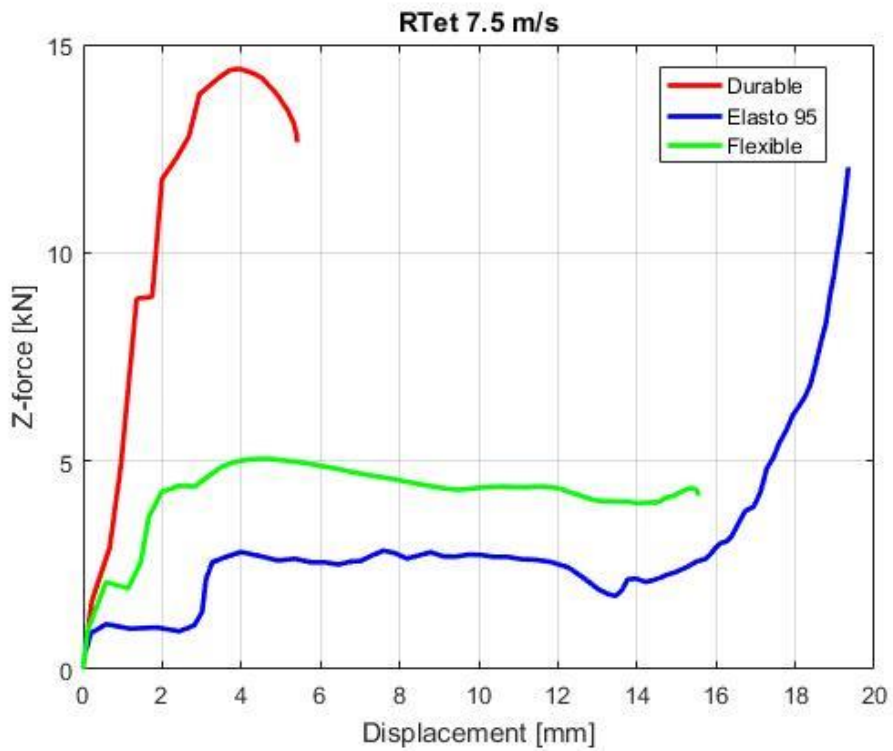


Figura 5.26: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 7.5 m/s.

5.2.4 Risultati con velocità di impatto 4.4 m/s

Infine per completezza sono riportati anche i grafici forza/spostamento ottenuti per velocità iniziali pari a 4.4 m/s, gli stessi che sono stati utilizzati per il confronto con i dati sperimentali. In questo Paragrafo però verranno raggruppati per strutture, in modo tale da mostrare le differenze di comportamento dei tre materiali per ogni struttura, come è già stato svolto per le altre simulazioni con differenti velocità iniziali.

In questo caso si nota una divergenza nel comportamento tra i tre materiali per quanto riguarda le strutture a celle semplici H_Pr e R_Pr (Figura 5.27 e Figura 5.29), infatti il Durable al contrario di quanto avviene per l'Elasto 95 e il Flexible consente una deformazione delle strutture ed infatti presenta una curva forza/spostamento con andamento simile a quelle tipiche dei materiali assorbitori di energia poiché è possibile individuare una regione più o meno costante. Per gli altri due materiali invece il comportamento è simile a quello riscontrato per velocità pari a 7.5 m/s mostrato nel Paragrafo precedente, infatti la curva si mantiene pressoché piatta per tutta la durata dello schiacciamento delle strutture per poi terminare con picchi molto elevati, corrispondenti ad un completo e repentino collasso che non permette un assorbimento dell'energia.

Invece per le strutture a celle poliedriche, H_Tet e R_Tet (Figura 5.28 e Figura 5.30) al contrario di quello che presentano per la velocità 7.5 m/s, in questo caso per i materiali Elasto 95 e Flexible non si verificano i picchi in corrispondenza del massimo schiacciamento e l'entità degli spostamenti massimi è inferiore.

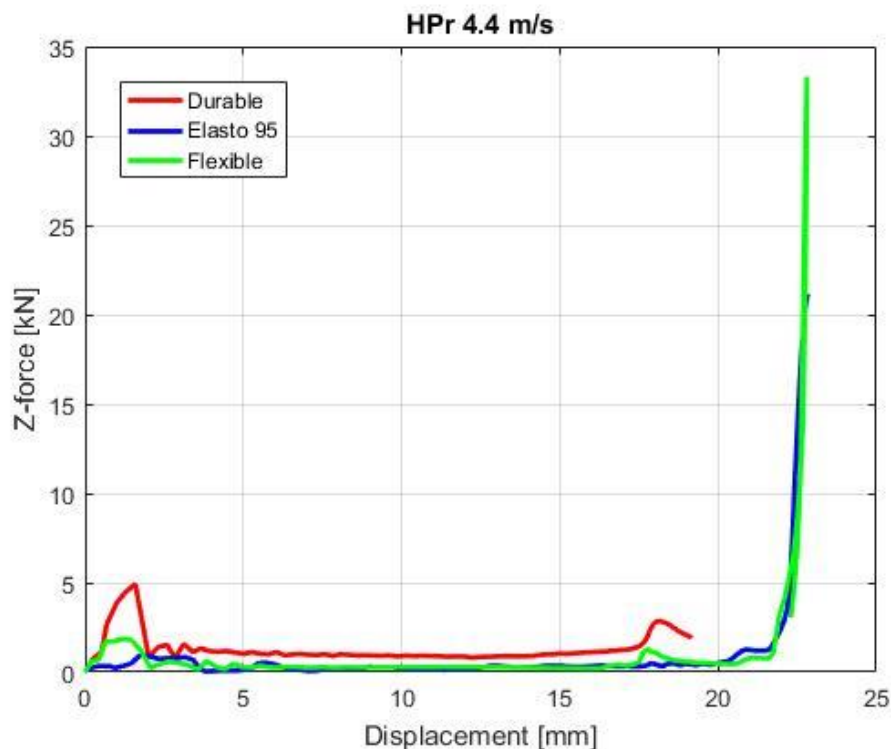


Figura 5.27: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.

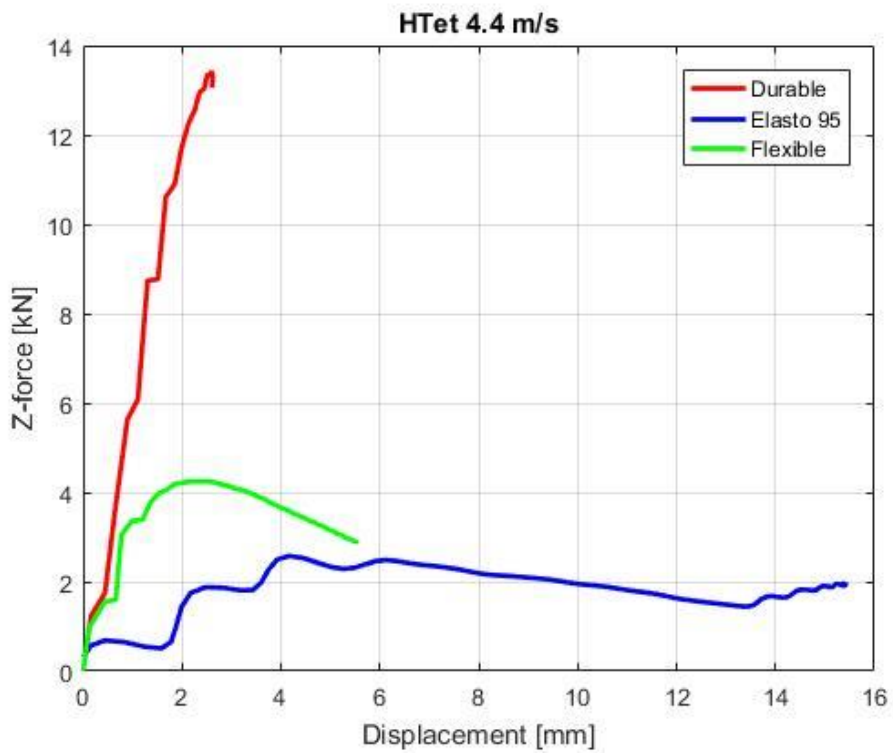


Figura 5.28: Grafici forza/spostamento per la struttura H_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.

