



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Ottimizzazione di strutture a lattice per problemi d'impatto

Laureando:
Nicolò Fantinato

Relatore:
Prof. Ugo Galvanetto
Correlatore:
Ing. Siamak F.Khosroshahi

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

Indice

Abstract	1
Introduzione	3
1 Obiettivi e motivazioni	5
1.1 Gli incidenti in moto in Italia	7
1.2 Lesioni conseguenti agli incidenti in moto	9
1.3 Le strutture a lattice	12
1.3.1 Design delle celle	13
1.3.2 Design del pattern	14
1.3.3 Considerazioni sulle strutture a lattice	14
2 Il casco motociclistico	17
2.1 Tipologie di caschi	19
2.2 Riferimenti normativi dei test per l'omologazione	20
2.2.1 La ECE 22.05	21
2.2.2 Confronto ECE - Snell	24
2.2.3 La ECE 22.06	25
2.2.4 Etichetta omologativa	26
2.2.5 La procedura di fabbricazione	27
3 Studi precedenti	29
4 Il modello agli elementi finiti	33
4.1 Riferimenti	33
4.2 Il provino multistrato	34
4.3 Tipologie di impatto indagate	36
4.4 Modellazione FE	37
4.4.1 Materiali impiegati	40
4.4.2 Il nylon 6	42
4.4.3 L'EPS	44

5	Impatto verticale	47
5.1	Densità relativa	47
5.2	Descrizione del fenomeno d'impatto	49
5.3	Casi scartati	51
5.4	Energia assorbita	53
5.5	Forze trasmesse	59
5.5.1	Effetto della sensibilità del materiale alla velocità di deformazione	63
5.6	Materiale coinvolto nell'impatto	64
5.7	Influenza dello spessore del top sheet	66
6	Impatto obliquo	73
6.1	Modello FE	73
6.2	Analisi risultati	74
6.3	Energia assorbita	75
6.4	Forze trasmesse	77
7	Impatto sul bordo	83
7.1	Modello FE	83
7.2	Analisi risultati	84
7.3	Energia assorbita	86
7.4	Forze trasmesse	87
8	Limiti del modello	95
9	Conclusioni	99
	Bibliografia	101

Elenco delle figure

1.1	Comparazione percentuale tra le lesioni in moto per motociclisti che indossano, o non indossano, il casco [6].	7
1.2	Dinamica delle <i>closed head injuries</i> : al momento dell'impatto il cervello subisce un trauma nella zona direttamente colpita, ma, un istante dopo, subisce un contraccolpo andando a sbattere contro il cranio dal lato opposto a quello colpito [8].	9
1.3	Sequenza temporale dei movimenti che causano lesioni al collo [12].	11
1.4	Categorie di solidi cellulari [13].	13
1.5	Schema di un <i>direct patterning</i> come quello utilizzato qui [13].	14
1.6	Celle poliedriche tridimensionali che soddisfano, o meno, il criterio di Maxwell [14].	15
1.7	Tipiche curve tensione-deformazione per strutture a lattice stretch-dominated (<i>a</i>) e bending-dominated (<i>b</i>) [13].	16
2.1	Schema di un casco con indicate le sue parti costruttive [20].	18
2.2	Identificazione dei punti d'impatto per i test omologativi secondo lo standard ECE 22.05 [20].	22
2.3	Esempio di etichetta caratterizzante un casco omologato secondo la ECE 22.05 [20].	27
3.1	Schema riassuntivo delle considerazioni scaturite dagli studi condotti sulle strutture a lattice.	32
4.1	Modello agli elementi finiti della configurazione Cub 5 oggetto di studio.	34
4.2	Forma delle celle delle strutture a lattice analizzate in questo documento: prismatiche, piramidali a base quadrata e, in azzurro, ottaedriche.	35
4.3	Esempio di caduta da una motocicletta durante una gara di MotoGP.	36

4.4	Configurazioni delle strutture a lattice studiate nel presente documento.	37
4.5	Effetto della velocità di deformazione sulla curva tensione-deformazione del nylon [56].	41
4.6	Grafici caratterizzanti il comportamento del nylon 6 soggetto a prova di compressione monoassiale [53].	42
4.7	Curva tensione-deformazione a compressione tipica del polistirene espanso [59].	45
5.1	Sezione di una cella prismatica (in alto) e cella elementare piramidale (in basso), con le rispettive dimensioni.	49
5.2	Schema delle varie fasi caratterizzanti la dinamica dell'impatto [54].	50
5.3	Profondità di penetrazione dell'impattatore nel provino per differenti velocità iniziali, nel caso di impatto verticale centrale.	52
5.4	Andamento della profondità di penetrazione del liner rispetto alla densità relativa dello stesso. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	53
5.5	Andamento delle varie forme di energia dei componenti costituenti il provino; si nota come l'errore numerico dovuto al failure degli elementi beam faccia assumere alle energie interne valori completamente errati.	55
5.6	Andamento dell'energia cinetica dell'impattatore nel caso di urto verticale centrale.	56
5.7	Efficienza di assorbimento energetico del liner in funzione della sua densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s; quelle orizzontali indicano la massima energia che può essere assorbita.	57
5.8	Forza trasmessa per impatto a 7.5 m/s in presenza e in assenza del liner in struttura a lattice.	59
5.9	Forza verticale trasmessa al layer inferiore.	61
5.10	Forza trasmessa in funzione della velocità d'impatto nei vari casi analizzati.	62
5.11	Forza trasmessa in funzione della densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	62

5.12	Comparazione tra gli andamenti nel tempo della forza trasmessa da un liner in EPS (linee continue) e uno in struttura a lattice (linee tratteggiate), per impatto verticale centrale a 7.5 m/s.	63
5.13	Comparazione delle forze trasmesse al layer inferiore per modello costitutivo poco sensibile alla velocità di deformazione (casi A) e per modello costitutivo reale (casi B).	65
5.14	Valori della tensione di Von Mises (in GPa) durante la deformazione della struttura a liner causata dal fenomeno d'impatto per le configurazioni Cub 5 (a sinistra) e Tet 5 (a destra).	67
5.15	Andamento della forza trasmessa al layer inferiore al variare dello spessore del top sheet per impatto verticale centrale.	69
5.16	Stato tensionale di Von Mises (valori in GPa) del top sheet al variare del suo spessore per impatto verticale centrale a 7.5 m/s. Fig. <i>a-d</i> : spessore 0.05 mm; Fig. <i>e-h</i> : 0.1 mm; Fig. <i>i-l</i> : 0.2 mm; Fig. <i>m-p</i> : 0.3 mm; Fig. <i>q-t</i> : 0.4	71
6.1	Modello del provino soggetto ad impatto centrale obliquo.	74
6.2	Andamento della profondità di penetrazione del liner rispetto alla densità relativa dello stesso. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	75
6.3	Profondità di penetrazione dell'impattatore nel provino per differenti velocità iniziali, nel caso di impatto centrale obliquo.	76
6.4	Andamento dell'energia cinetica dell'impattatore nel caso di impatto centrale obliquo.	78
6.5	Efficienza di assorbimento energetico del liner in funzione della sua densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s; le linee orizzontali indicano l'energia iniziale dell'impattatore, ovvero la quantità massima di energia che può essere assorbita.	79
6.6	Forza trasmessa in funzione della densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	79
6.7	Forza trasmessa al layer inferiore per impatto centrale obliquo.	81
6.8	Comparazione tra gli andamenti nel tempo della forza trasmessa da un liner in EPS (linee continue) e uno in struttura a lattice (linee tratteggiate), per impatto centrale obliquo a 7.5 m/s.	82

7.1	Modello del provino soggetto ad impatto verticale sul bordo. . .	84
7.2	Profondità di penetrazione dell'impattatore nel provino per differenti velocità iniziali, per impatto verticale sul bordo. . . .	85
7.3	Andamento della profondità di penetrazione del liner rispetto alla densità relativa dello stesso. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	86
7.4	Andamento dell'energia cinetica dell'impattatore nel caso di impatto verticale sul bordo.	88
7.5	Efficienza di assorbimento energetico del liner in funzione della sua densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	89
7.6	Forza trasmessa in funzione della densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.	89
7.7	Forza trasmessa al layer inferiore nel caso di impatto verticale sul bordo.	90
7.8	Comparazione tra gli andamenti nel tempo della forza tra- smessa da un liner in EPS (linee continue) e in struttura a lattice (linee tratteggiate), per impatto verticale sul bordo a 7.5 m/s.. . . .	91

Elenco delle tabelle

1.1	Frequenza della tipologia di lesione e della parte del corpo interessata in seguito ad incidente motociclistico [9].	10
4.1	Tabella contenente i parametri usati per la modellazione dei corpi rigidi.	39
4.2	Tabella contenente i parametri usati per la modellazione dell'alluminio con comportamento di Johnson-Cook semplificato.	41
4.3	Tabella contenente i parametri usati per la modellazione del nylon 6 con formulazione di Cowper-Symonds.	43
4.4	Riassunto dei materiali e delle rispettive proprietà utilizzate nella modellazione del provino multistrato.	43
4.5	Densità degli EPS equivalenti alle strutture a lattice studiate.	45
5.1	Densità relative delle strutture a lattice analizzate.	48
5.2	Profondità raggiunta dall'impattatore (in mm) nei casi considerati per impatto verticale centrale.	51
5.3	Efficienza (in %) di assorbimento di energia nei casi considerati per impatto verticale centrale.	58
5.4	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) nei casi considerati per impatto verticale centrale.	60
5.5	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) ed efficienza di assorbimento energetico (in %) nei casi considerati, per impatto centrale verticale a 7.5 m/s e modelli costitutivi poco sensibile alla velocità di deformazione (A) e reale (B).	64
5.6	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) ed efficienza di assorbimento energetico (in %) nei casi considerati per impatto centrale verticale e spessori del top sheet variabili.	68
6.1	Profondità raggiunta dall'impattatore (in mm) nei casi considerati per impatto centrale obliquo.	77

6.2	Efficienza (in %) di assorbimento energetico nei casi considerati per impatto centrale obliquo.	77
6.3	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse x nei casi considerati per impatto centrale obliquo.	80
6.4	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse y nei casi considerati per impatto centrale obliquo.	80
7.1	Profondità raggiunta dall'impattatore (in mm) nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.	92
7.2	Efficienza (in %) di assorbimento energetico nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.	92
7.3	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse x nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.	92
7.4	Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse y nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.	93

Abstract

The aim of this thesis is to verify lattice structures behaviour in several different impact conditions, in order to establish their convenience to be used as a liner for energy absorption in motorcycle helmets. Therefore, a small sample has been reproduced using LS-Dyna software, to represent a simplified model of a helmet section, that is, only made of the outer shell and of the layer aimed to energy absorption in case of accident. This latter layer, traditionally manufactured in expanded polystyrene (EPS), has been substituted by a lattice structure whose cells have been studied for different shapes and dimensions, in order to establish which of these configurations, through their plastic strain, is the best to counteract impact effects. On multilayer samples a steel sphere impacts at several velocities, both on the centre and on the edge, and with different inclinations. The reason why has been chosen to investigate also the oblique impact, is that this one cause the formation of transversal forces, and so accelerations, which, in a motorcycle helmet, turn into torques and rotational accelerations affecting not only the head, but motorcyclist's neck too, often causing serious injuries. After impact, particular attention has been given to these quantities: depth reached by the impactor in the liner, kinetic energy lost by the sphere after the impact, which has, therefore, been absorbed by the lattice structure, and the intensity of forces transmitted to the bottom layer. Then, the quantities above have been compared with those obtained from the simulations of samples with the same size but whose liner is made of equivalent density EPS, such that their mass and those of corresponding lattice structures, are the same. Results obtained show a depth reached by the impactor higher than in the EPS case, a slightly higher amount of energy absorbed, and, especially, a reduction in transmitted forces intensity almost always above 80% compared to values registered by polystyrene. An unexpected result has been this remarkable difference of transmitted forces, which, for almost all lattice structure configurations, are one or two orders of magnitude smaller than those obtained from EPS models. It hasn't been possible, however, to compare such values to current standard's limits because of the differences between test modalities used in

the present work and those established by the regulation, although, obtained results let believe that lattice structures could bring to a remarkable performance improvement of motorcycle helmets.

Introduzione

Nel presente documento di tesi si è voluto verificare il comportamento delle strutture a lattice in diverse condizioni di impatto, al fine di stabilirne la convenienza o meno all'impiego come liner per l'assorbimento energetico nei caschi motociclistici. Un provino di dimensioni limitate è stato, quindi, realizzato con l'ausilio del software LS-Dyna, a rappresentare un modello semplificato di una porzione di casco, composto, cioè, solamente dalla calotta esterna e dal layer preposto all'assorbimento energetico in caso di incidente. Quest'ultimo strato, tradizionalmente fabbricato in polistirene espanso sintetizzato (EPS), è stato sostituito con strutture a lattice le cui celle sono state studiate con diverse forme e dimensioni, al fine di stabilire quale tra queste configurazioni, attraverso la propria deformazione plastica, sia la migliore per contrastare gli effetti del fenomeno di impatto. Sui provini multistrato così composti, è stata fatta impattare una sfera di acciaio a diverse velocità, sia centralmente sia sul bordo, e con diverse angolazioni. La ragione alla base della scelta di indagare anche gli effetti dell'impatto obliquo è che questo causa l'instaurarsi di forze, e quindi di accelerazioni, trasversali, che, in un casco motociclistico, si traducono in momenti e accelerazioni rotazionali che vanno a colpire non solo la testa, ma anche il collo del motociclista, causando lesioni spesso importanti. Le grandezze conseguenti l'impatto sulle quali ci si è soffermati particolarmente in questo lavoro, sono state la profondità raggiunta dall'impattatore nel liner, l'energia cinetica persa dalla sfera in seguito al fenomeno d'impatto che, quindi, è stata assorbita dalla struttura a lattice, e l'entità delle forze trasmesse al layer inferiore del provino. Questi valori sono poi stati confrontati con quelli derivanti dalla simulazione di provini di uguali dimensioni ma il cui liner è costituito da EPS di densità equivalente, ovvero tali per cui la loro massa sia la medesima del liner con la corrispondente struttura a lattice considerata. I risultati ottenuti mostrano una profondità di penetrazione raggiunta molto superiore al caso dell'EPS, una quantità di energia assorbita leggermente maggiore, e, soprattutto, una riduzione dell'intensità delle forze trasmesse quasi sempre di oltre l'80% rispetto ai valori registrati per il polistirene. Un risultato inatteso è stato

proprio questa notevole differenza di forze trasmesse che, per quasi tutte le configurazioni a lattice, sono uno o due ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle ottenute dai modelli in EPS. Non è stato possibile, tuttavia, comparare tali valori con i limiti imposti dagli standard attuali a causa della differenza tra le modalità di test condotte in questo lavoro e quelle stabilite dalle norme, sebbene, stando ai risultati ottenuti, si ritenga che le strutture a lattice possano portare ad un notevole miglioramento delle performance protettive dei caschi motociclistici.

Capitolo 1

Obiettivi e motivazioni

Il problema dell'assorbimento dell'energia derivante da un impatto è da anni studiata in ambito ingegneristico a causa della varietà di applicazioni in cui si rende necessaria, dall'industria automotive, all'aeronautica, ai trasporti, ai dispositivi di protezione individuale, siano essi rivolti allo sport o alla sicurezza sul luogo di lavoro. Non è, tuttavia, possibile individuare una soluzione univoca per ognuno dei sopracitati ambiti a causa della notevole differenza delle variabili coinvolte nei diversi scenari, come ad esempio le velocità degli oggetti impattanti o la loro massa. Ecco che, allora, la vastità di casistiche riscontrabili ha fatto sì che gli studi condotti si siano focalizzati di volta in volta su determinate situazioni particolari, con l'obiettivo di trovare la migliore soluzione a quel determinato problema, trascurando gli altri scenari; in tal modo le varie tipologie di casco si sono sviluppate con forme e materiali differenti a seconda dell'ambito di impiego.