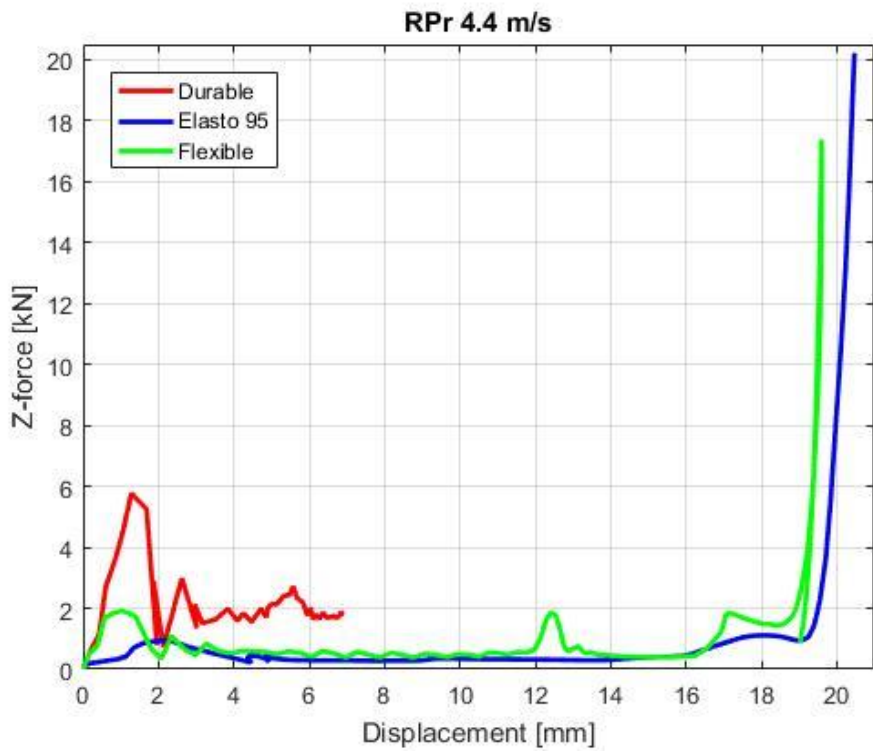


Figura 5.29: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Pr per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.

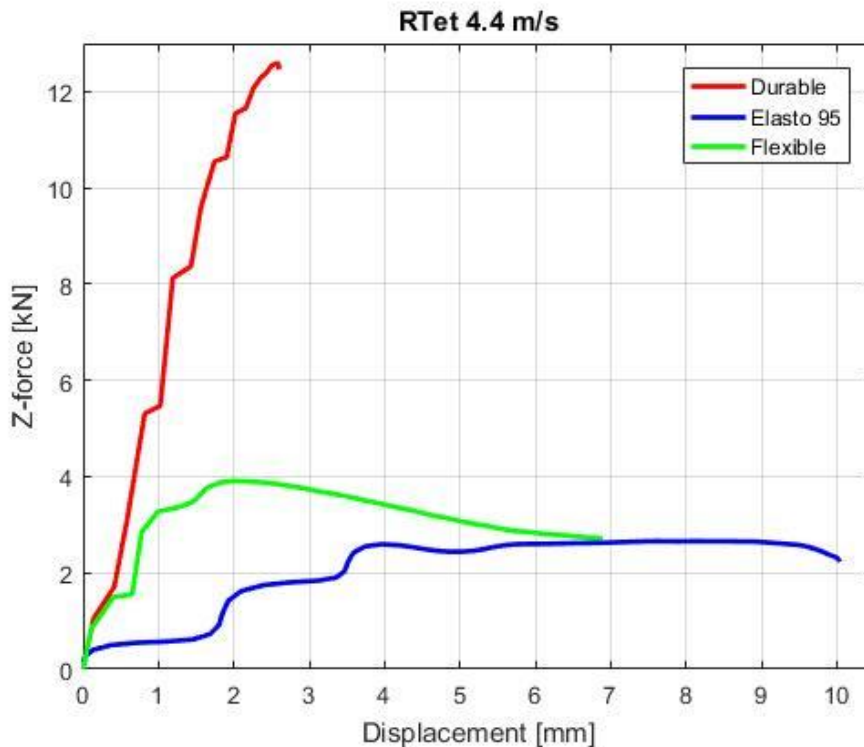


Figura 5.30: Grafici forza/spostamento per la struttura R_Tet per ognuno dei tre materiali a velocità iniziale pari a 4.4 m/s.

Grazie a queste analisi è stato possibile verificare il comportamento dei materiali e delle strutture al variare della velocità iniziale. Si è ricavato che il Durable è il materiale più rigido e resistente dei tre analizzati e presenta una deformabilità limitata, riscontrabile per lo più a velocità di impatto intermedie (ad esempio per 4.4 m/s la sua curva forza/spostamento presenta una regione a plateau). L'Elasto 95 invece si è rivelato essere il materiale con il comportamento più elastico e flessibile, infatti presenta un'alta deformabilità riscontrabile anche alle velocità di impatto più basse. Il Flexible infine possiede un comportamento intermedio rispetto agli altri due.

Quanto riscontrato per i tre materiali si conferma in tutte le simulazioni svolte, infatti le relative curve si posizionano sempre nello stesso modo reciproco, ovvero con la curva rossa del Durable sopra alle altre due mentre quella blu dell'Elasto 95 al di sotto.

Invece per quanto riguarda la geometria strutture, quelle con celle poliedriche si sono rivelate in ognuno dei casi esaminati sempre troppo rigide per poter permettere una deformazione atta ad assorbire l'energia dell'impatto dello *striker*.

I valori numerici esatti delle grandezze più rilevanti di ciascun grafico sono state raggruppate in tabelle. Per semplicità e una migliore fruizione dell'elaborato sono riportate nell'Appendice A e pertanto si rimanda ad essa.

5.3 Energia assorbita

L'energia assorbita è stata calcolata come l'area sottesa dalle curve dei grafici forza/spostamento. Per questo motivo è stato scelto di rappresentarli fino all'istante di massimo schiacciamento, infatti in questo modo è possibile ottenere il valore preciso di energia assorbita in ciascun caso durante la compressione.

In particolare per ottenere i suddetti valori di energia è stata impiegata la funzione integrativa, già implementata di default nel software Matlab, "trapz" inserendo come argomenti i vettori con i valori degli spostamenti e delle reazioni vincolari.

I risultati così calcolati sono espressi, caso per caso, nelle seguenti tabelle.

Tabella 5.1: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 1 m/s.

	Energia assorbita [J]		
	Durable	Elasto 95	Flexible
H_Pr	1.3435	1.6392	1.5245
H_Tet	1.0354	1.1591	1.0070
R_Pr	0.9965	1.4221	1.5024
R_Tet	0.9814	1.106	0.9975

Tabella 5.2: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 2 m/s.

	Energia assorbita [J]		
	Durable	Elasto 95	Flexible
H_Pr	6.0549	5.2128	6.0670
H_Tet	4.1324	4.8326	3.9294
R_Pr	6.0941	5.7107	6.2232
R_Tet	3.9259	4.2182	4.0554

Tabella 5.3: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 4.4 m/s.

	Energia assorbita [J]		
	Durable	Elasto 95	Flexible
H_Pr	25.2389	18.1271	11.7464
H_Tet	19.5836	27.9109	18.8481
R_Pr	15.6843	18.2588	14.5229
R_Tet	19.0683	20.7915	21.4019

Tabella 5.4: Energia assorbita per i risultati a velocità iniziale 7.5 m/s.

	Energia assorbita [J]		
	Durable	Elasto 95	Flexible
H_Pr	53.0565	38.1821	47.5350
H_Tet	57.2479	60.6470	74.2642
R_Pr	56.1238	33.9295	50.7725
R_Tet	57.1238	55.4937	65.2995

Da queste analisi svolte sul confronto dell'energia assorbita nei vari casi in esame emerge quanto era stato affermato nel Paragrafo precedente in cui si erano esaminati i soli grafici.

Alle basse velocità iniziali l'energia viene maggiormente assorbita dai materiali più elastici, in particolare dall'Elasto 95, mentre per quanto riguarda le strutture quelle che forniscono i risultati migliori sono H_Pr e R_Pr.

Invece alle velocità più elevate, già da 4.4 m/s in su, le strutture che assorbono più energia sono H_Tet e R_Tet, ma i materiali che continuano a confermarsi migliori sono Elasto 95 e Flexible.

5.4 Deformate significative

5.4.1 Deformate post-schiacciamento

Di seguito verranno mostrate le deformate delle strutture al termine delle simulazioni, ovvero durante la fase di rimbalzo. Grazie a queste immagini è possibile valutare se si verifica o no un ritorno alla forma originale di ogni struttura. Per fare ciò sono state prese in considerazione le deformate che si verificano a seguito dell'impatto con velocità iniziale pari a 7.5 m/s poiché essa è la velocità maggiore esaminata e si è visto in precedenza che con essa le sollecitazioni imposte alle strutture sono molto elevate, di conseguenza ci si aspetta che anche le deformazioni siano significative (Figura 5.31). Il colore più chiaro indica le zone che hanno subito maggiori stress.

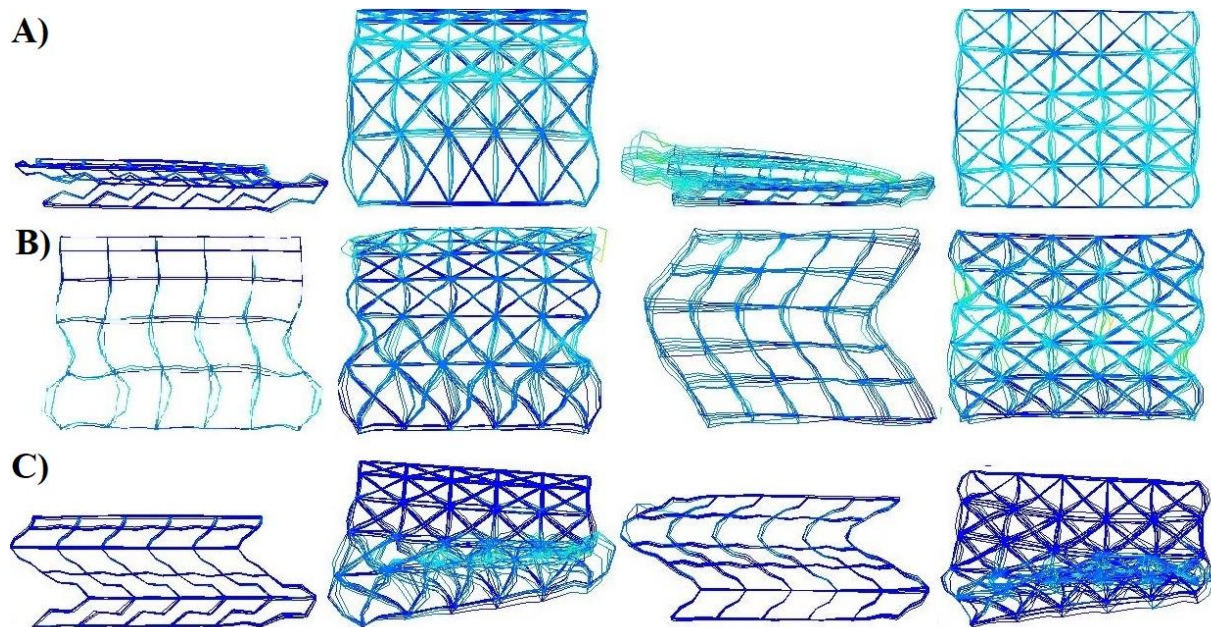


Figura 5.31: Deformate al termine della sollecitazione per velocità iniziale pari a 7.5 m/s. A) Strutture realizzate in Durable; B) Strutture realizzate in Elasto 95; C) Strutture realizzate in Flexible.

Nonostante le elevate deformazioni a cui sono sottoposte, la maggior parte delle strutture presenta un ritorno abbastanza completo alla forma originaria. In particolare il recupero avviene soprattutto per le strutture a celle poliedriche, anche se ciò è principalmente dovuto al fatto che esse sono quelle che subiscono deformazioni di minore entità. Invece si assiste ad un ritorno quasi nullo alla forma iniziale nei casi in cui le strutture a celle semplici sono realizzate in Durable.

Da questa analisi si nota che il materiale che consente un maggior recupero delle dimensioni originali per tutte le strutture è l'Elasto 95, il quale ha un comportamento quasi elastomerico e quindi molto elastico.

Tale modalità di risposta alle forzanti esterne differenzia le strutture reticolari dalle schiume, infatti esse in seguito ad una compressione si deformano plasticamente senza avere la capacità di ritornare almeno in parte alle loro dimensioni originali. Questo comportamento più elastico delle strutture reticolari è dato dalla loro particolare forma geometrica, infatti una buona parte degli spigoli delle celle va in buckling per adattarsi all'elevata deformazione a cui sono sottoposti senza tuttavia rompersi e portare ad un danno permanente, come invece accade per le schiume [71].

5.4.2 Differenze nel meccanismo di deformazione delle strutture

Le differenze geometriche tra le celle delle strutture si traducono in differenti modalità di deformazione che subiscono in seguito a carichi di compressione, come si può vedere in Figura 5.32 e Figura 5.33. Si può notare infatti come nelle strutture con le celle che aumentano progressivamente di altezza (H_Pr e H_Tet) la prima riga di celle, quella più in alto a contatto con lo *striker* non subisca deformazioni, mentre nelle altre due tipologie (R_Pr e R_Tet) anch'esse sono soggette ad una deformazione di entità simile a quella che mostrano le altre, poiché hanno tutte la stessa altezza.