Il presente documento si pone l'obiettivo di analizzare il comportamento di strutture a lattice al fine di verificarne la migliore capacità di assorbimento energetico rispetto al tradizionale polistirene espanso (EPS), che costituisce i liner dei caschi motociclistici. Gli scenari tipicamente riscontrabili in caso di incidenti stradali coinvolgenti motociclisti prevedono che questi vadano ad impattare contro oggetti fermi quali asfalto, muri, marciapiedi o altri elementi di arredo urbano, oppure contro altri veicoli in marcia; in tutti i casi la velocità della moto è spesso elevata, e, se lo scontro avviene con un altro veicolo, la velocità relativa aumenta ulteriormente l'intensità dell'impatto. Si tratta, perciò, nella quasi totalità dei casi, di impatti ad elevata energia.

Molti studi in Italia e nel mondo hanno dimostrato l'efficacia e l'importanza del casco nel ridurre le lesioni, spesso fatali, in caso di incidente stradale ([1][2][3]). Ogni anno l'Istat e l'ACI riportano oltre 170.000 incidenti stradali con lesioni a persone, e circa il 24% di questi coinvolge motociclisti, i quali hanno un indice di mortalità di circa 1.5 ogni 100 mezzi coinvolti, contro un

0.66 per le auto. Questi numeri potrebbero essere molto più elevati nel caso non si indossi il casco, dato che questo dispositivo di protezione individuale si stima riduca la probabilità di lesioni alla testa del 60%, e di lesioni mortali del 56% [4].

In generale, si vuole che il casco assorba la maggior quantità di energia possibile con la minore massa possibile, così da ridurre l'aumento di inerzia che la testa subisce quando lo si indossa, nonché che riduca l'accelerazione rotazionale a cui viene sottoposto il collo al momento dell'impatto. Gli scenari che si possono presentare sono molteplici e difficilmente si riesce a tenerli in considerazione tutti in fase di progettazione, e allora ci si concentra sulla casistica statisticamente più probabile, ovvero, nel casco di caschi motociclistici, ad impatti ad energia medio-elevata. Una sfida nella costruzione dei caschi è quella di riuscire a garantire contemporaneamente protezione contro collisioni che coprono un range energetico abbastanza ampio.

Infatti, solitamente la fabbricazione e lo scopo del casco di protezione sono differenti a seconda dell'impiego proprio perché differenti sono i carichi e le velocità in gioco, e, di conseguenza, l'entità degli impatti. Quelli per uso sportivo devono essere in grado di assorbire impatti a bassa energia e possibilmente ripetuti nel tempo, sia nello stesso punto sia in punti diversi, mantenendo comunque la loro capacità protettiva; per fare un esempio di questi, si pensi agli elmetti per sport come l'equitazione o, ancor meglio, il football americano. Generalmente devono poi essere ben aerati e il fatto che possano essere usati ripetutamente implica che l'energia che assorbono sia di tipo elastico per non perdere la forma; ecco che, allora, per tali applicazioni si usano schiume flessibili. Gli elmetti per la protezione da caduta di carichi accidentali nei cantieri sono a loro volta diversi, la calotta è molto rigida e lo strato per l'assorbimento di energia è molto limitato. Ancora, quelli per uso motociclistico proteggono contro urti altamente energetici e funzionano una sola volta, in quanto l'energia viene assorbita attraverso la deformazione plastica del liner; dopo l'impatto, infatti, bisogna sostituire il casco danneggiato.

Anche se di forma, tipologia e per applicazioni diverse, scopo di tutti i caschi è la protezione della testa della persona che li indossa attraverso l'assorbimento della maggior quantità possibile di energia generata nell'impatto, evitando, o comunque diminuendo, l'entità delle lesioni alle quali è possibile incorrere in seguito a cadute accidentali.

Comparata con i metodi analitici e sperimentali, l'analisi numerica permette un approccio più veloce, più conveniente, e meno costoso, ed è perciò il metodo preferito nei problemi di ottimizzazione come quello qui svolto, in cui si analizzano diverse architetture di struttura a lattice al fine di trovare quella il cui comportamento risulta migliore in caso di impatto.

1.1 Gli incidenti in moto in Italia

L'uso dei veicoli a due ruote come mezzo di trasporto alternativo all'automobile, più veloce ed economico negli spostamenti, soprattutto nelle aree urbane, ha indotto l'Istat (Istituto nazionale di statistica) ad approfondire l'analisi dell'incidentalità che vede coinvolta questa tipologia di veicolo. Nel seguito si presenta una sintesi delle indagini statistiche svolte negli ultimi anni.

Nel 2010 gli incidenti stradali rilevati in Italia in cui vi sono state lesioni a persone ed è stato coinvolto un ciclomotore o un motociclo, sono stati 71.108 [5]. Essi hanno causato il decesso di 1.244 persone e il ferimento di 84.548 persone. Rispetto al totale degli incidenti stradali che avvengono in Italia, il 34% di questi vede coinvolto un veicolo a due ruote, e una vittima su tre di incidente stradale mortale, perde la vita in circostanze in cui è stato coinvolto un motoveicolo. Inoltre, nelle grandi città più della metà degli incidenti che avvengono vede coinvolto un motociclo.

Il periodo in cui si verifica il maggior numero di incidenti dei veicoli a due ruote, come ogni anno, è il mese di luglio (9.326 in valore assoluto), mentre l'indice di mortalità risulta, invece, più elevato nel mese di agosto (2.5 morti ogni 100 incidenti), come è prevedibile essendo i mesi estivi quelli in cui si ha il maggiore utilizzo dei veicoli a due ruote.

Per quanto riguarda le modalità, la maggior parte degli incidenti stradali in cui è coinvolto un veicolo a due ruote avviene

tra due o più veicoli (80% dei casi), mentre i restanti casi (20%) riguardano sinistri in cui è coinvolto un veicolo a due ruote isolato. Nell'ambito degli incidenti tra veicoli, la tipologia più diffusa è lo scontro frontale-laterale (40.8% dei casi), seguita dallo scontro laterale (18.1% dei casi).

I numerosi interventi legislativi in materia di sicurezza stradale, nonché l'adozione di nuove tecnologie volte al miglioramento della sicurezza dei veicoli e alla realizzazione di infrastrutture stradali più sicure, hanno permesso all'Italia di giungere ad una riduzione della mortalità di tutti gli utenti della strada; riduzione che risulta, tuttavia, più contenuta nel caso degli incidenti con motoveicoli. Infatti, rispetto all'obiettivo fissato dall'UE nel Libro Bian-

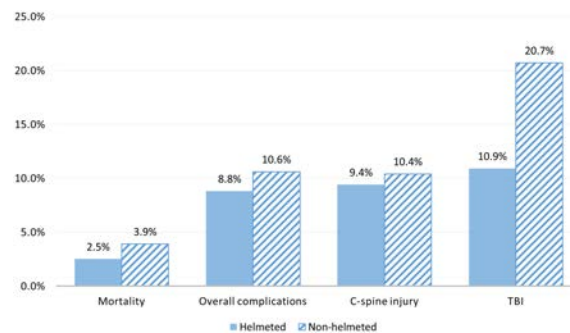


Figura 1.1: Comparazione percentuale tra le lesioni in moto per motociclisti che indossano, o non indossano, il casco [6].

co del 2001, che prevedeva la riduzione della mortalità del 50% entro il 2010 per l'incidentalità stradale nel complesso, l'Italia ha raggiunto una diminuzione del 42.4% del numero dei morti. Analizzando l'andamento del numero dei morti che si è avuto nello stesso periodo, per gli incidenti in cui sia stato coinvolto almeno un motoveicolo, la riduzione risulta solamente del 19.2%.

I più recenti dati disponibili sono quelli relativi al 2016; durante questo anno si sono verificati, sempre in Italia, 175.791 incidenti stradali con lesioni a persone (di cui 19.911 coinvolgenti motociclisti) che hanno provocato 249.175 feriti e 3.283 vittime. Di queste ultime, si sono registrati 1.470 decessi tra conducenti e passeggeri di autovetture, seguono motociclisti (657), pedoni (570), ciclisti (275), occupanti di autocarri e motrici (136), ciclomotori (116) e altre modalità di trasporto (59). Rispetto all'anno precedente, tra le vittime sono in aumento i ciclisti (275, +9.6%) e i ciclomotoristi (116, +10.5%), stabili gli automobilisti deceduti (1.470, +0.1%) mentre risultano in calo motociclisti (657, -15.0%) e pedoni (570, -5.3%). Sebbene il numero di vittime più alto sia quello tra gli automobilisti, in proporzione l'indice di mortalità è molto più alto tra le altre categorie di utenti che, ovviamente, risultano più vulnerabili, quali pedoni e utilizzatori di veicoli a due ruote, motorizzati o meno; questi soggetti sono, infatti, molto più esposti di altre tipologie di utenti in quanto non hanno protezioni esterne, come l'abitacolo di un veicolo. Questi utenti vulnerabili rappresentano nel complesso quasi il 50% dei morti sulle strade, di cui il 20% è rappresentato dai motociclisti; ecco che, quindi, il casco deve essere il più efficace possibile.

Nell'ambito dei comportamenti errati di guida, la distrazione, il mancato rispetto delle regole di precedenza e la velocità troppo elevata, sono le prime tre cause di incidente (escludendo il gruppo residuale delle cause di natura imprecisata). I tre gruppi costituiscono complessivamente il 41.5% dei casi, di cui il 10.5% riguarda l'eccesso di velocità.

Con riferimento al Veneto [7], nel 2016 si sono verificati 14.034 incidenti stradali, che hanno causato la morte di 344 persone e il ferimento di altre 19.142. Rispetto al 2015, sono aumentati sia gli incidenti (+1.2%) che i morti (+9.2%), mentre il numero delle persone che hanno subito lesioni in un incidente è rimasto sostanzialmente stabile (-0.1%). I dati medi nazionali hanno registrato un +0.7% per gli incidenti, -4.2% per i morti e +0.9% per i feriti. Le fatalità occorse in sella a motocicli nella regione Veneto sono state il 19.5% (in accordo col 20% della media nazionale) a cui si aggiunge un 3% circa dovuti ai ciclomotori.

Anche qui, la maggior parte degli incidenti stradali avviene tra due o più veicoli (74.6%), e la tipologia di incidente più diffusa è lo scontro frontale-laterale (5.124 casi, 78 vittime e 7.032 feriti), seguita dal tamponamento (2.626 casi, 39 decessi e 4.149 persone ferite). La tipologia più pericolosa è lo

scontro frontale (7.8 decessi ogni 100 incidenti), seguono l'urto con ostacolo accidentale (5.5) e la fuoriuscita del veicolo (4.3).

Stando a questi dati, dunque, i miglioramenti apportabili ai caschi motociclistici sono sempre di più una necessità, oltre che una naturale evoluzione verso dispositivi sempre più prestanti che mirano a ridurre al minimo le conseguenze alla salute derivanti dagli incidenti stradali.

1.2 Lesioni conseguenti agli incidenti in moto

I traumi che si possono verificare in seguito ad un incidente motociclistico possono riguardare tutte le parti del corpo, ma attenzione particolare è rivolta ad uno degli organi più importanti dell'essere umano, il cervello.

Oltre alle lesioni esterne, visibili ad occhio nudo, un impatto dovuto ad un incidente o ad una caduta può provocare anche tutta una serie di patologie, più o meno gravi a seconda delle dinamiche dell'impatto stesso, che rientrano sotto il nome di trauma cranico (*Traumatic Brain Injury (TBI)*). Il trauma cranico rappresenta una delle principali cause di morte e di disabilità in tutto il mondo, soprattutto nei bambini e negli adulti più giovani [2].

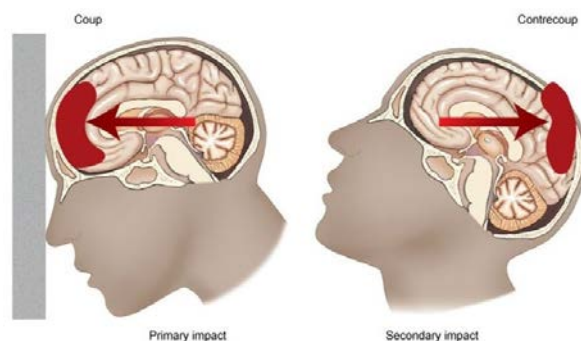


Figura 1.2: Dinamica delle *closed head injuries*: al momento dell'impatto il cervello subisce un trauma nella zona direttamente colpita, ma, un istante dopo, subisce un contraccolpo andando a sbattere contro il cranio dal lato opposto a quello colpito [8].

Il trauma cranico è definito come una lesione fisica al cervello senza la presenza di frattura cranica (*Closed Head Injury*, in contrasto con i casi in cui avviene penetrazione del cranio, caso denominato *Open Head Injury*), ed è una tra le più frequenti e gravi cause di alterazione neurologica. Si verifica quando una forza esterna, o una accelerazione, causano un trauma al cervello, il quale può provocare sintomi fisici, cognitivi, sociali, emozionali e comportamentali che possono verificarsi nei minuti o nei giorni successivi all'evento traumatico, e la cui prognosi può variare da un recupero completo ad una disabilità permanente o al decesso. Rientrano sotto la categoria di trauma cranico le seguenti patologie:

Tabella 1.1: Frequenza della tipologia di lesione e della parte del corpo interessata in seguito ad incidente motociclistico [9].

Tipo di lesione	Sede della lesione				Totale
	Cranio	Tronco	Arti superiori	Arti inferiori	
Contusioni - Escoriazioni	54.8%	77.9%	78.6%	68.8%	70.3%
Fratture - Emorragie	42.3%	15.3%	20.4%	31.2%	27.0%
Emorragie interne	2.9%	6.9%	1.0%	/	2.8%
Totale	100%	100%	100%	100%	100%

- Commozione cerebrale (*mild Traumatic Brain Injury (mTBI)*), è una delle tipologie più frequenti ed è una temporanea perdita delle funzioni neurologiche senza un danno strutturale apparente, spesso risolvibile col riposo fisico e cognitivo, ma che, tuttavia, può comportare complicazioni successive più gravi, soprattutto se i traumi sono ripetuti, come demenza o Parkinson. Generalmente comprende un periodo di incoscienza che può durare da alcuni secondi ad alcuni minuti, oppure può essere lieve e causare solamente vertigini.
- Danno assonale diffuso (*Diffuse Axonal Injury (DAI)*), in cui si verificano estese lesioni agli assoni degli emisferi cerebrali, al corpo calloso o al tronco cerebrale, dovute al sorgere di forze di taglio durante l'impatto. Rappresenta uno dei tipi più comuni e devastanti di trauma cranico [10], ed è una delle principali cause di incoscienza e di stato vegetativo persistente dopo un grave evento traumatico al cranio [11].
- Contusioni (*contusions*), ovvero lesioni senza discontinuità dei tessuti biologici (nel qual caso si parlerebbe di ferita), nella fattispecie ecchimosi, ematomi, abrasioni ed escoriazioni, guaribili facilmente. La persona rimane incosciente per un periodo di tempo considerevole, e, se la lesione è estesa e causa elevata pressione intracranica, può incorrere in danni cerebrali permanenti, invalidità o addirittura morte.
- Concussione (*concussion*), una lesione alla testa che interessa temporaneamente le funzioni cerebrali; sintomi possono includere mal di testa, difficoltà a pensare, ricordare o concentrarsi, nausea, visione offuscata, disturbi del sonno o del comportamento. Alcuni di questi sintomi possono verificarsi immediatamente dopo il trauma, mentre altri possono manifestarsi alcuni giorni dopo, e non è infrequente che perdurino anche per un mese. Le concussioni si stima interessino più di 6 persone

ogni mille ogni anno, quindi è, di fatto, la tipologia di trauma cranico più comune.

- Ematoma subdurale (*Subdural Hematoma (SDH)*), un versamento di sangue che va a localizzarsi nelle meningi, in particolare tra la dura madre e l'aracnoide, cosa che può provocare un aumento della pressione intracranica e quindi una compressione o un danno dei tessuti del cervello. È abbastanza diffusa e la sintomatologia può variare da una semplice nausea, disorientamento, vertigini, a sintomi ben più gravi quali le alterazioni dello stato di coscienza e il coma, oppure, nonostante la rimozione chirurgica, dei danni cerebrali permanenti di varia gravità dovuti principalmente all'effetto massa che l'ematoma stesso ha sul tessuto cerebrale.
- Encefalopatia traumatica cronica (*Chronic Traumatic Encephalopathy (CTE)*), in cui gli urti alla testa interferiscono in modo degenerativo con il metabolismo della cellula nervosa, ed è causata dall'accumularsi nel tempo di concussioni cerebrali. Può causare disturbi comportamentali, del pensiero, e, nel tempo, demenza. Non si verifica in seguito ad incidenti stradali ma piuttosto in soggetti che praticano determinati sport di contatto in cui gli urti alla testa sono numerosi ma a bassa energia.

Nel caso specifico qui analizzato di urti alla testa conseguenti ad incidenti motociclistici, durante il fenomeno di impatto, il cervello, immerso nel liquido cerebrospinale, continua a muoversi per inerzia, andando a sbattere sulla parete interna del cranio e subendo una compressione nella zona d'impatto e una dilatazione nella zona diametralmente opposta, oltre all'instaurarsi di sforzi di taglio in altre regioni. Ecco che, allora, una protezione dalla sola frattura cranica non è sufficiente, dato che l'energia cinetica si converte in energia di deformazione dei tessuti, che, a sua volta, porta a danni cerebrali dovuti all'energia dissipata nel cervello piuttosto che dal casco o dal cranio, e a stress dei tessuti di entità dipendente dall'intensità dell'impatto in termini di forza (e quindi di accelerazione) e di durata temporale di tale fenomeno d'urto.

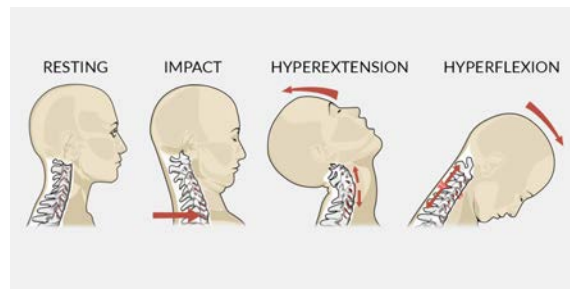


Figura 1.3: Sequenza temporale dei movimenti che causano lesioni al collo [12].

Una ulteriore lesione a cui sono frequentemente soggetti i motociclisti in caso di incidente è anche quella al collo. La forza che viene ad esercitarsi sul casco al momento dell’impatto, infatti, oltre a rischiare di causare le lesioni esposte sopra, può anche creare un momento torcente alla base del cranio tendente a far ruotare la testa; ciò provoca il susseguirsi rapido di una iperestensione dei muscoli del collo, seguita da una violenta iperflessione, cosa che può provocare patologie di natura differente a seconda delle modalità dell’incidente, dalla contrattura dei muscoli paravertebrali, che caratterizza il colpo di frusta, a lesioni ai legamenti, al coinvolgimento osseo (come la frattura di una o più vertebre cervicali nei casi più gravi, o alle dislocazioni vertebrali) e nervoso. In un incidente in moto il carico sul collo generato dalla forza di contatto è generalmente una combinazione di sforzi che dipende dalla posizione del punto di contatto e dalla direzione della forza stessa, dunque in fase di progettazione occorre tenere in considerazione anche gli effetti che l’impatto provoca sul tratto di colonna vertebrale cervicale.

Obiettivo del casco è, dunque, duplice:

1. da una parte si mira a ridurre l’accelerazione subita dalla testa, che a sua volta riduce il picco di forza a cui il cervello è soggetto, e, quindi, anche il momento generato sul collo;
2. dall’altra è necessario massimizzare l’energia assorbita dal casco così da minimizzare la quota di energia trasmessa all’encefalo, che quindi è soggetto a stress minori, riducendo, così, la probabilità di incorrere in lesioni e patologie gravi.

1.3 Le strutture a lattice

L’avvento delle tecnologie di *additive manufacturing* e il loro perfezionamento negli ultimi anni ha permesso la fabbricazione 3D di componenti dalla forma molto complessa, non eseguibile con le altre tecniche tradizionali, oppure fattibile ma ad un costo molto elevato. Con la fabbricazione additiva, invece, il componente è realizzato layer su layer direttamente da un modello CAD, permettendo una riduzione del tempo intercorrente tra la concezione del pezzo e la sua messa sul mercato, nonché una riduzione dell’energia impiegata nel processo, e una minimizzazione dello spreco di materiale. La flessibilità di questa tecnica permette di utilizzare materiali differenti sullo stesso pezzo (*graduated materials*), e di fabbricare componenti di complessità geometrica senza precedenti, come, per esempio, canali di raffreddamento, strutture a lattice, ecc. Esistono poi diverse tecniche di

fabbricazione additiva, sulle quali non ci si sofferma in questa sede ma le cui caratteristiche influenzano geometria, qualità e dimensioni dei componenti ottenibili; per esempio, nel caso di *Selective Laser Melting (SLM)* la dimensione delle particelle della polvere, le dimensioni dello spot laser, la potenza del laser hanno una diretta influenza sulle dimensioni massime degli elementi della struttura a lattice ottenibili, e, di conseguenza, sulla grandezza delle singole celle, oltre ad avere effetto sulla coesione delle particelle e, quindi, sulle proprietà meccaniche finali.

Una struttura a lattice è una struttura costituita da celle regolari che si ripetono ordinatamente nello spazio secondo un certo schema, e l'esempio più immediato è la struttura cristallina propria dei materiali metallici [13]. Sono leggere a causa dell'elevata porosità e sono in grado di assorbire una grande quantità di energia deformandosi plasticamente.

Le strutture a lattice possono essere costituite da celle bidimensionali o tridimensionali, e questa loro architettura permette che siano viste come un materiale monolitico con le proprie proprietà meccaniche, molte delle quali sono superiori rispetto al materiale di cui sono costituite, caratteristica che ne fa una promettente soluzione in molte applicazioni, come strutture leggere, grazie alla loro alta rigidità e resistenza specifiche, come scambiatori di calore, grazie alla loro estesa area superficiale, come assorbitori di energia, grazie alla capacità di essere sottoposte a grandi deformazioni ad un livello tensionale relativamente basso, come isolatori acustici, per effetto dell'elevata porosità interna.

1.3.1 Design delle celle

La progettazione di una struttura a lattice include il design delle singole celle e quello dello schema ripetitivo delle stesse, il *pattern*.

La cella è il più piccolo elemento ripetitivo costituente e caratterizzante la struttura a lattice. Può essere progettata usando tre metodi:

- metodo *primitive based*, col quale la cella è costituita da geometrie primitive semplici, create con operatori Booleani;

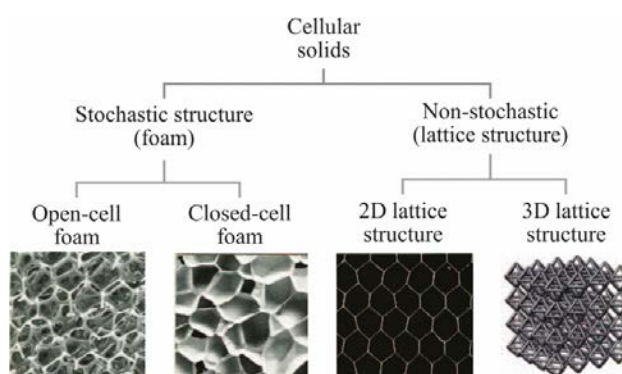


Figura 1.4: Categorie di solidi cellulari [13].

- metodo *implicit surface based*, con cui si definiscono le superfici tridimensionali delle celle mediante la congiunzione degli zeri di equazioni matematiche implicite, i quali costituiscono un array di punti descrittivi la superficie stessa; questo semplice metodo di creazione delle celle, a differenza del primo, permette un controllo parametrico della porosità ottenibile specificando alcuni termini dell'equazione;
- metodo *topology optimization*, con cui la geometria della cella è ottenuta attraverso algoritmi matematici che permettono di ottenere una distribuzione ottimale del materiale.

1.3.2 Design del pattern

La scelta e la progettazione del pattern si riferiscono al modo in cui le celle vengono ripetute nello spazio. Una struttura a lattice può essere creata attraverso un array di celle semplicemente traslate e ripetute uguali (*direct patterning*), oppure attraverso una ripetizione conforme ad una data superficie geometrica (*conformal patterning*), o, ancora, mediante un'organizzazione spaziale della massa, non solo nella singola cella, ma anche lungo tutta la struttura a lattice (*topology optimization*). Per semplicità, nel lavoro di seguito presentato è stata adottata la metodologia *direct patterning*, ovvero le celle sono semplici parallelepipedi ripetuti uguali nello spazio a creare la struttura a lattice; le celle piramidali sono state ottenute da quelle prismatiche tracciandone le diagonali interne.

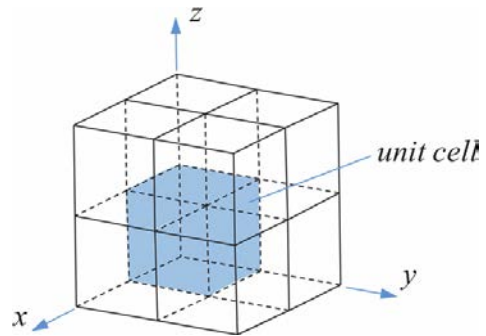


Figura 1.5: Schema di un *direct patterning* come quello utilizzato qui [13].

1.3.3 Considerazioni sulle strutture a lattice

Come già accennato, il comportamento meccanico di una struttura a lattice dipende dal suo materiale, dalla sua architettura, che influenza la distribuzione di materiale, e dalla sua porosità. Il materiale con cui la struttura a lattice è realizzata determina le sue proprietà meccaniche di base, come il modulo di Young, la tensione di snervamento, la sua fragilità, la duttilità, il limite a fatica, ecc. Inoltre, se il materiale è metallico, il trattamento termico può influenzare le sue proprietà meccaniche aumentandone la rigidità,

la tensione di snervamento, o l'abilità di assorbire energia, semplicemente incrementandone la duttilità. Quando un elemento solido viene sostituito da una struttura a lattice, può essere ottenuta maggiore flessibilità meccanica rispetto alle proprietà del solido costituente, proprio grazie all'utilizzo di una distribuzione a lattice.

Dal punto di vista della connessione strutturale della singola cella, il criterio di stabilità di Maxwell permette di determinare la stabilità statica e cinematica della cella stessa se essa viene considerata come un telaio spaziale con giunti senza attrito ([14]). L'equazione di Maxwell assume la forma:

$$M = b - 3j + 6 \quad (1.1)$$

dove b è il numero di elementi *beam* e j il numero di giunti del telaio spaziale. Se $M < 0$ il telaio è instabile e diventa un meccanismo, se invece $M \geq 0$ le giunzioni sono ben vincolate e il telaio diventa rigido. In ambito pratico, se $M < 0$ gli elementi beam tendono a flettere se soggetti ad un carico esterno (*bending-dominated architecture*), mentre con $M \geq 0$ tali elementi sopportano solo sforzi normali, a compressione o a trazione (*stretch-dominated architecture*); in sostanza, se le celle sono costituite da tutte le facce triangolari la struttura mostra comportamento stretch-dominated, altrimenti ha comportamento bending-dominated. Dato che elementi con forma più snella sono più rigidi se soggetti a sforzo normale piuttosto che a flessione, questi due gruppi di strutture a lattice mostrano differenti comportamenti.

L'architettura stretch-dominated ha valori di modulo di rigidezza e snervamento relativamente più alti rispetto ad architetture bending-dominated di pari densità; la curva tensione-deformazione, poi, mostra una regione di deformazione elastica più estesa, raggiungendo tensioni di snervamento più alte prima di un plateau post-snervamento più basso rispetto alle strutture bending-dominated, le quali, invece, hanno una regione elastica più ristretta e tensione di snervamento più bassa, ma sono caratterizzate da un più ampio plateau post-snervamento. Entrambe ad un certo punto entrano in una regione cosiddetta di densificazione, in cui, cioè, il continuo collasso degli elementi beam chiude i pori e causa un incremento repentino dello stress.

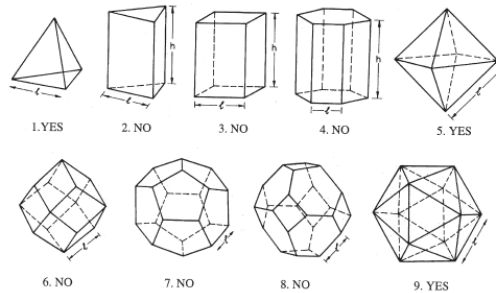


Figura 1.6: Celle poliedriche tridimensionali che soddisfano, o meno, il criterio di Maxwell [14].

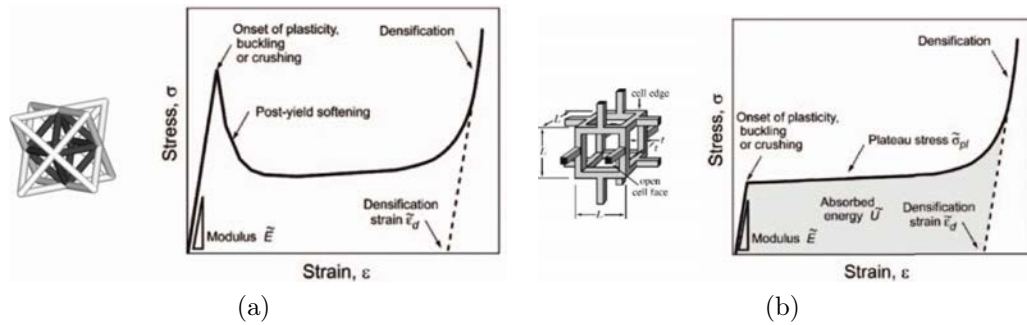


Figura 1.7: Tipiche curve tensione-deformazione per strutture a lattice stretch-dominated (a) e bending-dominated (b) [13].

A causa del loro diverso comportamento meccanico, le strutture stretch-dominated sono adatte per la realizzazione di strutture leggere, dove alte rigidità e resistenza specifica sono ricercate; dall'altro lato, per applicazioni di assorbimento energetico, in cui la deformazione strutturale è la priorità progettuale, le architetture bending-dominated sono molto più adatte grazie alla loro capacità di subire grandi deformazioni ad un livello di stress relativamente basso. Nel presente documento, come verrà maggiormente specificato nel seguito, sono state indagate entrambe le tipologie di architetture appena descritte mediante l'utilizzo di celle prismatiche, per le quali si ottiene un coefficiente pari a $M = 12 - 3 \cdot 8 + 6 = -6$, e piramidali, che sarebbero comunque caratterizzate da $M < 0$ ma, se due di loro vengono accostate in modo che abbiano la base in comune, si ottiene una cella a forma di ottaedro, solido per cui il coefficiente di Maxwell vale $M = 12 - 3 \cdot 6 + 6 = 0$.

Altra categoria particolare di materiali sono i cosiddetti auxetici, ovvero quei materiali caratterizzati da un coefficiente di Poisson negativo; alcuni studi ([15][16][17][18][19]) hanno dimostrato che il loro impiego in architetture appropriate può portare ad un miglioramento delle proprietà in termini di resistenza all'indentazione, al taglio trasversale, di resilienza, e di capacità di assorbimento energetico. Vista la complessità di modellazione geometrica richiesta e il conseguente aumento del costo di fabbricazione, però, i materiali auxetici non sono stati qui tenuti in considerazione negli studi eseguiti; tuttavia, un cenno alla loro esistenza e all'ulteriore miglioramento che potrebbero dimostrare nel campo dell'assorbimento energetico era doverosa.

Capitolo 2

Il casco motociclistico

Sebbene lo studio condotto nel presente lavoro di tesi si sia limitato all'indagine della risposta agli impatti di un provino multistrato di dimensioni limitate, con un core in struttura a lattice, lo scopo è quello di verificarne la fattibilità di impiego come liner dei caschi motociclistici; una descrizione di come questi ultimi sono realizzati è, dunque, necessaria.