Inoltre si può vedere che le strutture a celle semplici si deformano per buckling degli spigoli e tale deformazione inizia dalle celle alla base per poi propagarsi a quelle superiori, portando ad una flessione generale della struttura nel suo complesso, che per carichi molto elevati conduce ad un ripiegamento su sé stessa.

Per quanto riguarda le strutture a celle poliedriche invece la deformazione si verifica solo negli spigoli perimetrali che tendono ad inflettersi; gli spigoli diagonali invece non subiscono modifiche nella forma e la loro presenza inoltre impedisce il ripiegamento su sé stessa della struttura che invece si verifica per le altre.

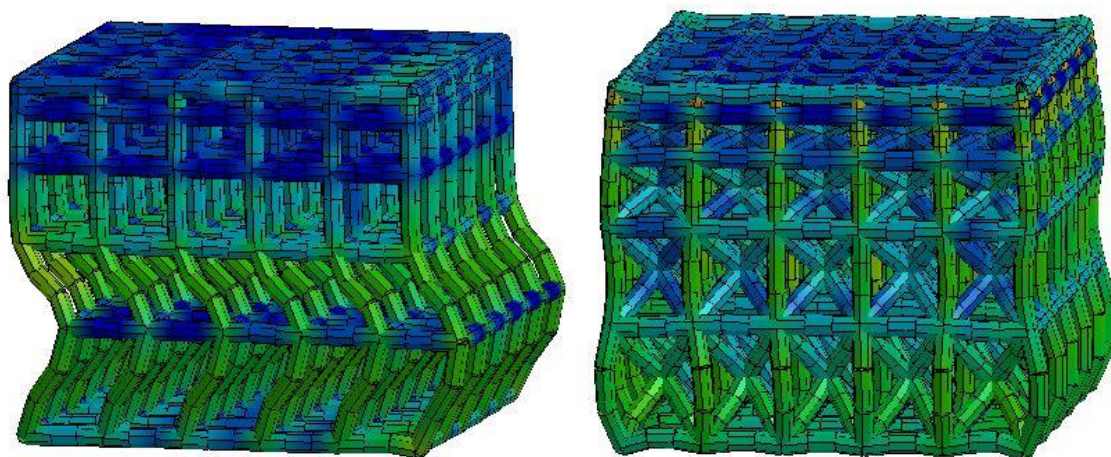


Figura 5.32: Deformazioni nei primi istanti di simulazione per le strutture H_Pr (in Durable) H_Tet (in Elasto 95), a 4.4 m/s.

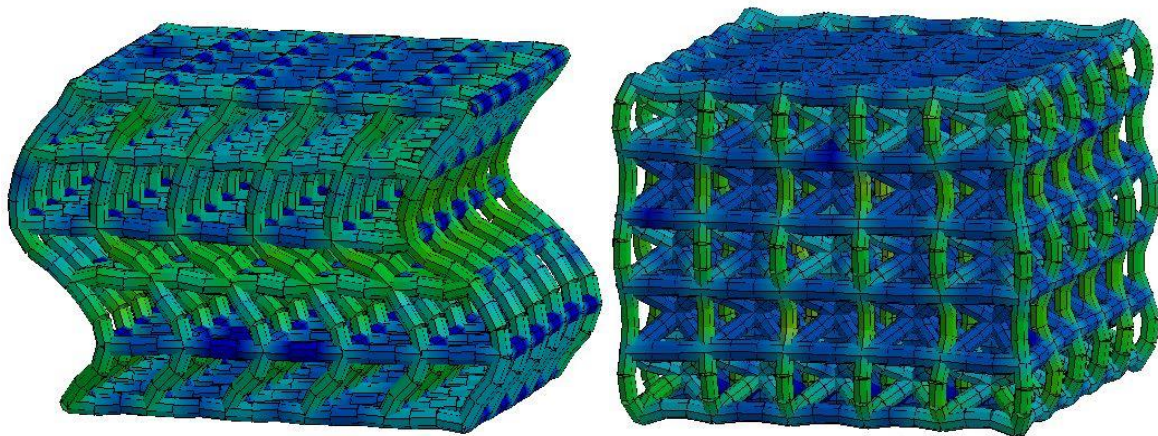


Figura 5.33: Deformazioni nei primi istanti di simulazione per le strutture R_PR e R_Tet in Elasto 95, a 4.4 m/s.

5.4.3 Correlazione grafici e deformate

Come già detto in precedenza per ogni picco presente nel grafico è possibile individuare un evento di deformazione nella struttura.

Di seguito verranno mostrati degli esempi in cui si mettono in correlazione i picchi con le relative deformate.

Sia in Figura 5.34 che Figura 5.35 si può vedere come il primo picco di entrambe le curve si verifichi in corrispondenza della prima deformazione della struttura, ovvero un'inflexione degli spigoli delle celle.

All'aumentare dell'entità delle deformazioni le curve calano drasticamente poiché le deformazioni inducono una diminuzione nella resistenza della struttura. I picchi successivi invece sono dovuti alle progressive deformazioni delle celle dei livelli superiori, infatti la deformazione di esse parte dal basso e a mano a mano che collassano, si sposta nelle celle del livello superiore, fino ad arrivare ad una compressione completa della struttura.

Nelle due figure inoltre sono mostrate anche le deformate al termine dello schiacciamento, durante la fase di rimbalzo.

Lo stesso procedimento può essere eseguito per ognuno dei grafici ottenuti.

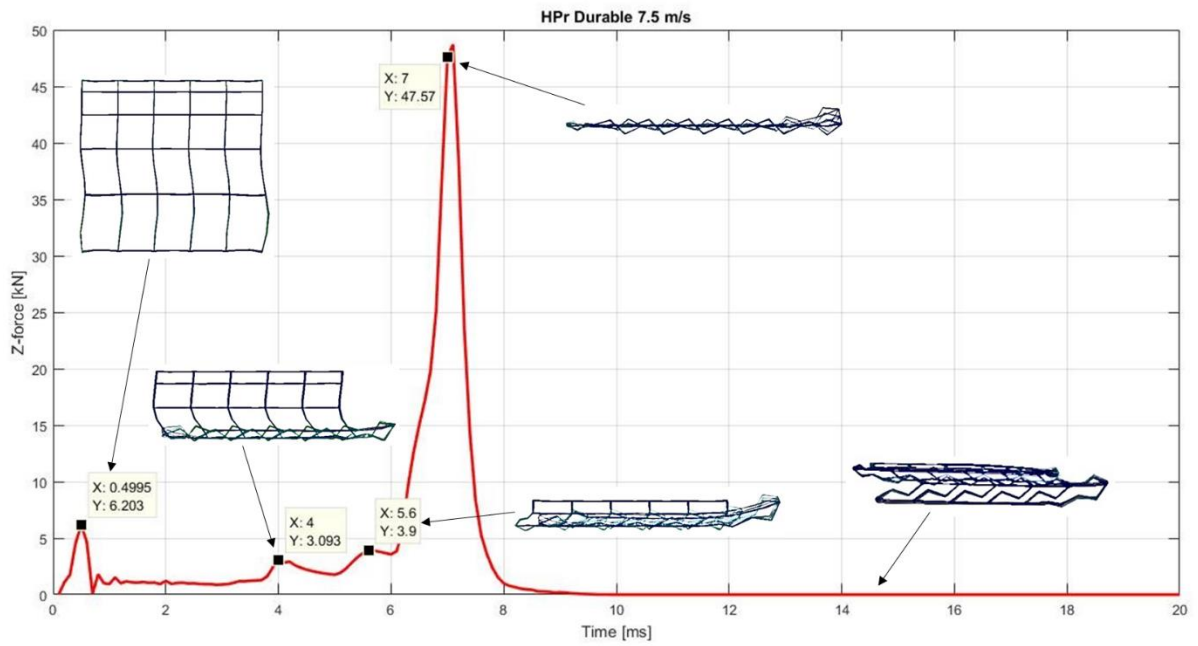


Figura 5.34: Correlazione Deformate/Grafico per la struttura H_Pr in Durable a 7.5 m/s.