Un tradizionale e moderno casco motociclistico è costituito essenzialmente da cinque parti fondamentali (figura 2.1), di seguito descritte procedendo da quella più esterna a quella più interna:

- calotta esterna (*outer shell*): è la parte esterna del casco, estremamente resistente, perché oltre a ridistribuire la forza dell'urto su una vasta area del casco, deve rimanere il più possibile integra alla sollecitazione, altrimenti non solo la funzione protettiva viene meno, ma può aggravare gli effetti dell'urto aumentando l'entità delle lesioni se alcune schegge vanno a conficcarsi nella testa del motociclista. Può essere in termoplastica stampata (ABS, policarbonato, PVC) o in materiale composito (fibra di carbonio, kevlar, vetroresina); in quest'ultimo caso la delaminazione favorisce la dissipazione di un'ulteriore quota di energia in caso di impatto.
- imbottitura o calotta interna (*liner*): è lo strato designato all'assorbimento di energia in caso di incidente, che ha, quindi, il compito di assorbire l'urto in modo graduale e di ridurre forze e accelerazioni trasmesse alla testa del motociclista; generalmente è fissata solamente in pochi punti alla calotta esterna, per impedirne in movimento relativo, ed è realizzata in polistirene espanso (EPS), materiale che viene da anni adottato per questo scopo e che si è dimostrato ottimale per questa applicazione.

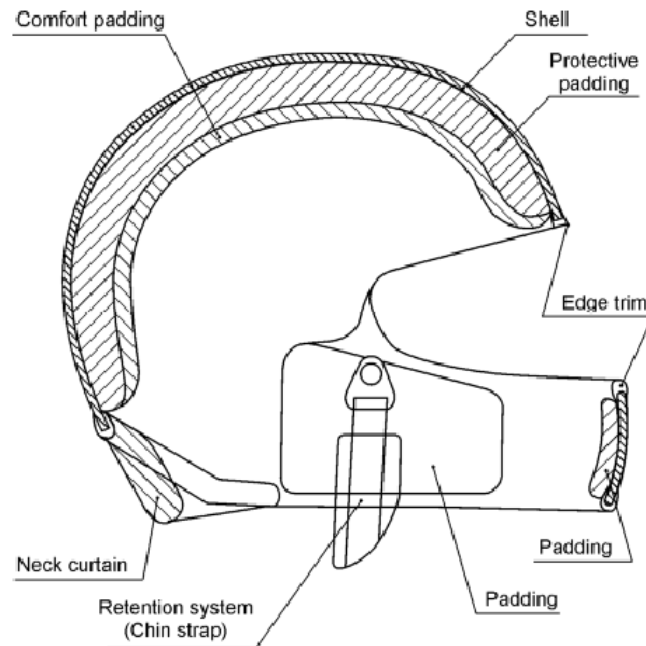


Figura 2.1: Schema di un casco con indicate le sue parti costruttive [20].

- rivestimento interno (*comfort fit/padding*): è il tessuto traspirante a diretto contatto con la testa ed ha la funzione di rendere il casco adattabile e confortevole una volta calzato; può essere utilizzato assieme alla gommapiuma o ad altri materiali espansi per la creazione di diverse taglie.
- mentoniera (*chin bar*): presente solo in alcune tipologie di caschi, offre protezione alla mandibola in caso di incidente; è fabbricata dello stesso materiale della calotta esterna, con la differenza che non è presente il liner ma solo il rivestimento interno.
- sistema di ritenzione (*chin strap*): cinturino sottogola per il mantenimento in sede del casco; può essere di diverse tipologie, le più comuni delle quali sono il cinturino micrometrico, che consente di regolarne la lunghezza e un rapido sgancio dello stesso, dove il bloccaggio è garantito da una cinghia di plastica con scanalature e da un fermo, il quale è munito di una bandella per lo sgancio; oppure può essere a doppio anello, preferibile rispetto al precedente poiché si regola ad ogni utilizzo, presenta meno criticità meccaniche e risulta più facile da allacciare e slacciare. In ogni caso, è ben noto il ruolo fondamentale che ricopre

questo componente, impedendo al casco di sfilarsi in caso di impatto, e vanificando, così, l'azione dello stesso.

- visiera (*face shield*): permette la visione della strada proteggendo il motociclista da vento, acqua, pulviscolo, e particelle varie; anch'essa è realizzata in termoplastico molto resistente. Può essere semplicemente trasparente (più comune), oscurata, per limitare l'intensità luminosa dei raggi solari, o a specchio, che impedisce la visione del volto del motociclista.

Il lavoro presentato in questo documento si riferisce ad un provino comprendente solamente la calotta esterna e il liner, essendo questi gli strati destinati alla distribuzione e assorbimento dell'energia derivante da un impatto; non si è, dunque, considerato l'effetto della calzabilità del casco sull'efficienza protettiva del casco stesso.

2.1 Tipologie di caschi

Diverse tipologie di caschi motociclistici sono oggi presenti sul mercato. Senza contare quelli divenuti illegali nel corso degli anni, al 2018 i caschi si possono distinguere in:

- integrale (*full face*): protegge tutta la testa, compresa la nuca, e presenta una spessa visiera mobile. È la tipologia che offre il più alto grado di protezione ed è generalmente usato anche dai piloti di auto e moto nelle competizioni.
- jet (o aperto): rispetto al casco integrale è sprovvisto della parte più anteriore della mentoniera, quindi ha una struttura che arriva a proteggere solo le guance, non offrendo, in caso di urto, grande protezione alla mandibola, alla mascella, e al naso, che sono coperti solo dalla visiera.
- demi-jet: tipo di casco simile al jet e che, rispetto a questo, è caratterizzato dall'assenza della protezione delle guance e minore lunghezza nella zona della nuca per offrire una migliore mobilità del capo, a scapito della protezione. I caschi demi-jet sono generalmente provvisti di visiera ribaltabile.
- modulare: i caschi modulari sono caschi integrali con la mentoniera che può essere asportata o ribaltata, per ottenere maggiore comodità e ampliare il campo visivo. Questi possono essere suddivisi in due tipologie, gli "Apribili", in cui la mentoniera può essere sollevata o

ribaltata all'indietro, restando comunque sempre agganciata al casco, ed i "Crossover", che invece prevedono l'asportazione della mentoniera.

Altre due tipologie, molto meno comuni rispetto alle precedenti a causa della minore diffusione nel mercato e della nuova concezione, sono i seguenti:

- A chiusura posteriore: si tratta di un tipo di casco che è composto da una calotta sdoppiata (anteriore e posteriore), incernierate tra loro e che permette un sistema di chiusura a conchiglia dello stesso e priva di cinturino sottogola, in quanto la parte inferiore del casco risulta molto più stretta e chiusa di un casco tradizionale, e la chiusura viene garantita da un doppio sistema a sgancio rapido.
- Casco protettivo elettronico (CPE): è una misura di *Intelligent transportation system (ITS)*, un sistema tecnologico di abbinamento tra veicolo e casco che mira ad innalzare gli standard di sicurezza del trasporto sulle due ruote. Il conducente non può avviare il ciclomotore se il casco non è correttamente indossato ed allacciato. Il casco è, quindi, dotato di sensori per percepire le correnti elettrostatiche ed elettromagnetiche emesse dal corpo umano, in modo tale da verificare la corretta posizione del cranio nella calotta interna, nonché intercettare il corretto allacciamento del cinturino sottogola; i dati sono quindi comunicati ad una centralina del motoveicolo che impedisce l'avviamento del mezzo in caso di mancato o non conforme utilizzo del casco.

2.2 Riferimenti normativi dei test per l'omologazione

L'uso del casco per la conduzione dei motocicli in Italia è obbligatorio dal 1992, anno in cui venne emanato il Decreto Legislativo N.285 del 30/04/1992. Nozioni e legalità del casco sono introdotte nell'articolo 171 del Codice della Strada.

La normativa che ne disciplina l'omologazione, nonché i test da eseguire al fine di rendere un casco motociclistico idoneo all'utilizzo in strada, è stabilita a livello europeo dall'*Economic Commission for Europe (ECE)* delle Nazioni Unite tramite la norma ONU/ECE 22.05 [20]. L'ECE è lo standard che si prefigge di armonizzare le differenti normative nazionali in modo da avere caschi che, in un mondo sempre più globalizzato, rispondano ai medesimi requisiti di sicurezza nei vari mercati in cui sono venduti.

La prima norma europea scaturita dall'ECE è stata emanata per la prima volta nel 1975 ma è stata più volte rivista sino alla revisione attuale, la

2.2. RIFERIMENTI NORMATIVI DEI TEST PER L'OMOLOGAZIONE²¹

quinta, emanata nel 2002, ed è attualmente adottata da 62 paesi del mondo, Italia compresa. Non è l'unica norma di omologazione dei caschi motociclistici, esistono anche la BSI inglese, lo standard AS/NZ australiano, la DOT americana, la JIS giapponese e, soprattutto, la SNELL, anch'essa americana ma non emanata dal dipartimento dei trasporti, e da molti considerata particolarmente attendibile in quanto permette di eseguire test in punti casuali del casco, non in punti predeterminati come indica, invece, la ECE. Essendo questo documento redatto in Italia, di seguito viene descritta la normativa in vigore in questo Paese, la ECE 22.05; un breve cenno viene anche dato allo standard americano Snell, per evidenziarne le differenze rispetto a quello europeo.

2.2.1 La ECE 22.05

La norma prevede una varietà di test sulle diverse parti del casco al fine di verificarne la sicurezza in una moltitudine di situazioni in cui esso, e quindi il motociclista, si potrebbero venire a trovare. La seguente procedura non è descritta nel dettaglio, in quanto esula dagli scopi di questa tesi; una maggiore attenzione, tuttavia, è stata data ai test d'impatto, i quali, invece, sono direttamente correlati col lavoro di ricerca eseguito.

- Fase preliminare: si verifica la struttura generale del casco, i campi di visibilità, la calzatura della falsatesta.
- Condizionamento: il casco viene trattato con una soluzione di solventi, quindi tenuto per periodi variabili dalle 4 alle 6 ore a temperature di $+50^{\circ}\text{C}$, -20°C e $+25^{\circ}\text{C}$. Successivamente viene esposto a una sorgente di raggi UV e, infine, ad aspersione d'acqua.
- Test d'impatto: viene determinata la capacità di assorbimento dell'energia del casco fissandolo ad una falsatesta e lasciandolo impattare in caduta libera su un'incudine di acciaio, la quale può essere piatta o a cuneo (kerbstone) a simulare l'impatto con un marciapiede; la norma prevede l'utilizzo di entrambe. La prima deve avere la superficie di impatto circolare piatta, di diametro 130 ± 3 mm; quella kerbstone, invece, deve avere i lati formanti un angolo di $105\pm 5^{\circ}$, ognuno con una pendenza di $52.5\pm 2.5^{\circ}$ rispetto alla verticale e raggio di raccordo tra i due di 15 ± 0.5 mm, di altezza almeno 50 mm e lunghezza non inferiore a 125 mm. L'altezza dalla quale viene lasciato cadere il casco deve essere tale per cui la sua velocità all'impatto sia $7.5 (+0.15/-0.0)$ m/s. Tale procedura viene ripetuta per i seguenti 4 punti d'impatto, mostrati in figura 2.2:

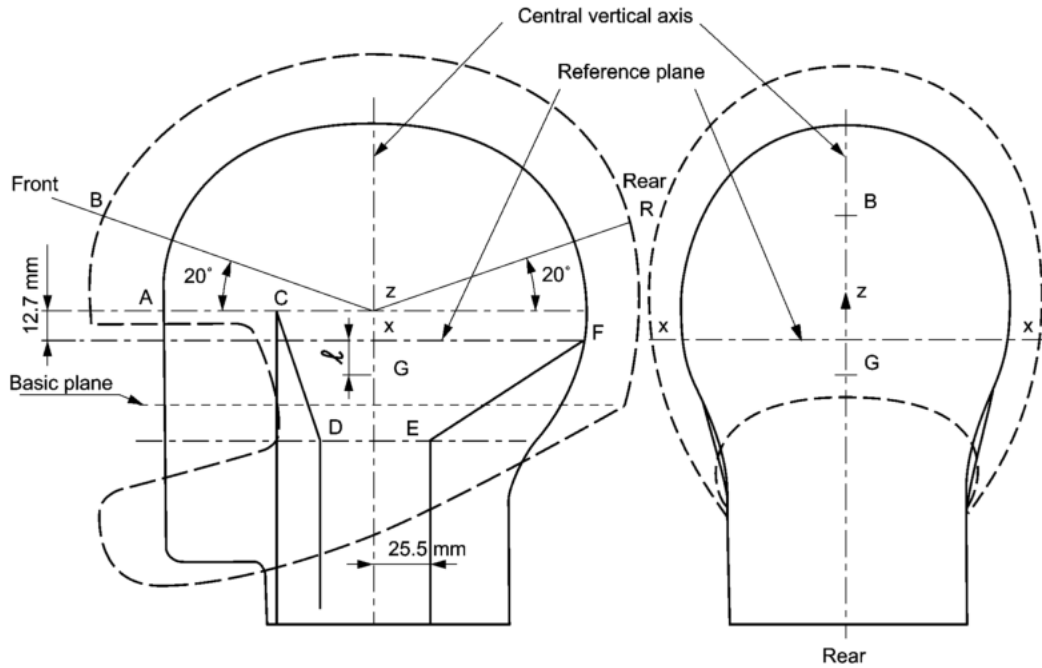


Figura 2.2: Identificazione dei punti d'impatto per i test omologativi secondo lo standard ECE 22.05 [20].

- B, nell'area frontale, nel piano di simmetria longitudinale verticale del casco, ad un angolo di 20° misurato dall'asse z sopra il piano AA';
- X, in entrambe le zone laterali destra e sinistra del casco, posizionati nel piano centrale trasversale verticale 12.7 mm sotto il piano AA';
- R, nella parte posteriore del casco, nel piano di simmetria verticale longitudinale e ad un angolo di 20° dall'asse z sopra il piano AA';
- P, sulla sommità del casco, in un'area di raggio 50 mm individuata dall'intersezione dell'asse verticale centrale con la superficie esterna della calotta

A questi si aggiunge un quinto punto d'impatto sulla mentoniera, il punto S, il quale viene però testato a $5.5 (+0.15/-0.0)$ m/s e con la sola incudine piatta. In ognuno di questi casi viene misurata l'accelerazione che il baricentro della falsatesta subisce in funzione del tempo; il limite per questo valore è fissato a 275 g, al di sotto di esso l'efficienza con cui il casco assorbe l'energia derivante da un incidente è considerata sufficiente. Con questi dati viene poi calcolato l'*Head Injury Criterion*

2.2. RIFERIMENTI NORMATIVI DEI TEST PER L'OMOLOGAZIONE 23

(*HIC*), un parametro indicatore del rischio di lesioni permanenti dovute all'impatto; questo si calcola come:

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_2}^{t_1} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (2.1)$$

dove a è l'accelerazione a cui è soggetta la falsatesta in g , e t_1 e t_2 sono due istanti di tempo qualsiasi durante l'impatto. Dell'*HIC* interessa il suo valore massimo, e il limite è fissato a 2400.

- Resistenza allo schiacciamento: posto il casco fra due piastre, viene misurata la resistenza a uno schiacciamento con una forza di 630 N, sia sull'asse longitudinale, sia su quello trasversale. La deformazione non può superare i 40 mm sotto carico e i 15 mm una volta ristabilito il carico originario di 30 N.
- Cinturino: questo è oggetto di molti test.
 - Resistenza allo stappo: una massa di 10 kg viene lasciata cadere da un'altezza di 750 ± 5 mm. L'estensione massima del cinturino non deve superare i 35 mm.
 - Resistenza alla trazione: il cinturino viene lasciato per 2 minuti in trazione collegandogli una massa da 15 ± 0.5 kg. L'estensione massima non deve superare i 25 mm.
 - Resistenza allo sfregamento: dopo 5000 cicli su una superficie appuntita il cinturino deve resistere a un carico di 300 kg, e il microscorrimento del sistema di regolazione non deve eccedere i 5 mm.
 - Fibbie a sgancio rapido: dopo un condizionamento in nebbia salina, si procede a 10.000 cicli di apertura e chiusura, quindi la fibbia deve resistere a una trazione di 200 kg. Al termine di questi test, le fibbie a sgancio rapido debbono aprirsi con una forza massima di 30 N. Preliminarmente viene controllato anche che non ne sia possibile l'apertura accidentale.
 - Anti-scalzamento: posizionato il casco su una falsatesta e allacciato correttamente il cinturino, viene agganciato alla parte posteriore un paranco a cui è collegata una massa di 10 kg, che viene lasciata cadere da un'altezza di 50 cm. Al termine della prova il casco non può aver ruotato sulla falsatesta per più di 30° .

- Resistenza allo scivolamento: il casco, fissato su una falsatesta, viene schiacciato con una forza di 40 N su un piano abrasivo scorrevole che simula l’asfalto. Un secondo test prevede un’incudine a barra, che simula uno spigolo, e questo viene ripetuto su tutti gli angoli della superficie del casco, prendendo in esame tutte le sue sporgenze; ovviamente il casco non deve impuntarsi sull’ostacolo.
- Visiera: ne vengono misurate le doti ottiche, dalla rifrazione astigmatica a quella prismatica, quindi la trasmissione spettrale e la trasmittanza. Per alcuni di questi test si procede prima, però, ad un condizionamento a -20°C o all’abrasione da sabbia. Infine, viene testata la resistenza alla penetrazione, poggiando un cuneo sulla superficie della visiera e facendolo colpire da una massa di 3 kg lasciata cadere da un’altezza di 1 metro; la visiera non deve rompersi e formare delle schegge taglienti. Per le visiere antiappannanti è previsto anche un test antiappannamento, con un condizionamento preventivo del prodotto, quindi l’esposizione a vapore a 50°C per 20 secondi. In questo caso la trasmittanza non deve diminuire al di sotto dell’80% del valore originario.

2.2.2 Confronto ECE - Snell

Un breve confronto in cui si evidenziano le principali differenze tra lo standard europeo (ECE 22.05) e quello americano (Snell M2010) viene di seguito condotto a scopo informativo, per sottolineare i diversi approcci con cui l’Unione Europea e gli Stati Uniti affrontano la tematica della sicurezza dei caschi motociclistici.

- Punti d’impatto: la ECE 22.05 prevede di eseguire i test su 5 punti ben definiti del casco, la Snell, invece, permette di indagare la risposta del dispositivo in qualsiasi punto della calotta al di sopra di una *test line* definita da normativa, lasciando la scelta al tecnico incaricato di eseguire al prova, il quale è libero di condurla nel modo che ritiene più consona.
- Numero di impatti: lo standard europeo prevede di testare ogni punto del casco una sola volta, ritenendo che una volta subito un incidente, esso debba essere sostituito con un casco nuovo; la normativa americana mira a determinare come un casco risponda ad uno scenario che copra l’intera durata di un incidente stradale, ovvero ad impatto multiplo sullo stesso punto, come può succedere se il motociclista viene sbalzato

2.2. RIFERIMENTI NORMATIVI DEI TEST PER L'OMOLOGAZIONE²⁵

dalla sella, va a sbattere al suolo, e poi rotola, rimbalza o scivola prima di fermarsi.

- Velocità di impatto e limite di accelerazione tollerata: per la ECE tutti i test, eccetto la mentoniera, vanno eseguiti facendo cadere il casco con la falsatesta da un'altezza tale da fargli raggiungere la velocità di 7.5 m/s al momento dell'urto, e l'accelerazione che ne deriva non deve superare il limite di 275 g. La Snell considera per il primo impatto una velocità di 7.75 m/s, mentre il secondo deve avvenire da un'altezza inferiore a seconda della taglia del casco; il limite di accelerazione dipende anch'esso dalla taglia del casco ed è pari a 275 g per quelli più piccoli e a 243 g per i più grandi.
- Forma delle incudini: al momento della caduta, un motociclista può sbattere la testa per terra come contro svariati elementi dell'arredo urbano. L'incudine piatta, rappresentativa della superficie stradale, viene utilizzata da entrambi gli standard; la ECE, poi, prevede l'uso di quella kerbstone, a simulare un marciapiede o un altro elemento a spigolo; la Snell, invece della kerbstone, prevede l'uso di un'incudine emisferica, che invece di impattare lungo una linea del casco, concentra l'energia in un'area circolare molto ristretta, al limite un punto. Quest'ultima normativa prevede l'utilizzo di una terza tipologia di incudine, quella di tipo *edge*, a simulare un guardrail o elementi di forma simile.
- Test di penetrazione: per ricevere l'omologazione Snell il casco deve essere sottoposto alla prova di penetrazione durante la quale un indentatore conico di 3 kg di massa viene lasciato cadere da 3 metri di altezza e va a colpire un qualsiasi punto al di sopra della test line; ovviamente, non ci deve essere sfondamento completo che vada ad intaccare in alcuna maniera la falsatesta. La normativa europea, invece, non prevede alcun test di questo tipo.

Pur riferendosi principalmente allo standard europeo, il presente studio tiene in considerazione anche alcuni aspetti della Snell ritenuti importanti ai fini della garanzia di protezione, come, ad esempio, la resistenza alla penetrazione.

2.2.3 La ECE 22.06

Una sesta revisione (ECE 22.06) è prevista per il 2020. Il suo scopo è quello di armonizzare ulteriormente le differenti normative nazionali e, al contempo,

migliorare la sicurezza dei caschi prevedendo una serie di test aggiuntivi derivati dagli studi condotti negli ultimi anni [21][22], i quali hanno evidenziato delle criticità e degli aspetti importanti che gli attuali test non tengono in considerazione.

Per ora, le principali differenze, che si prevede siano introdotte con la nuova normativa, sono le seguenti:

- I test d'impatto saranno effettuati sui 5 punti già previsti dallo standard attuale, più un punto intermedio aggiuntivo e diverso su ogni casco sottoposto ad omologazione;
- I test d'impatto verranno condotti a velocità di 5.5 m/s e 8.5 m/s, invece degli attuali 7.5 m/s (mentoniera esclusa), per verificare il comportamento del casco in uno spettro più ampio di situazioni e per rispondere alle statistiche riguardanti una parte considerevole di mortalità durante incidenti avvenuti con impatti a bassa velocità.
- Verranno effettuati test di accelerazione rotazionale, la vera rivoluzione della ECE 22.06. Questa necessità deriva dalle analisi condotte sui feriti in seguito ad incidenti motociclistici, molti dei quali hanno sofferto di traumi o lesioni al collo a causa delle componenti tangenziali sviluppatesi nell'impatto, componenti che generano un momento che tende a far ruotare la testa attorno alla zona cervicale della colonna vertebrale. La nuova normativa vuole valutare il grado di protezione dei caschi anche sulla base di questo nuovo aspetto, prima non considerato in quanto non si disponeva dei mezzi tecnologici per misurare direttamente questa grandezza, che non può essere ricavata per vie indirette misurando altri parametri.

2.2.4 Etichetta omologativa

Ogni casco che abbia superato le prove previste dalla normativa ECE 22.05 viene contrassegnato con un'etichetta che presenta la formattazione visibile in figura 2.3.

La prima riga indica il Paese che ha rilasciato l'omologazione (per l'Italia comparirà la dicitura E3).

La seconda riga è il numero di omologazione, il cui significato è sotto chiarito:

- le prime due cifre (05 nel caso raffigurato) indicano la versione direttiva di omologazione; in questo caso si riferisce alla ECE 22.05;
- le successive cinque cifre (01245) rappresentano il numero di omologazione specifico del casco;

2.2. RIFERIMENTI NORMATIVI DEI TEST PER L'OMOLOGAZIONE²⁷

- le lettere attestano il risultato dei test di protezione della mentoniera:
 - J → massima protezione della mentoniera (caschi jet o demi-jet)
 - J/P (o P/J) → doppia omologazione jet e integrale
 - P → protezione integrale della mascella (caschi integrali)
 - NP → non rispondente ai test di protezione della mascella, attribuita a caschi dotati di mentoniera asportabile o reclinabile (caschi modulari apribili)
- le sei cifre finali indicano il numero di matricola di produzione del casco.

2.2.5 La procedura di fabbricazione

Quando un'azienda ha progettato e costruito un nuovo casco, oltre ad averlo preventivamente testato presso il proprio laboratorio o averlo fatto testare da laboratori certificati alle prove della normativa 22.05, prima di poterlo mettere in commercio deve ottenere l'omologazione del casco stesso. Per farlo si deve rivolgere ad un ente omologativo, italiano o estero, purché abbia la propria sede in Europa. In Italia sono quattro o cinque gli enti che hanno ottenuto l'autorizzazione dal Ministero dei Trasporti di testare e rilasciare omologazioni per caschi ad uso motociclistico. Solitamente l'azienda invia all'ente prescelto cinque caschi per ognuna delle taglie con le quali il casco verrà commercializzato. Una volta testato il casco, l'ente omologativo fornirà al produttore il numero di omologazione e manterrà presso di sé un casco come campione di riferimento, utilizzabile in caso di controlli alla produzione.

Una volta ottenuta l'omologazione, l'azienda produttrice richiederà all'ANCMA (Associazione Nazionale Costruttori Motocicli ed Accessori) l'invio del primo lotto di etichette, comunicando che il casco ha precedentemente ottenuto l'omologazione (e fornendone il numero). Ogni lotto è composto da 3200 etichette numerate singolarmente da 0 a 3200, numero che compare stampato sulla parte destra dell'etichetta. I lotti seguenti avranno i numeri successivi, ed il secondo lotto, ad esempio, sarà dal numero 3201 al numero 6400. Una volta ricevute le etichette, l'azienda metterà in produzione i primi 3200 caschi.

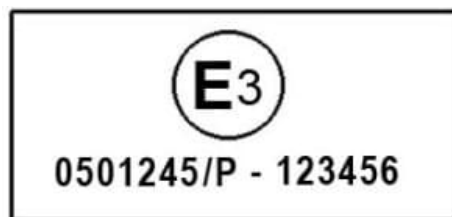


Figura 2.3: Esempio di etichetta caratterizzante un casco omologato secondo la ECE 22.05 [20].

Terminata la produzione di questo primo lotto, per poter mettere in commercio i caschi, il produttore dovrà far pervenire all'ente omologativo: 40 caschi nella taglia maggiore e 10 caschi nella taglia minore, se si tratta di casco jet, oppure 50 caschi nella taglia maggiore e 10 caschi nella taglia minore se si tratta di casco integrale o apribile con mentoniera protettiva.

L'ente omologatore sottoporrà anche questi caschi alle prove omologative richieste e, nel caso di esito positivo, comunicherà all'azienda il benestare alla commercializzazione del primo lotto di caschi. Se l'esito dei test fosse negativo il produttore dovrà modificare i caschi prodotti secondo le indicazioni fornite dai test stessi ed inviare altri caschi all'ente omologatore per ripetere i test.

A questo punto il casco è stato omologato, e, per richiedere ulteriori etichette, l'azienda, se dispone di un laboratorio qualificato, potrà effettuare nel proprio laboratorio i test di routine, inviando all'ANCMA un verbale di richiesta etichette.

Capitolo 3

Studi precedenti

I caschi motociclistici sono, di fatto, il più efficiente dispositivo di protezione della testa, e sono, quindi, da lungo tempo oggetto di svariati studi sperimentali e, recentemente, numerici. Il loro uso e la loro proprietà di cedevolezza controllata sono noti per ridurre il rischio di lesioni alla testa già da metà del secolo scorso [23]; sebbene negli anni '80 alcuni errati studi ne abbiano attestato la pericolosità a causa dell'incremento di massa subito dalla testa [24], la maggioranza degli studi dell'epoca in questo campo ha attribuito ai caschi la capacità protettiva contro le lesioni al cervello [23], mentre altri hanno riscontrato una correlazione anche con lesioni al collo e fratture alla base del cranio [25][26][27][28]. Richter et al. [29] ha studiato i meccanismi che causano lesioni al cervello nei motociclisti, e Liu et al. [1], Abbas et al. [30], e Rice et al. [4] hanno dimostrato che i caschi possono significativamente ridurre l'intensità delle ferite alla testa (quest'ultimo ha, infatti, riscontrato che i caschi riducono la probabilità di lesioni al collo del 37%, di lesioni alla testa del 60%, e di lesioni mortali del 56%). Altre ricerche più recenti hanno sviluppato modelli numerici del cervello e li hanno usati per studiare la protezione offerta dai caschi [31][32][33]. Modelli dei caschi sono poi stati sviluppati e sfruttati per migliorarne il design [34][35], così da comprendere quali sono le performance dei caschi stessi in condizioni d'impatto realistiche [36] e per studiare gli effetti dell'interazione testa-collo in caso di incidente [36][37]. Ghajari et al. [21] ha studiato come la presenza del corpo influenzi la risposta all'impatto della testa e del casco, valutando che effettivamente il suo ruolo è molto rilevante ai fini della riduzione delle accelerazioni, sia lineari sia rotazionali, trasmesse. Bonina et al. [38] ha stabilito che un casco ben calzante e un buon allineamento con la testa è fondamentale per ottenere una protezione del capo ottimale, e non sempre i caschi in circolazione hanno misure che meglio si adattano alle teste dei motociclisti.

Altri studi sperimentali sono stati condotti al fine di migliorare le capacità

protettive dei caschi. In particolare, Caserta et al. [39] ha studiato la possibilità di utilizzare una struttura a pareti sottili (un honeycomb di alluminio) per l'assorbimento dell'energia; tuttavia, questo si è dimostrato pericoloso nel caso l'EPS sotto di essa sia troppo sottile, perchè si rischierebbe lo sfondamento in caso di impatto, aumentando ulteriormente le lesioni alla persona. Coelho et al. [40] ha valutato la fattibilità di usare un liner in composito costituito da EPS e sughero, con l'obiettivo di ridurre le accelerazioni lineari trasmesse alla testa. Di Landro et al. [41] ha sviluppato numerosi esperimenti sui liner dei caschi e ha proposto di usare schiume graduali per migliorarne le performance protettive. Altre ricerche [42] hanno dimostrato che le capacità di assorbimento di energia dei liner imbottiti potrebbero essere personalizzate usando schiume graduali, e le capacità di protezione dei caschi potrebbero essere ottimizzate utilizzando tali schiume, sebbene la produzione di questi materiali riscontri alcune difficoltà [43]. Come riportato dalla letteratura, le odierne schiume in EPS, ampiamente utilizzate nei liner dei caschi, cedono praticamente a tensione costante [44]. In accordo con questa considerazione, Cernicchi et al. [45] ha derivato una formulazione analitica che mostra che all'aumentare dell'indentazione sulla schiuma, aumenta anche la forza trasmessa sulla falsatesta. Oltretutto, questa formulazione propone di usare un materiale con una tensione di snervamento variabile così da minimizzare il picco di forza trasmessa. Ramirez et al. [46] ha valutato la possibilità di impiego della Polyurea quale materiale per l'assorbimento di energia, vista la sua proprietà di avere una velocità di deformazione sensibile alla velocità di carico; inoltre, si è visto che maggiore è la densità della schiuma e maggiore è la forza trasmessa in caso di impatto a bassa velocità. Forero et al. [47] ha proposto di usare un liner stratificato, con una schiuma di densità variabile lungo lo spessore, successivamente migliorato [48] con una schiuma di densità gradualmente diversa, che elimina così il problema della delaminazione di più strati incollati sovrapposti.

Soe et al. [49] ha dimostrato che una struttura cellulare regolare, realizzata mediante additive manufacturing, e con celle di dimensioni uniformi lungo tutto lo spessore, potrebbero aumentare il livello protettivo dei caschi. Per di più, in accordo con differenti altre ricerche, le proprietà delle strutture a lattice potrebbero essere migliorate sviluppando strutture a lattice gerarchiche [50][51][52], quindi con densità variabile attraverso lo spessore del liner. Ciò è stato fatto da Khosroshahi et al. [53] dimostrando che l'uso di tali strutture porta ad una riduzione del picco di accelerazione lineare, delle accelerazioni rotazionali, e dell'HIC; tuttavia, il liner così simulato si è dimostrato essere più pesante rispetto ad uno tradizionale.

Possiamo dunque riassumere quanto appurato nei sopracitati articoli di ricerca come segue:

- La calotta esterna:
 - Resiste alla penetrazione;
 - Aumenta l'area di contatto, quindi distribuisce la forza su una superficie maggiore possibile;
 - Diminuisce la tensione di compressione sul liner sottostante;
 - Dissipa una certa quota di energia deformandosi e, se fabbricata in materiali compositi, delaminandosi;
 - Se deformabile fornisce maggiore protezione contro le superfici piatte; se rigida fornisce, invece, maggiore protezione contro le superficie arrotondate.