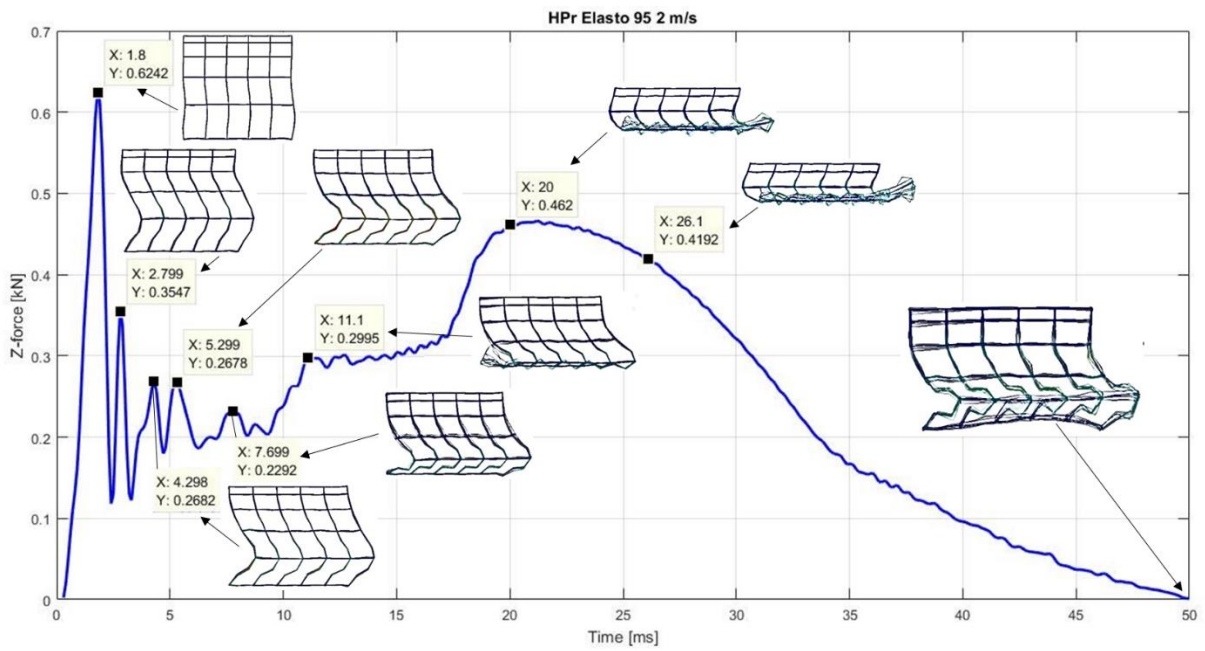


Figura 5.35: Correlazione Deformate/Grafico per la struttura H_Pr in Elasto 95 a 4.4 m/s.

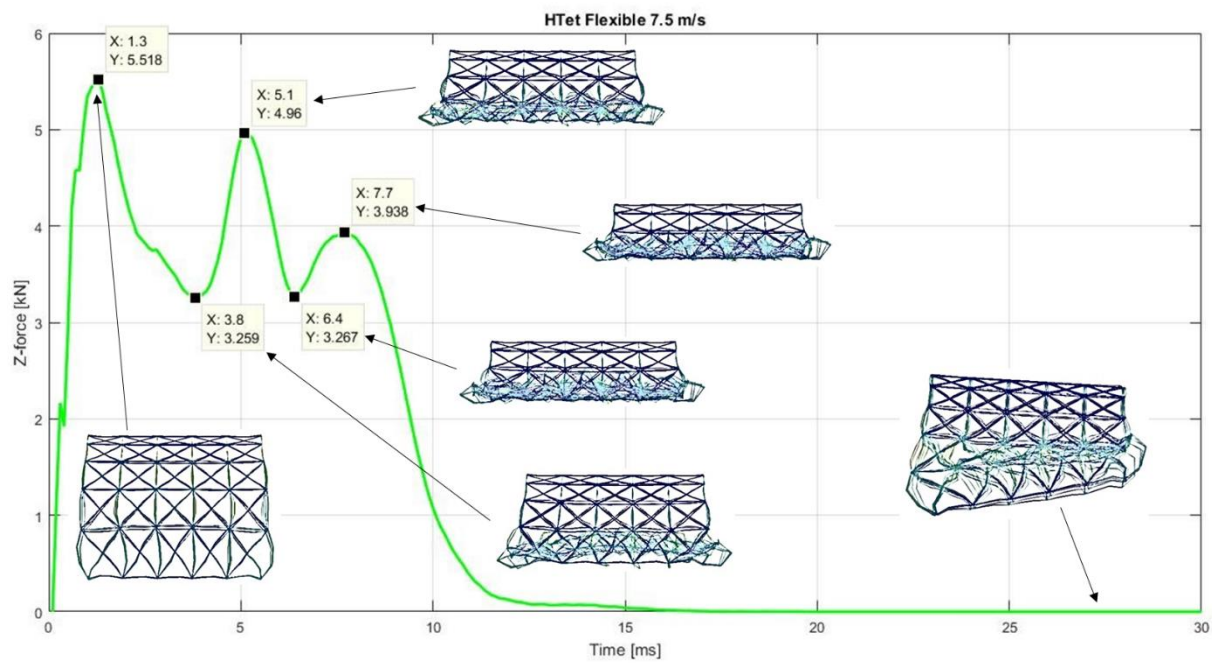


Figura 5.36: Correlazione Deformate/Grafico per la struttura H_Tet in Flexible a 7.5 m/s.

Capitolo 6

Conclusioni

In conclusione dalle analisi eseguite su quattro diversi tipi di strutture reticolari e tre differenti materiali costituenti è stato possibile ricavare alcune importanti informazioni.

Innanzitutto è stato possibile constatare che le strutture reticolari costituiscono una valida alternativa alle schiume polimeriche nel campo dell'assorbimento di energia in caso di urti, infatti le strutture reticolari presentano un'elevata capacità di deformazione in caso di compressioni in ogni range di velocità, da quelle più lente a quelle più repentine ed al contrario delle schiume esse presentano una buona capacità di ritornare, almeno in parte, alla forma originaria e quindi poter sopportare successivi urti anche se con proprietà meccaniche sempre inferiori dovute alla degradazione della struttura in seguito agli impatti precedenti.

Per quanto riguarda i materiali invece si è visto che le miscele polimeriche, grazie alle nuove tecnologie, sono sempre più prestanti e polivalenti in molti ambiti. In particolare giocano un ruolo fondamentale nel campo dell'assorbimento di energia, infatti sono facilmente reperibili a costi relativamente bassi e molto lavorabili, come è stato possibile vedere grazie all'impiego di stampanti 3D disponibili sul mercato per la realizzazione di componenti. Tuttavia occorre scegliere il materiale polimerico più adatto allo scopo finale, infatti in questa analisi il Durable si è rivelato efficace solamente nelle simulazioni con velocità di impatto più elevate, mentre nella maggior parte dei casi è risultato troppo rigido e resistente, al contrario dell'Elasto 95 che invece si è sempre dimostrato molto deformabile ed elastico.

Per questo motivo non è possibile identificare una soluzione comprendente struttura e materiale migliore in assoluto, infatti la combinazione migliore varia in base all'utilizzo che se ne vuole fare.

Ad esempio a velocità di impatto più basse la struttura che dalle analisi svolte si è rivelata la migliore è stata la H_Pr, seguita in termini di prestazioni dalla R_Pr, poiché entrambe si deformano maggiormente rispetto alle Tet, che invece si presentano come troppo rigide e non consentono un buon assorbimento di energia tramite deformazione. La situazione ad ogni modo cambia a velocità più elevate, infatti oltre una certa soglia le due strutture a celle semplici non sono sufficientemente resistenti da poter subire un'adeguata deformazione geometrica in grado di attutire l'urto, ma semplicemente collassano. Invece le strutture a celle poliedriche, proprio per via della loro natura più rigida, consentono una deformazione anche a velocità maggiori.

Il materiale costituente contribuisce in maniera rilevante alla resistenza e quindi sulla capacità deformativa finale delle strutture, infatti per H_Pr e R_Pr nei casi ad alta velocità se si impiega il Durable è possibile ottenere buoni risultati, invece non è consigliabile impiegarlo in H_Tet e R_Tet poiché in questo la rigidità che ne consegue è troppo elevata e non si verifica assorbimento di energia. Alle basse velocità invece il materiale migliore è l'Elasto 95.

Tuttavia, dalle simulazioni svolte e dai dati sperimentali disponibili non è possibile ottenere i valori esatti dell'energia assorbita e nemmeno il comportamento reale che le strutture assumono in ciascuna delle condizioni esaminate, ma soltanto effettuarne una prima approssimazione. Il motivo di ciò è da ricercare nella mancanza delle curve sforzo/deformazione da cui, come mostrato nei Capitoli introduttivi, è possibile estrapolare i valori delle proprietà meccaniche necessarie per impostare al meglio le simulazioni in maniera molto più precisa di quanto è stato fatto in questo elaborato, come ad esempio il modulo elastico tangenziale e con esse effettuare una stima il più accurata possibile dell'energia assorbita e del comportamento come materiali assorbitori di energia ed anche verificare se le due tipologie di strutture rientrano nella categoria *bending-dominated* e *stretch-dominated*.

Per questo motivo è consigliabile effettuare in futuro maggiori test sperimentali da cui rilevare i valori di sforzo e deformazione e conseguentemente realizzare simulazioni con valori più verosimili in modo tale da ottenere modelli sempre più fedeli e realistici.

Appendice A

In questa sezione sono riportate in tabella le principali grandezze ricavate dalle simulazioni per ognuno dei modelli in esame. In particolare è stato scelto di riportare: il massimo schiacciamento delle strutture ad opera dello *striker* e l'istante temporale in cui si verifica; la reazione vincolare che si verifica nell'istante di massimo schiacciamento, la massima reazione vincolare e l'istante in cui si riscontra tale picco; infine sono riportati i valori massimi di stress e strain registrati negli elementi beam.

7.1 Risultati Durable

Tabella 7.1: Risultati Durable schiacciamento.

Durable 1 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	2.3306950	3.2996780
H_Tet	2.0549430	2.6994290
R_Pr	2.2598500	2.9998460
R_Tet	2.0988810	2.6989370

Durable 2 m/s		
	Schiacciamento max [mm]	Istante schiacciamento max [ms]
H_Pr	6.3484500	6.6996610
H_Tet	3.1050040	2.1999560
R_Pr	4.3735220	4.0987740
R_Tet	3.1989250	2.1998160

Durable 4.4 m/s		
	Schiacciamento max [mm]	Istante schiacciamento max [ms]
H_Pr	29.6004000	11.8999380
H_Tet	6.0392430	2.1999920
R_Pr	19.7686700	9.0996100
R_Tet	6.1538700	2.1988310

Durable 7.5 m/s		
	Schiacciamento max [mm]	Istante schiacciamento max [ms]
H_Pr	41.2960100	6.9999900
H_Tet	11.5872100	2.7999430
R_Pr	40.6554000	7.9999080
R_Tet	11.5713100	2.6997110

Tabella 7.2: Risultati Durable reazioni vincolari.

Durable 1 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	2.1708100	2.6867900	2.2997800
H_Tet	4.0865800	4.0865800	2.6994300
R_Pr	3.2531100	3.3105600	2.8991000
R_Tet	3.5979900	3.9263400	2.7999500

Durable 2 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	1.0182600	3.5180100	1.2998900
H_Tet	7.9188100	7.9188100	2.1999600
R_Pr	1.8793500	4.6868200	1.5992900
R_Tet	5.0108200	7.7590500	2.2986500

Durable 4.4 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	1.9065000	5.7057200	0.7255460
H_Tet	12.1725000	12.5655000	1.9278200
R_Pr	1.8920200	6.0310500	0.7566430
R_Tet	12.3583000	12.6471000	1.9269700

Durable 7.5 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	47.5708000	48.7025000	7.0998900
H_Tet	11.4382000	14.3496000	1.2998000
R_Pr	15.3301000	15.3301000	7.9999100
R_Tet	12.6526000	14.4158000	1.3996100

Tabella 7.3: Risultati Durable stress e strain negli elementi beam.

Durable 1 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0643600	0.0298100
H_Tet	0.0410300	0.0000000
R_Pr	0.0474400	0.0007928
R_Tet	0.0293800	0.0000000

Durable 2 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0784200	0.1545000
H_Tet	0.0771000	0.0305500
R_Pr	0.0926100	0.2528000
R_Tet	0.0606100	0.0119500

Durable 4.4 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.1005000	0.2061000
H_Tet	0.1087000	0.3357000
R_Pr	0.1229000	0.6380000
R_Tet	0.0962700	0.2350000

Durable 7.5 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max strain
H_Pr	0.2204000	2.2870000
H_Tet	0.1508000	2.4890000
R_Pr	0.1758000	1.6850000
R_Tet	0.1471000	1.2220000

7.2 Risultati Elasto 95

Tabella 7.4: Risultati Elasto 95 schiacciamento.

Elasto 95 1 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	10.1927900	20.8987140
H_Tet	4.3923690	6.2984420
R_Pr	7.3044020	13.5962070
R_Tet	4.5567940	6.5952260

Elasto 95 2 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	29.8694900	25.9986800
H_Tet	7.8341190	5.9988320
R_Pr	25.6029400	27.3996620
R_Tet	8.0716470	6.0972070

Elasto 95 4.4 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	42.6738200	11.2999170
H_Tet	23.4345600	10.1994200
R_Pr	42.9545400	11.4968440
R_Tet	20.3804000	8.2969830

Elasto 95 7.5 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	45.1712700	7.4987810
H_Tet	41.4912300	7.6996710
R_Pr	21.1700000	6.2960000
R_Tet	40.7572100	7.9962400

Tabella 7.5: Risultati Elasto 95 reazioni vincolari.