- Il liner realizzato con una struttura a lattice:
 - Ha proprietà diverse a seconda del materiale e della geometria con cui è realizzato;
 - Offre resistenza multidirezionale;
 - Quando soggetto a deformazione plastica, se questa è assiale (coinvolgente il fenomeno del buckling), è più efficiente per unità di massa rispetto ai materiali pieni;
 - Quando soggetto a deformazione plastica, se questa è flessionale, l'energia assorbita è maggiore;
 - Quando soggetto a deformazione plastica, l'impatto a cui può essere sottoposto non può essere multiplo;
 - Se costituito da celle poliedriche chiuse a facce triangolari ha un piccolo plateau post-sneramento, ma è più efficiente per unità di massa;
 - La densità del materiale influenza la cinetica di testa e collo;
 - La densità del materiale, se bassa, diminuisce i picchi di forza trasmessa;
 - La densità del materiale si è dimostrata essere migliore, se bassa, per gli impatti a basse velocità, e alta per quelli ad alte velocità;
 - Se gerarchica, quindi con variazione dimensionale delle celle lungo lo spessore, celle più piccole o più grandi vicino alla testa permettono un migliore assorbimento dell'energia in dipendenza della velocità di impatto;

- Se realizzata in nylon il plateau post-snervamento è molto esteso, condizione ottimale per il suo impiego come materiale per l'assorbimento di energia (l'EPS comunemente utilizzato è soggetto, invece, alla deformazione ad uno stress costante).

Ecco che, allora, sulla base delle conclusioni emerse dagli studi precedenti, il presente lavoro ne vuole essere una estensione, andando ad indagare il comportamento delle strutture a lattice regolari, quindi con dimensione delle celle costante lungo lo spessore del provino, e forma delle celle prismatica e piramidale, al fine di stabilire quale configurazione sia la migliore nell'assorbimento dell'energia derivante da un impatto, in relazione anche al peso che tale struttura viene ad assumere.

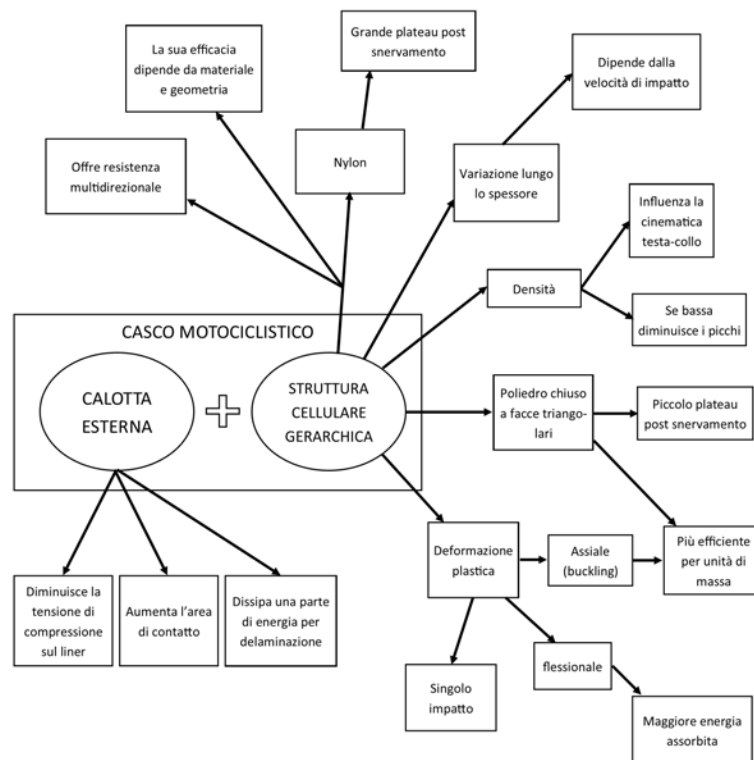


Figura 3.1: Schema riassuntivo delle considerazioni scaturite dagli studi condotti sulle strutture a lattice.

Capitolo 4

Il modello agli elementi finiti

Il capitolo illustra come è stata affrontata la modellazione agli elementi finiti del provino multistrato, da quali studi e articoli si è partiti e su cui ci si è basati per la creazione della geometria, per la definizione delle proprietà dei materiali impiegati, e delle condizioni al contorno. Si passa poi ad una descrizione dell'impostazione del modello in dettaglio, di quali parametri sono stati adottati, di quali sono le leggi costitutive attribuite ai materiali utilizzati, di quali sono state le configurazioni di strutture a lattice scelte, e, infine, quali scenari di impatto sono stati analizzati.

4.1 Riferimenti

Non avendo effettuato test sperimentali, la scelta dei materiali e delle loro proprietà si è basata sugli studi sulle strutture gerarchiche a lattice condotti da Banarjee et al. [50] e Khosroshahi et al. [53], i quali hanno individuato nel nylon un valido candidato da impiegare come liner dei caschi motociclistici, e dai quali si è ripreso il metodo di modellazione, tramite software, delle strutture a lattice; si sono poi usati come comparativi i risultati pubblicati nel paper di Zhang et al. [54], così da avere un riferimento per confrontare parte dei risultati ottenuti mediante le simulazioni numeriche. Zhang ha studiato le proprietà di assorbimento di energia dei pannelli sandwich, costituiti da un core in honeycomb, soggetti all'impatto da parte di una sfera lasciata cadere da diverse altezze; il provino che egli ha analizzato è stato un tipico pannello multistrato di dimensioni 150 x 150 x 16.3 mm, composto quindi da due fogli di alluminio di spessore 0.5 mm, tra i quali è presente un core in honeycomb, anch'esso di alluminio, con uno spessore di 15 mm; core e fogli esterni sono poi tenuti assieme mediante un layer adesivo di resina epossidica. Su di essi è stato fatto cadere un pattatore sferico di diametro 40 mm e massa 0.3 kg,

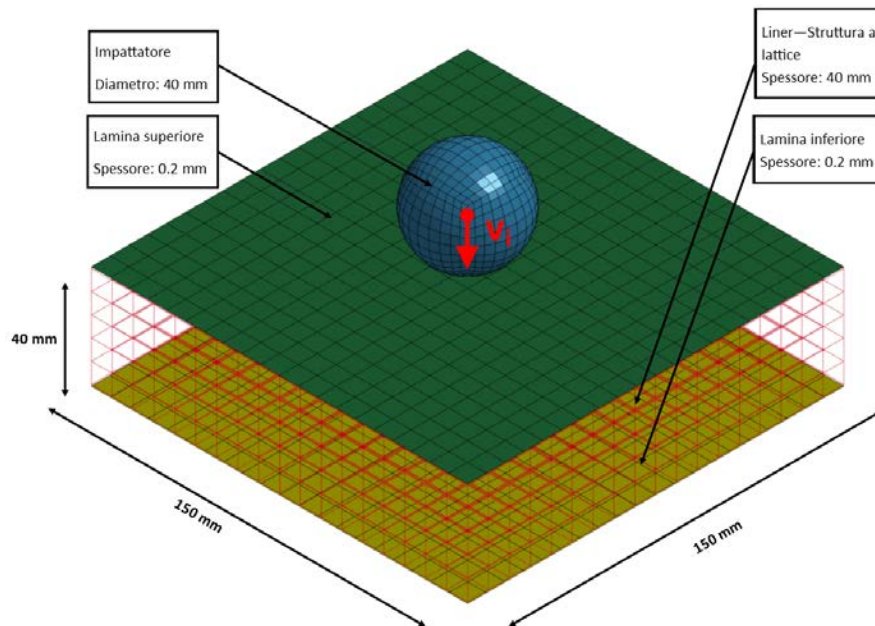


Figura 4.1: Modello agli elementi finiti della configurazione Cub 5 oggetto di studio.

lasciato in caduta libera da diverse altezze, e ne è stata misurata l'energia persa all'impatto, energia che, di conseguenza, è stata assorbita dal provino. Le altezze di caduta sono state tali per cui la velocità un istante prima dell'impatto sia risultata di valore pari a 3.13, 4.43, 5.05, e 5.42 m/s. Da queste prove è stato ricavato che più dell'80% dell'energia dell'impattatore viene assorbita in maggior parte dall'azione combinata del foglio superiore e dal core in honeycomb; inoltre, la forma principale di energia dissipata è stata di tipo plastico.

Lo studio appena citato è stato, però, rivolto ad impatti generici, dunque alcuni parametri sono stati modificati al fine di adattare il lavoro di tesi svolto all'applicazione a cui questo fa riferimento, ovvero come liner dei caschi motociclistici.

4.2 Il provino multistrato

Basandosi sui documenti appena descritti, il presente lavoro ha previsto la modellazione agli elementi finiti di un provino multistrato di dimensioni 150 x 150 x 40.4 mm (riportato in figura 4.1), composto da un foglio inferiore in alluminio di 0.2 mm di spessore supposto rigido e vincolato lungo il perimetro, da un liner a lattice in nylon di spessore 40 mm, e da un foglio superiore,

anch'esso in alluminio e anch'esso spesso 0.2 mm, ma deformabile. Su quest'ultimo impatta una sfera di 40 mm di diametro e massa 0.3 kg, supposta rigida e lanciata a diverse velocità, con diverse orientazioni e posizioni. La normativa prevedrebbe di eseguire test con incudini piatte e di tipo kerbstone, ovvero con la superficie impattante curva; qui, invece, è stata usata una sola tipologia di impattatore, e tale scelta è motivata dal fatto che la forma sferica permette di esercitare sul provino allo stesso tempo uno sforzo di compressione e di flessione, svolgendo perciò lo stesso ruolo dell'incudine kerbstone.

L'impattatore e i due layer di alluminio hanno le stesse caratteristiche indicate nell'articolo di Zhang [54]; lo spessore del liner, invece, è stato aumentato a 40 mm in quanto questa è una tipica misura di un casco motociclistico. Le velocità iniziali dell'impattatore sono state 4.43, 7.5 e 12 m/s; il primo valore deriva dalla ricerca di Zhang, corrisponde alla velocità di una sfera, con le caratteristiche appena descritte, lasciata cadere da 0.5 m di altezza, ed è quindi stato usato sia al fine di una comparazione tra i due studi, sia perché identificativo di un impatto a bassa energia; il valore di 7.5 m/s (27 km/h) è stato considerato in quanto è quello previsto dallo standard europeo (ECE 22.05) e rappresentativo di un impatto ad alta energia; infine, si è scelto di adottare anche una velocità tipicamente raggiunta durante la marcia in strada, pari a 12 m/s (43.2 km/h) per indagare fenomeni ad energia ancora maggiore, in riferimento agli studi condotti da D'Mello et al. [55].

La struttura a lattice costituente il liner del casco è stata studiata regolare, non gerarchica, quindi la dimensione delle celle è costante lungo lo spessore. Due sono state le architetture indagate: con celle prismatiche, e con celle piramidali a base quadrata (si veda la figura 4.2), queste ultime ricavate tracciando le diagonali interne alle celle prismatiche. In realtà, in tal modo, si ottiene che l'unione di due celle piramidali che condividono la stessa base forma un ottaedro non regolare. Nel secondo caso, dunque, la struttura a lattice ha un'architettura composta quasi interamente da ottaedri, eccezione fatta per le celle lungo tutte le facce del liner, le quali sono semplicemente piramidali a base quadrata. Si sono così indagate celle (quelle prismatiche e piramidali) che non soddisfano il criterio di Maxwell, e celle (quelle ottaedriche)

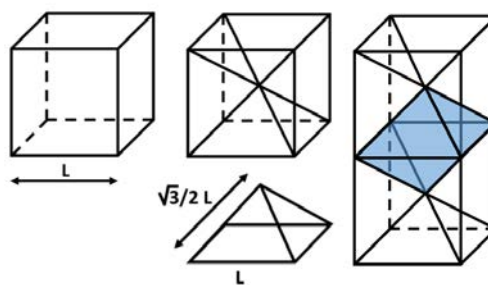


Figura 4.2: Forma delle celle delle strutture a lattice analizzate in questo documento: prismatiche, piramidali a base quadrata e, in azzurro, ottaedriche.

che, invece, lo soddisfano; le strutture a lattice composte da celle prismatiche rappresentano un'architettura con comportamento bending-dominated, quelle a maggioranza di celle ottaedriche rappresentano un'architettura principalmente stretch-dominated. Per entrambe, la densità di celle lungo lo spessore è stata studiata per 5 valori diversi; essendo lo spessore del liner costante e pari a 40 mm, all'aumentare di questa densità, la dimensione delle celle diminuisce.

4.3 Tipologie di impatto indagate

L'impatto è stato fatto avvenire in direzione perpendicolare alla faccia superiore del provino multistrato, e con un'inclinazione di 45° , quest'ultima scelta scaturita analizzando un tipico scenario di incidente stradale, in cui il motociclista non cade verticalmente verso il suolo ma ha una componente di velocità residua nella direzione di marcia (figura 4.3). A questi casi si sono aggiunti, poi, quelli in cui l'impatto non avviene al centro del provino ma sulla periferia, a simulare un urto sul bordo del casco, quindi coinvolgente una minore quantità di materiale.

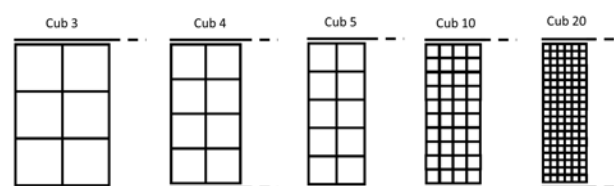
Il numero di casi analizzati è stato, quindi, pari a $2 \times 5 \times 3 \times 2 \times 2 = 120$, dove i singoli fattori indicano:

- 2 → forma delle celle impiegate (prismatica, piramidale)
- 5 → densità di celle lungo lo spessore (3, 4, 5, 10, 20 celle lungo lo spessore)
- 3 → velocità di impatto (4.43 m/s, 7.5 m/s, 12 m/s)
- 2 → punti d'impatto (centrale e sul bordo)
- 2 → direzioni d'impatto (ortogonale e inclinata)

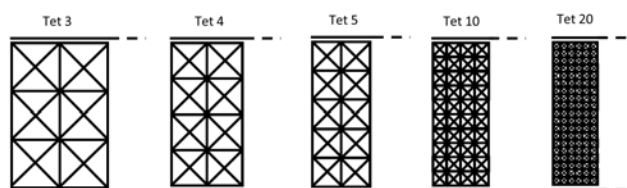


Figura 4.3: Esempio di caduta da una motocicletta durante una gara di MotoGP.

La struttura a lattice è stata studiata in diverse configurazioni, in modo da ricercare quella che offre le migliori capacità di assorbimento dell'energia contemporaneamente ad una bassa trasmissione delle forze ai layer inferiori.



(a) Configurazioni con celle prismatiche.



(b) Configurazioni con celle piramidali.

Figura 4.4: Configurazioni delle strutture a lattice studiate nel presente documento.

Per semplicità, nel seguito tali configurazioni verranno indicate con la dicitura “Cub” se le celle costituenti la struttura a lattice sono prismatiche, dato che la loro forma è molto prossima a quella cubica, e “Tet” se invece hanno forma piramidale; queste sigle sono poi seguite da un numero a seconda che lungo lo spessore del provino multistrato ci siano 3, 4, 5, 10 o 20 celle, ovvero sono indicatori della densità della struttura costituente il liner; un esempio grafico è riportato in figura 4.4. Il motivo della scelta di questi numeri di celle lungo lo spessore è scaturito dalla volontà di indagare il comportamento di tali celle al variare della loro dimensione in relazione alle dimensioni dell’impattatore; si sono così testate celle di dimensioni comparabili con quelle della sfera impattante, e celle progressivamente minori, fino ad essere un ordine di grandezza più piccole dell’oggetto che le colpisce.

4.4 Modellazione FE

Il software utilizzato per costruire il modello numerico del provino multistrato ed eseguire le simulazioni è stato LS-Dyna. Dimensioni e proprietà dei materiali utilizzati sono riassunti in tabella 4.4.