Elasto 95 1 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	0.1137010	0.4435647	2.9982500
H_Tet	1.2278810	1.2317860	6.0993100
R_Pr	0.3200780	0.5568218	3.4957300
R_Tet	1.1340200	1.2400500	7.0972400

Elasto 95 2 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	0.4204045	0.6241761	1.7996200
H_Tet	2.1376900	2.1522000	5.7989000
R_Pr	0.2180257	0.6988363	1.9995400
R_Tet	2.2352100	2.3103100	5.6978100

Elasto 95 4.4 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	21.0812000	21.0812000	11.2999170
H_Tet	1.9590500	2.5873700	1.8729400
R_Pr	20.3159000	20.3520000	11.4773000
R_Tet	2.2010300	2.7030200	2.0491500

Elasto 95 7.5 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	1.1611900	40.2523000	6.3988600
H_Tet	21.5483400	21.6750400	7.7996000
R_Pr	33.7489000	34.7310000	6.3964900
R_Tet	12.0541000	12.0541000	7.9962400

Tabella 7.6: Risultati Elasto 95 stress e strain negli elementi beam.

Elasto 95 1 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0235900	0.0825300
H_Tet	0.0123400	0.0000000
R_Pr	0.0220900	0.0681300
R_Tet	0.0096470	0.0000000

Elasto 95 2 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0321800	0.0229100
H_Tet	0.0281400	0.2278000
R_Pr	0.0484600	0.5120000
R_Tet	0.0246200	0.0999900

Elasto 95 4.4 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0908400	3.5040000
H_Tet	0.0908800	2.5387000
R_Pr	0.0482500	0.7282000
R_Tet	0.0657000	1.3060000

Elasto 95 7.5 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0712700	1.7340000
H_Tet	0.0909400	3.8430000
R_Pr	0.0556600	1.0340000
R_Tet	0.0793100	1.9190000

7.3 Risultati Flexible

Tabella 7.7: Risultati Flexible schiacciamento.

Flexible 1 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	4.5668270	9.2999290
H_Tet	2.6112600	3.5991560
R_Pr	3.3354840	5.5999550
R_Tet	2.6620420	3.6979700

Flexible 2 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	20.7811100	21.9999830
H_Tet	4.5362650	3.4992110
R_Pr	11.3767800	11.5987640
R_Tet	4.6452980	3.4987260

Flexible 4.4 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	41.1110800	11.9995700
H_Tet	11.3160900	4.6998610
R_Pr	40.3967000	13.5982510
R_Tet	11.5292000	4.5992300

Flexible 7.5 m/s		
	Max schiacciamento [mm]	Istante max schiacciamento [ms]
H_Pr	42.5272400	6.2995960
H_Tet	29.9603100	7.9998440
R_Pr	42.5339700	6.3989580
R_Tet	28.6750000	7.4991090

Tabella 7.8: Risultati Flexible reazioni vincolari.

Flexible 1 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	0.4048240	1.3530100	2.2993400
H_Tet	2.3583400	2.3702600	3.2991700
R_Pr	0.8862950	1.5318000	2.6975500
R_Tet	2.3602300	2.3836300	3.3988600

Flexible 2 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	0.3826060	1.6570700	1.2998400
H_Tet	3.6734600	3.7342400	3.1992000
R_Pr	0.6733340	1.7565800	1.4986500
R_Tet	3.6324800	3.6529400	3.2998600

Flexible 4.4 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	14.2207000	14.2894000	12.0216000
H_Tet	3.8158000	5.0417900	2.0739900
R_Pr	4.7962700	4.8175100	13.5284000
R_Tet	4.4243200	4.8439800	2.2393800

Flexible 7.5 m/s			
	Forza istante max schiacciamento [kN]	Forza picco [kN]	Istante picco [ms]
H_Pr	89.5066000	89.5066000	6.2996000
H_Tet	3.8751800	5.5182800	1.2995700
R_Pr	77.2185000	82.1051000	6.4996100
R_Tet	4.1660500	5.0490500	1.3983000

Tabella 7.9: Risultati Flexible stress e strain negli elementi beam.

Flexible 1 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0234700	0.1330000
H_Tet	0.0245800	0.0532900
R_Pr	0.0284500	0.1815000
R_Tet	0.0172200	0.0185400

Flexible 2 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0362200	0.3459000
H_Tet	0.0367000	0.1581000
R_Pr	0.0485500	0.0681800
R_Tet	0.0241100	0.0942300

Flexible 4.4 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0889700	1.8620000
H_Tet	0.0622000	0.9215000
R_Pr	0.0824700	1.6240000
R_Tet	0.0639400	1.0590000

Flexible 7.5 m/s		
	Max beam effettive stress (v-m) [GPa]	Max beam strain
H_Pr	0.0952000	2.1580000
H_Tet	0.0981800	1.7940000
R_Pr	0.0886900	1.8750000
R_Tet	0.1110000	2.7660000

Bibliografia

- [1] World Health Organization, «Global status report on road safety 2018: summary,» Geneva: World Health Organization, 2018.
- [2] G. Dosi, «L'uso dei dispositivi di sicurezza in Italia. I dati del Sistema Ulisse,» 2011.
- [3] A. Pitidis, G. Fondi, M. Giustini e F. Taggi, «Aspetti sanitari della sicurezza stradale (Progetto Datis - II rapporto),» Istituto Superiore di Sanità, Roma, 2003.
- [4] F. Servadei, C. Begliomini, E. Gardini, M. Giustini, F. Taggi e J. Kraus, «Effect of Italy's motorcycle helmet law on traumatic brain injuries,» *Injury Prevention*, vol. 9, p. 257–260, 2003.
- [5] F. Tagliaferri, C. Compagnone e F. Servadei, «Inquadramento del trauma cranico e cenni di terapia medica e chirurgica,» in *Salute e Sicurezza Stradale: l'Onda Lunga del Trauma*, F. Taggi e P. Marturano, A cura di, Roma, C.A.F.I. Editore, 2007, pp. 281-292.
- [6] Nucleus Medical Art Inc., *Whiplash - Chiuso lesione alla testa con conseguente lesione cerebrale*, Nucleus Medical Media Inc / Alamy Foto Stock, 01/02/2001.
- [7] G. Teasdale e B. Jennett, «Assessment and prognosis of coma after head injury,» *Acta Neurochirurgica, The European Journal of Neurosurgery*, vol. 34, p. 45–55, 03 1976.
- [8] E. D. Bigler, «Systems Biology, Neuroimaging, Neuropsychology, Neuroconnectivity and Traumatic Brain Injury,» *Frontiers in Systems Neuroscience*, 09 08 2016.
- [9] D. Horne e M. Kachmann, Mayfield Clinic, Cincinnati, Ohio, 07 2018. [Online].
- [10] «History of Vintage Motorcycle Helmets,» Theblackdouglas.com, 16 12 2016. [Online].
- [11] R. Losada, «“No quitar en caso de accidente” ENTREGA I: Historia del CASCO de moto,» <http://hittheroadmotoblog.blogspot.com>. [Online].
- [12] H. P. Roth e C. F. Lombard, «Crash Helmet». Stati Uniti Brevetto 2,625,683, 20 01 1953.
- [13] Schubert, «La storia dei nostri caschi - SCHUBERTH,» www.schubert.com, 2018. [Online].
- [14] M. Gentili, «ECE 22-06: come saranno fatti i caschi del futuro,» *Dueruote*, 16 01 2018.
- [15] Coordinamento Italiano Motociclisti, «Abbigliamento omologato: facciamo chiarezza, quinta puntata,» <http://www.cim-fema.it>, 18 02 2015. [Online].
- [16] Nolan, «Una storia di sicurezza e qualità,» www.nolan.it. [Online].

- [17] MotoPier, «Omologazione caschi per moto la guida definitiva,» <https://www.motopier.it>, 14 05 2016. [Online].
- [18] Schubert, «R2 Carbon,» www.schubert.com. [Online].
- [19] Schubert, «SCHUBERTH O1,» www.schubert.com. [Online].
- [20] «Tucano urbano El' mettin I serie blu opaco casco,» <http://motocharlietrieste.it>. [Online].
- [21] «Casco per moto da cross quad motard WinNet,» www.ebay.it. [Online].
- [22] FortNine, «Types of Motorcycle Helmets,» <https://fortnine.ca>. [Online].
- [23] Nolan, «N40-5 GT,» www.nolan.it. [Online].
- [24] Motorcycle Safety Foundation, «Cycle Safety Information,» [Online].
- [25] Arai Helmet, «Real World Protection - Outer shell,» <http://www.arai.bg>. [Online].
- [26] Ashok Kumar Parthipan, «What are the materials used in making helmets?,» Indian Institute of Technology, Delhi, 2017. [Online].
- [27] WhiteDogBikes, «Different Motorbike Helmet Buckles,» <https://www.whitedogbikes.com>, 25 01 2013. [Online].
- [28] Wikipedia, «Casco,» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [29] Centro Superiore Ricerche Prove Autoveicoli e Dispositivi, «Sunto delle prove da effettuare per l'omologazione,» [Online].
- [30] Pinlock®, «WHAT IS A PINLOCK VISOR?,» <https://pinlock.com>, 08 02 2017. [Online].
- [31] Shoei Premium Helmets North America, «INSIDE A SHOEI HELMET,» <https://www.shoei-helmets.com>. [Online].
- [32] SUOMY Motosport s.r.l., «SR Sport Technical features,» <http://www.suomy.com>. [Online].
- [33] Feher Helmets, «Technology,» feherhelmets.com. [Online].
- [34] C. Brown e M. S. Gordon, «Motorcycle Helmet Noise and Active Noise Reduction,» *The Open Acoustics Journal*, vol. 4, pp. 14-24, 2011.
- [35] L. Melita, «Smart Helmet: casco con cancellazione del rumore,» <http://www.hdmotori.it>, 19 10 2015. [Online].
- [36] «Traffic Safety Facts, 2013 data, Motorcycles,» NHTSA's National Center for Statistics and Analysis, 05/2015.

- [37] T. Whyte, T. Gibson, J. Brown, B. Milthorpe e D. Eager:, «Mechanisms of head and neck injuries sustained by helmeted motorcyclists in NSW, Australia.,» n. 15-0332, pp. 1-9.
- [38] S. Kalpakjian e S. R. Schmidt, Tecnologia Meccanica, seconda edizione italiana, Pearson, 2014.
- [39] M. L. De Giorgi, Polimeri parte 2 - Appunti del Corso di laurea in Optica e Optometria, Università del Salento, 2014.
- [40] I fluidi viscosi, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [41] Polymer Properties Database, «Flow properties of polymers,» Crow, 2015. [Online].
- [42] Wikipedia, «Dilatante,» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [43] L. Torre, Necking e Yielding - Proprietà meccaniche dei polimeri - Dispense del Corso Tecnologie dei materiali polimerici, Università degli Studi di Perugia, A.A. 2015/2016.
- [44] G. Lucchetta, Dispense del Corso Tecnologie di lavorazione dei materiali aerospaziali (IN01122782), Università degli Studi di Padova, A.A. 2017/2018.
- [45] Wikipedia, «Policarbonato,» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [46] Wikipedia, «Acrilonitrile butadiene stirene (ABS),» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [47] FortNine, «Materials Used in Motorcycle Helmets,» <https://fortnine.ca>. [Online].
- [48] C. Baldi, «Il casco. Seconda parte: la calotta esterna,» 04 06 2008. [Online].
- [49] L. Melita, «Come nascono i caschi Nolan e X-Lite: il video di HDmotori,» <http://www.hdmotori.it>, 13 07 2015. [Online].
- [50] Wikipedia, «Polistirene,» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [51] Arai Helmet, «Real World Protection - Inner shell,» <http://www.arai.bg>. [Online].
- [52] Wikipedia, «Poliuretano,» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [53] D. de Vries, Characterization of polymeric foams, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering Mechanics of Materials, 07/2009.
- [54] Wikipedia, «Schiuma metallica,» <https://it.wikipedia.org>. [Online].
- [55] M. Girardi e C. Grassini, Caratterizzazione fisico-meccanica di polistirene espanso per il settore alimentare, Università degli Studi di Brescia: Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Chimica e Fisica per l'Ingegneria e per i Materiali, Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali, A.A. 2005/2006.
- [56] K. Norris e S. Tiernan, «An analysis of the performance of foams used in hurling helmets,» Dublino, Irlanda, 05/2008.

- [57] L. J. Gibson e M. F. Ashby, *Cellular Solids, Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1997.
- [58] R. Juntikka e S. Hallström, *Selection of Energy Absorbing Materials for Automotive Head Impact Countermeasures*, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 15/10/2004.
- [59] S. Ouellet, D. Cronin e M. Worswick, «Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions,» *Polymer Testing*, p. 731–743, 15 maggio 2006.
- [60] Y. Ma, X. Su, R. Pyrz e J. Rauhe, «A novel theory of effective mechanical properties of closed-cell foam materials,» in *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. Vol. 26, Wuhan, China, AMSS Press, 12/2013.
- [61] V. Deshpande, M. Ashby e N. Fleck, «Foam topology bending versus stretching dominated architectures,» *Acta Materialia*, vol. 49, p. 1035–1040, 2001.
- [62] M. Scheffler e P. Colombo, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [63] Carbon, «Carbon lattice innovation — the adidas story,» <https://www.carbon3d.com>, 14 04 2018. [Online].
- [64] 3D ADEPT MEDIA, «3D ADEPT MAG - CASE STUDY & TEST,» n. dicembre, 2017.
- [65] A. Škrlec e J. Klemenc, «Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays,» *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 62, pp. 220-230, 4 2016.
- [66] LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, «Material Model 3: Elastic Plastic with Kinematic Hardening,» in *LS-DYNA® Theory Manual*, Livermore, California, 20/02/2019.
- [67] S. F. Khosroshahi, S. Tsampas e U. Galvanetto, «Feasibility study on the use of a hierarchical lattice architecture for helmet liners,» *Materials Today Communications*, n. 14, pp. 312-323, 07 02 2018.
- [68] Formlabs, «Usò della resina Durable,» support.formlabs.com, 2019. [Online].
- [69] Plural Additive Manufacturing, «TPU,» pluralam.com. [Online].
- [70] Formlabs, «Utilizzo della resina Flexible,» support.formlabs.com, 2019. [Online].
- [71] M. Mohsenizadeh, F. Gasbarri, M. Munther, A. Beheshti e K. Davami, «Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption,» *Materials and Design*, n. 139, pp. 521-530, 2018.

[72] LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, «Contact in LS-DYNA,» 2003. [Online].

[73] LS-DYNA Support, «Tutorials - Contact Modeling in LS-DYNA - Contact types,» <https://www.dynasupport.com>. [Online].