Le unità di misura utilizzate nel programma sono state kg , mm , ms per garantire efficienza computazionale; in questo documento, invece, si riportano i dati in notazione del SI per maggiore chiarezza.

L’impattatore è stato modellato come una sfera rigida, e perciò inde-

formabile, meshata con elementi *solid*, posizionata 1 mm sopra la lamina superiore per esigenze di efficienza computazionale. Tale lamina è stata, invece, disegnata come priva di spessore, il quale è stato poi impostato nelle proprietà degli elementi della mesh con cui è stata discretizzata, ovvero elementi *shell*. Allo stesso modo, anche la lamina inferiore è stata meshata con elementi *shell*, con la differenza che questa è stata considerata rigida, ed è stata vincolata mediante incastro rigido (6 g.d.l. bloccati) lungo tutti e quattro i lati. Per la costruzione del liner, invece, si è fatto ricorso ad uno script Matlab col quale si sono uniformemente ripartite lungo lo spessore le celle della struttura a lattice, i cui elementi sono stati modellati come elementi *beam*; la sezione di questi ultimi è stata posta circolare piena, in quanto, se si fosse considerata cava, la tensione critica di Eulero, che segna l'inizio del fenomeno del buckling, sarebbe quasi quadruplicata, riducendo, così, l'ulteriore assorbimento di energia che anche questo meccanismo è in grado di fornire. Dalla teoria, la tensione critica di Eulero è pari a:

$$\sigma_{CRE} = \frac{\pi^2 E}{(L/\rho)^2} \quad (4.1)$$

dove:

- E è il modulo di Young del materiale in oggetto
- L è la lunghezza libera di inflessione dell'elemento della cella
- $\rho^2 = \frac{I}{A}$ è il quadrato del raggio di inerzia della sezione considerata, con I e A rispettivamente il momento di inerzia e l'area della sezione stessa

Per sezione circolare $I = \frac{\pi r^4}{4}$, e quindi ρ vale $\frac{r}{2}$, mentre per sezione a corona circolare $I = Ar_m^2$, e ρ , invece, risulta pari al raggio medio r_m . Da qui si vede che la sezione a corona circolare ha una tensione di buckling primario maggiore di quella circolare piena, ed ecco perché si è scelto di modellare così gli elementi del liner, anche se la massa complessiva finale risulta maggiore.

Non è stato considerato uno strato di adesivo tra i vari layer, in quanto in un casco motociclistico il liner è fissato alla calotta esterna solo in pochissimi punti per garantire l'integrità strutturale del casco stesso ed impedire che il liner si muova tra la calotta e il rivestimento interno. Per riprodurre il fissaggio, la lamina superiore è stata vincolata alla faccia superiore del liner mediante la keyword CONTACT \rightarrow TIED_NODES_TO_SURFACE, la quale è stata applicata solamente ad un numero di nodi pari 4 o 1 (a seconda della tipologia e dimensione delle celle considerate caso per caso) e posizionati direttamente al di sotto dell'impattatore; la medesima cosa è stata fatta tra la faccia inferiore del liner e la lamina inferiore.

Tabella 4.1: Tabella contenente i parametri usati per la modellazione dei corpi rigidi.

Grandezza	Simbolo	Valore	Unità di misura
Densità	ρ	8900	kg/m^3
Modulo di Young	E	200	GPa
Rapporto di Poisson	ν	0.3	-

Altre due tipologie di contatto sono state utilizzate al fine di permettere l'interazione tra i vari layer costituenti il provino multistrato: un CONTACT \rightarrow SURFACE_TO_SURFACE tra l'impattatore (corpo *slave*) e la lamina superiore di alluminio (corpo *master*), e un CONTACT \rightarrow NODES_TO_SURFACE tra quest'ultima (corpo *master*) e il liner (corpo *slave*), per permettere la trasmissione agli strati inferiori dei carichi derivanti dall'urto, e riprodurre, quindi, la stessa situazione che si viene ad avere nel fenomeno reale. Un contatto è stato inserito anche tra la lamina superiore e quella inferiore, così da permettere di riconoscere le situazioni in cui avviene il completo sfondamento del liner, situazioni in cui, cioè, le due lamine vengono a toccarsi.

Il *termination time* di tutti i modelli analizzati è stato inizialmente impostato a 5 ms; tuttavia, nel corso dello studio si è osservato che spesso questo risultava insufficiente a descrivere compiutamente il fenomeno (l'impattatore non raggiungeva una velocità di rimbalzo costante), soprattutto per le strutture a lattice di minore densità lungo lo spessore, ed è quindi stato aumentato, a seconda dei vari casi, fino ad un massimo di 30 ms. Nelle configurazioni a maggiore densità di celle, invece, è stato diminuito fino ad un minimo di 3 ms per accorciare il tempo di calcolo.

L'andamento delle forze trasmesse, della profondità di penetrazione della sfera nel liner, e dell'energia assorbita sono stati, poi, plottati e sono riportati nei capitoli 5, 6, e 7, a seconda della tipologia di impatto. Per cercare di ottenere grafici con un picco ben definito ed un andamento regolare, tutti i risultati sono stati filtrati. Il filtro applicato è stato sempre di tipo Butterworth con frequenza di taglio di 600 Hz. Il filtro Butterworth è un semplice filtro elettronico il cui scopo è ottenere una risposta il più possibile piatta in modulo nella banda passante, e il valore di 600 Hz è stato scelto per cercare di ottenere un unico picco e contemporaneamente avere un numero minimo di valori di forza negativi.

La creazione dei vari grafici, come anche l'interpolazione tra i vari dati, è stata effettuata con l'ausilio del programma Matlab. In particolare, l'interpolazione è stata effettuata mediante il comando *pchip* (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) che crea una spline cubica di Hermite, ov-

vero una spline di terzo grado in cui ogni polinomio è nella forma di Hermite, consistente, cioè, in due punti di controllo e due tangenti di controllo per ogni punto; non è stata usata una normale spline cubica perché quest'ultima oscilla maggiormente tra i punti interpolati.

4.4.1 Materiali impiegati

L'impattatore e la lamina inferiore sono stati modellati in acciaio, con densità tale per cui la massa della sfera risulti essere 0.3 kg; la corrispondente card nel software è MAT_RIGID (020); la tabella 4.1 ne riassume i dati. Il layer superiore, invece, necessitava di avere un comportamento sensibile alla velocità di deformazione plastica, così da avere un materiale che tenesse in considerazione il fattore velocità d'impatto. Si è ricorsi, perciò, ad alluminio di tipo MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK (098); questo tipo di materiale viene usato in problemi dove la velocità di deformazione varia in un ampio range; essendo il modello semplificato, gli effetti termici vengono ignorati. Un processo iterativo in tensione piana viene utilizzato per gli elementi *shell*, ma, a causa di questa semplificazione, il metodo è il 50% più veloce di quello Johnson-Cook completo. Per compensare il fatto che si trascuri la perdita di resistenza a causa del calore, valori limiti di tensione vengono usati per tenere gli stress entro limiti ragionevoli. La tipologia di elemento usata qui è quella di Belytschko-Tsay, e i punti di integrazione lungo lo spessore sono settati a 2, così da garantire una simulazione veloce ma al contempo accurata. Andando più nello specifico, Johnson e Cook esprimono la tensione come:

$$\sigma_y = \left(A + B\bar{\epsilon}^{p^n} \right) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (4.2)$$

dove:

- A, B, C, n sono costanti di input tipiche del materiale usato (alluminio in questo caso), e sono riassunte in tabella 4.2;
- $\bar{\epsilon}^p$ è la deformazione plastica effettiva;
- $\dot{\epsilon}^*$ è la velocità di deformazione effettiva normalizzata.

La tensione massima è limitata dai parametri SIGMAX e SIGSAT, rispettivamente la tensione massima durante l'incrudimento prima che gli effetti della velocità vengano tenuti in considerazione, e la tensione di saturazione, che limita lo stress effettivo massimo sviluppabile dopo che gli effetti della velocità vengono presi in considerazione. In formule:

$$\sigma_y = \min \left\{ \min \left[A + B\bar{\epsilon}^{p^n}, SIGMAX \right] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*), SIGSAT \right\} \quad (4.3)$$

Tabella 4.2: Tabella contenente i parametri usati per la modellazione dell'alluminio con comportamento di Johnson-Cook semplificato.

Grandezza	Simbolo	Valore	Unità di misura
Densità	ρ	2700	kg/m^3
Modulo di Young	E	72	GPa
Rapporto di Poisson	ν	0.33	-
Costante alluminio	A	0.16	-
Costante alluminio	B	0.59	-
Costante alluminio	C	0.012	-
Costante alluminio	n	0.376	-
Deformazione plastica a rottura	ε_F	0.6	mm
Massima tensione ottenibile dall'incrudimento prima che intervengano gli effetti della velocità	SIGMAX	$1 \cdot 10^{28}$	GPa
Tensione di saturazione che limita la tensione massima ottenibile dopo l'intervento degli effetti della velocità	SIGSAT	$1 \cdot 10^{28}$	GPa

La tipologia di alluminio utilizzata per modellare le lamine è la A5083-H321 ([54]), una lega di alluminio il cui principale elemento alligante è il magnesio, presente al 4-4.9%, oltre a manganese, cromo, titanio e altri elementi in percentuale minore, che gli conferiscono buona resistenza all'ossidazione e a corrosione e buona saldabilità, nonché, soprattutto, buona tenacità sia a temperatura ambiente che a basse temperature, rendendolo adatto ad applicazioni quali utensileria domestica, strutture idrauliche, bulloneria speciale, strutture saldate per atmosfera marina, recipienti in pressione, pannelli di rivestimento, targhe automobilistiche, ruote.

Il liner a lattice è stato modellato in nylon a causa del suo plateau post-sneramento esteso [53], il che lo rende adatto per applicazioni quali l'assorbimento energetico grazie alla deformazione plastica a cui è soggetto durante il buckling; un confronto è stato fatto col PLA ma, per questo materiale, il failure avviene relativamente presto dunque non è in grado di assorbire una ragionevole quantità di energia (figura 4.6-a). Per la modellazione nu-

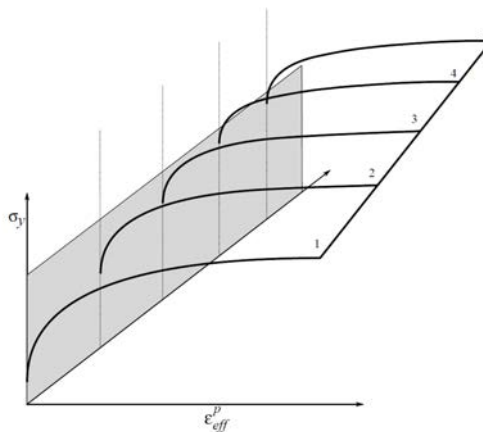


Figura 4.5: Effetto della velocità di deformazione sulla curva tensione-deformazione del nylon [56].

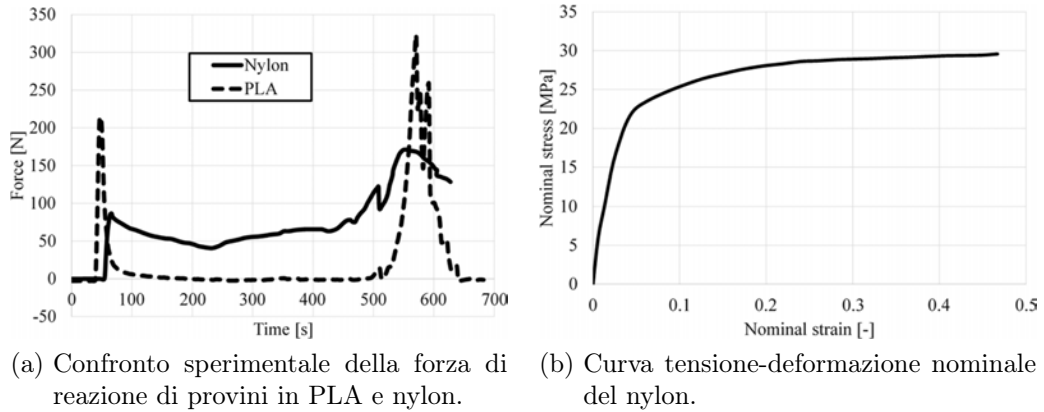


Figura 4.6: Grafici caratterizzanti il comportamento del nylon 6 soggetto a prova di compressione monoassiale [53].

merica è stato, quindi, scelto dalla libreria di LS-Dyna un materiale di tipo `MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024)`, rappresentante, cioè, un comportamento elasto-plastico identificato dalla curva tensione-deformazione rappresentata in figura 4.6-b. Per tenere in considerazione la dipendenza dalla velocità di deformazione, si è fatto ricorso alla formulazione di Cowper-Symonds, secondo la quale il comportamento del materiale varia nel modo illustrato in figura 4.5, dove le curve sono numerate in modo crescente al crescere della velocità di deformazione. In tal modo, la struttura a lattice assume un comportamento diverso a seconda della velocità di impatto a cui è sottoposta, dato che la formulazione adottata fa in modo di scalare la tensione di snervamento del fattore:

$$1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad (4.4)$$

dove:

- $\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione;
- C è una delle costanti di Cowper-Symonds [56][57];
- p è una delle costanti di Cowper-Symonds [56][57];

Un riepilogo delle principali proprietà dei materiali utilizzati in questa sede è contenuto in tabella 4.4.

4.4.2 Il nylon 6

Il nylon individuato per realizzare il liner è, nello specifico, nylon 6 (anche chiamato polyamide 6, formula chimica $(C_6H_{11}NO)_n$), che si presta bene ad

Tabella 4.3: Tabella contenente i parametri usati per la modellazione del nylon 6 con formulazione di Cowper-Symonds.

Grandezza	Simbolo	Valore	Unità di misura
Densità	ρ	1100	kg/m^3
Modulo di Young	E	0.65	GPa
Rapporto di Poisson	ν	0.3	-
Tensione di snervamento	σ_y	0.01	GPa
Deformazione plastica a rottura	ε_F	0.45	mm
Costante di Cowper-Symonds	C	82 .0	-
Costante di Cowper-Symonds	p	4.51	-

Tabella 4.4: Riassunto dei materiali e delle rispettive proprietà utilizzate nella modellazione del provino multistrato.

Proprietà	Impattatore (Steel)	Lamina superiore (A5083-H321)	Liner a lattice (Nylon 6)	Lamina inferiore (Steel)
Tipologia materiale	Rigid	Simplified Johnson Cook	Piecewise Linear Plasticity	Rigid
Densità ρ [kg/m^3]	8900	2700	1100	8900
Modulo di Young E [GPa]	200	72	0.65	200
Rapporto di Poisson ν	0.3	0.33	0.3	0.3
Tensione di snervamento σ_Y [GPa]	-	0.01	-	-
Deformazione plastica a rottura ε_F [mm]	-	0.6	0.45	-

essere impiegato nei processi di additive manufacturing. E' stato sviluppato per riprodurre le proprietà del nylon 6,6 senza violarne il brevetto, tuttavia, le sue proprietà sono risultate migliori. Il nylon 6 è un polimero sintetizzato per polimerizzazione di tipo *ring-opening* del monomero di cui è costituito, il caprolattame; se quest'ultimo viene mantenuto a circa 533 K in atmosfera inerte per 4-5 ore, il monomero si apre e avviene la polimerizzazione. Solitamente [58] si realizzano due tipologie di fibre di nylon 6: quelle regolari, per usi tessili, e quelle ad elevata resistenza, per utilizzi industriali. La maggior parte del nylon 6 è prodotto in *yarns* per la realizzazione di copertoni automobilistici, compositi, funi, paracaduti, cinture di sicurezza e molti altri oggetti impiegati in un ampio spettro di applicazioni industriali grazie alle sue ottime proprietà. Tipicamente la sua temperatura di transizione vetrosa è pari a 48°C e la temperatura di fusione è di 214°C; i filamenti hanno una

superficie liscia come le fibre di vetro e, inoltre, presentano una eccezionale resistenza all'abrasione. La sua resistenza a trazione, invece, può variare molto a seconda delle condizioni di realizzazione, arrivando ad assumere proprietà adatte all'impiego come rinforzo nei materiali compositi. Alle basse temperature il nylon 6 mantiene bene la sua resistenza, aumentando leggermente la sua resistenza a trazione, proprietà che poi viene ripristinata se la temperatura a cui è esposto ritorna quella ambiente; tuttavia, l'esposizione prolungata all'aria e alla luce causa una diminuzione permanente della resistenza, della resistenza a rottura, e dell'elongazione, oltre ad una tendenza delle fibre a diventare gialle. Prende fuoco difficilmente, una volta sciolto tende a gocciolare, mentre la sua infiammabilità può incrementare notevolmente se sottoposto a particolari trattamenti chimici o a causa di alcune vernici. La resistenza chimica del nylon 6 dipende dalla sostanza con cui entra in contatto: alcuni solventi, come acido nitrico o solforico, resine epossidiche e fenoliche, anche in piccole quantità, ne riducono la resistenza in misura dipendente dalla quantità e dal tempo durante il quale il nylon resta a contatto con questi agenti. Il nylon 6 è, inoltre, completamente atossico e chimicamente inerte, termicamente molto stabile e resistente se impiegato molto al di sotto della sua temperatura di fusione, mentre degrada se esposto a temperature sopra i 120°C per molte ore. La sua resistenza a fatica è migliore del nylon 6,6 e per questo si presta bene ad essere impiegato dove le fibre sono soggette a stress ripetuti, ed è dimensionalmente stabile se non viene immerso in acqua o esposto a temperature molto elevate.

4.4.3 L'EPS

Per poter confrontare i risultati ottenuti dalla simulazione del liner con struttura a lattice, è stato realizzato un ulteriore modello di geometria, condizioni al contorno (fatta eccezione per la velocità di impatto, che è stata impostata solamente a 7.5 m/s), e caratteristiche analoghe al provino descritto sopra, ma il cui liner è costituito dal comune materiale polimerico EPS. Per ottenere un paragone valido, gli è stata attribuita di volta in volta una densità equivalente tale per cui la sua massa sia la stessa della corrispondente configurazione a lattice considerata, e i cui valori sono riportati in tabella 4.5; i valori percentuali tra parentesi indicano la variazione rispetto alla densità di un EPS molto diffuso nei caschi attualmente in commercio, quello da 50 kg/m^3 , che, quindi, viene considerato come driver nel valutare l'aumento o la diminuzione di massa delle configurazioni a lattice analizzate. Si può notare che le configurazioni Cub 3, 4, 5 e Tet 3 sono più leggere dell'EPS, ovvero permetterebbero di realizzare un casco di minore massa di quelli sul mercato; sfortunatamente, come verrà esposto più avanti, queste strutture a

lattice non sono le migliori dal punto di vista dell'assorbimento energetico, perciò ottenere un miglioramento delle prestazioni protettive comporta un aumento, seppur moderato, della massa del liner.

La keyword con cui è stato modellato l'EPS è la `MAT_CRUSHABLE_FOAM` (063) della libreria di LS-Dyna, la cui curva tensione-deformazione è stata ricavata secondo quanto indicato e validato in studi precedenti ([59]). Si riportano, dunque, brevemente le equazioni utilizzate nel presente lavoro, mentre per una descrizione più approfondita si rimanda al testo appena citato. La tensione nelle tre zone di deformazione del materiale (elastica, plateau plastico, e di densificazione, mostrate in figura 4.7) segue le seguenti leggi:

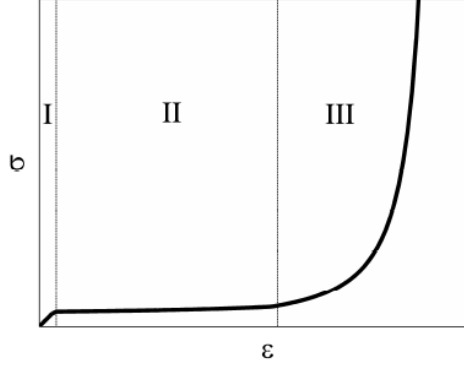


Figura 4.7: Curva tensione-deformazione a compressione tipica del polistirene espanso [59].

$$\sigma_I = E\varepsilon \quad (4.5)$$

$$\sigma_{II} = \sigma_Y + \frac{p_0\varepsilon}{1 - \varepsilon - R} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{III} = \frac{1}{D} \left(\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_D - \varepsilon} \right)^m \left(\sigma_Y + \frac{p_0\varepsilon}{1 - \varepsilon - R} \right) \quad (4.7)$$

dove:

- $\rho_{EPS} = 1040 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$ densità dell'EPS solido
- $R = \frac{\rho}{\rho_{EPS}} \rightarrow$ densità relativa della schiuma
- $E = AR^2 + BR \rightarrow$ modulo di Young dell'EPS, dove $A = 6640 \text{ MPa}$ e $B = 25.8 \text{ MPa}$

Tabella 4.5: Densità degli EPS equivalenti alle strutture a lattice studiate.

	$\rho_{EQ} [\text{kg/m}^3]$		$\rho_{EQ} [\text{kg/m}^3]$
Cub3	19.33 (-61.34%)	Tet3	52.00 (+4.00%)
Cub4	32.89 (-34.22%)	Tet4	92.78 (+85.56%)
Cub5	46.67 (-6.66%)	Tet5	135.33 (+170.66%)
Cub10	182.00 (+264.00%)	Tet10	563.11 (+1026.22%)
Cub20	693.22 (+1286.44%)	Tet20	720.00 (+1340.00%)

- $\nu = 0.01 \rightarrow$ rapporto di Poisson dell'EPS
- $\sigma_Y = CR^{1.5} \rightarrow$ tensione di snervamento
- $\varepsilon_D = 1 - 1.4R \rightarrow$ deformazione di completa densificazione dell'EPS
- $D = 2.3 \rightarrow$ costante per le schiume polimeriche
- $m = 1 \rightarrow$ costante per le schiume polimeriche

Capitolo 5

Impatto verticale

Dopo una descrizione dei parametri di settaggio del modello, in questo capitolo viene esposta la dinamica di un impatto che avviene ortogonalmente e centralmente al provino, seguita da una presentazione dei risultati ottenuti e da una loro analisi comparativa, sulla base anche delle considerazioni dedotte dai precedenti studi. Particolare attenzione viene data alla quantità di cui l'impattatore penetra nella struttura a lattice, alla quantità di energia assorbita da quest'ultima, e all'entità della forza trasmessa al layer inferiore, tutti aspetti che caratterizzano l'efficienza o meno di un dispositivo di protezione contro gli impatti.

5.1 Densità relativa

Un'importante caratteristica dei materiali per la protezione dagli impatti è la loro capacità di assorbire energia per unità di massa. In questo caso, avendo preso in considerazione solo un provino con struttura a lattice e non un casco intero, la comparazione è migliore se, invece dell'unità di massa, si considera la densità relativa della configurazione di struttura a lattice considerata.

La densità relativa è definita come il rapporto tra la densità del solido cellulare ($\bar{\rho}$) e la densità del materiale di cui è realizzato (ρ), o, alternativamente, come il rapporto tra l'area delle pareti della cella (\bar{A}) e l'area della cella (A), ovvero assume anche il significato di frazione volumetrica di solido; è una grandezza adimensionale. Applicando il criterio utilizzato anche per gli honeycomb [44], le densità relative delle strutture a lattice qui analizzate sono state calcolate come segue; per una migliore comprensione, le figure 5.1 illustrano quali sono le grandezze chiamate in gioco nel caso di struttura a lattice con celle prismatiche e piramidali.

Tabella 5.1: Densità relative delle strutture a lattice analizzate.

Tipo di cella	$\bar{\rho}/\rho$	Tipo di cella	$\bar{\rho}/\rho$
Cub 3	0.15	Tet 3	0.2049
Cub 4	0.20	Tet 4	0.2732
Cub 5	0.25	Tet 5	0.3415
Cub 10	0.50	Tet 10	0.6830
Cub 20	1.00	Tet 20	1.3660

Per le celle prismatiche:

$$\bar{A} = \frac{4Lt}{2} = 2Lt \quad (5.1)$$

$$A = L^2 \quad (5.2)$$

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho} = \frac{\bar{A}}{A} = \frac{2Lt}{L^2} = \frac{2t}{L} \quad (5.3)$$

Per le celle piramidali:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{(L + \sqrt{3}L)t}{2} \\ &= \frac{Lt(1 + \sqrt{3})}{2} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$= Lt \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$A = \frac{1}{2}L^2 \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\rho}}{\rho} &= \frac{\bar{A}}{A} = \frac{Lt(1 + \sqrt{3})}{2} \frac{2}{L^2} \\ &= (1 + \sqrt{3}) \frac{t}{L} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Considerando che lo spessore delle celle è costante ed è pari a 1 mm per tutti i casi analizzati, mentre la lunghezza dello spigolo L della cella dipende dalla densità di celle della struttura a lattice lungo lo spessore del provino, le formule sopra hanno condotto ai risultati riassunti in tabella 5.1.

Volendo scriverli secondo densità relativa crescente (scelta che verrà adottata nei grafici che seguiranno), i casi studiati possono essere riordinati come segue:

$$\text{Cub3} \rightarrow \text{Cub4} \rightarrow \text{Tet3} \rightarrow \text{Cub5} \rightarrow \text{Tet4} \rightarrow \text{Tet5} \rightarrow \text{Cub10} \rightarrow \text{Tet10} \rightarrow \text{Cub20} \rightarrow \text{Tet20}$$

In termini di massa (si veda la tabella 4.5), come si diceva alla fine del precedente capitolo, solo le prime quattro configurazioni permettono di ottenere un liner più leggero rispetto a quello dei caschi tradizionali.

5.2 Descrizione del fenomeno d'impatto

Generalmente, durante un fenomeno d'impatto si possono distinguere tre fasi temporali distinte: quella in cui l'impattatore cade e si muove verso il provino, l'intervallo durante il quale avviene l'urto, e quella di rimbalzo (figura 5.2).

Durante la prima fase, l'impattatore, cadendo, e trascurando gli effetti dell'aria, converte la sua energia potenziale in cinetica; nello studio qui condotto, non essendoci un apparato sperimentale ma utilizzando solo software numerici, la sfera di acciaio possiede solo energia cinetica, dato che vengono trascurati gli effetti della gravità. Per riprodurre sperimentalmente il caso studiato, sarebbe, dunque, sufficiente usare un impattatore di uguali caratteristiche che viene lasciato cadere liberamente da differenti altezze, tali da fargli raggiungere, al momento dell'impatto, la velocità richiesta. La seconda fase è quella definita temporalmente dal momento in cui avviene il contatto tra l'impattatore e la superficie della lamina superiore di alluminio, e l'istante in cui questo contatto cessa a causa del cambio di direzione subito dall'impattatore, che, quindi, rimbalza indietro grazie al ritorno elastico del materiale colpito. Nella terza e ultima fase, l'impattatore si allontana dal provino con una velocità minore di quella iniziale, ma costante a causa, come già accennato, del fatto che l'accelerazione di gravità è stata trascurata; a seconda della velocità e direzione di impatto, in generale, si può assistere anche al completo distacco della lamina superiore dal liner e, in alcuni casi, anche del liner dal layer inferiore.

Il regime di interesse pratico è chiaramente il secondo, quello d'impatto. In questa fase l'impattatore, molto più rigido dei componenti costituenti il provino, collide contro la lamina metallica superiore, deformandola e comprimendola sulla struttura a lattice sottostante, la quale si deforma plasti-

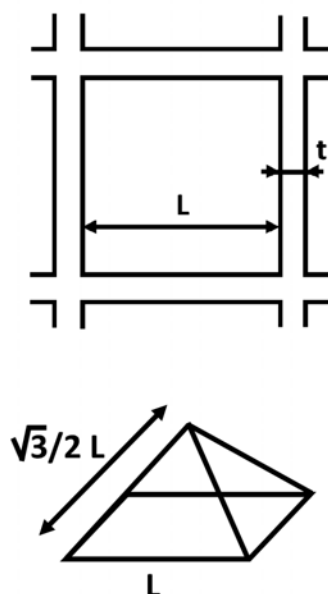


Figura 5.1: Sezione di una cella prismatica (in alto) e cella elementare piramidale (in basso), con le rispettive dimensioni.

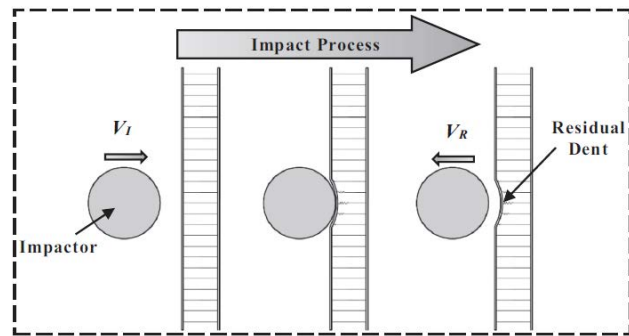
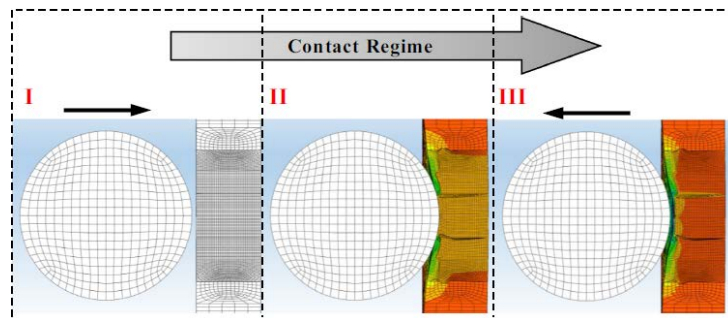
(a) *Processo d'impatto.*(b) *Fasi del fenomeno di contatto.*

Figura 5.2: Schema delle varie fasi caratterizzanti la dinamica dell'impatto [54].

camente, o va in failure, dissipando, così, energia e riducendo sia la forza che l'energia trasmessa al layer rigido inferiore. A sua volta, questa fase può essere suddivisa in ulteriore tre stadi: I) quello in cui l'impattatore rallenta, II) quello in cui l'impattatore arriva a velocità zero, e III) quello in cui la sfera acquista nuovamente velocità a causa del ritorno elastico. Durante il primo stadio la sfera di acciaio riduce la sua velocità dal valore iniziale a zero man mano che preme il top sheet sul liner, facendolo deformare e collassare; la sua durata temporale influenza la decelerazione subita dall'impattatore e, perciò, il picco di forza trasmessa. Il secondo stadio si riduce, di fatto, ad un istante, a quel momento in cui l'impattatore raggiunge la maggiore profondità di penetrazione nella struttura a lattice, la sua velocità è nulla, e si realizza il picco di forza trasmessa alla lamina inferiore. Nel terzo e ultimo stadio, l'impattatore accelera da zero ad una certa velocità di rimbalzo dipendente dalle caratteristiche del liner, di segno opposto rispetto a quello con cui ha impattato sul provino, e generalmente di modulo minore se il provino ha assorbito energia.

5.3 Casi scartati

Nel paragrafo precedente si è accennato al fatto che durante la prima fase dell’impatto la sfera penetra nel liner di una certa quantità prima di arrestarsi e tornare indietro a causa del ritorno elastico dei materiali. Questa profondità di penetrazione nella struttura a lattice dipende sia dalla velocità di impatto, sia dalla struttura a lattice stessa, intendendo per questa la forma delle celle e le loro dimensioni. Come si può vedere dalle figure 5.3, la profondità che la sfera raggiunge può essere molto elevata o molto scarsa. In alcuni casi questa profondità sarebbe ben oltre lo spessore del provino multistrato, se non fosse stato inserito un criterio di contatto tra la sfera e la lamina inferiore, ad indicare che il liner non è sufficiente a trattenere l’impattatore, ovvero che quest’ultimo passerebbe completamente attraverso tutto il provino, rendendo, di fatto, inutile l’azione protettiva dello stesso. Ecco che, allora, il primo parametro tenuto in considerazione in questo studio è stato lo spostamento lungo l’asse verticale dell’impattatore e, per le considerazioni appena fatte, si sono scartati da osservazioni più approfondite i casi in cui la sfera arriva a toccare il layer inferiore del provino; le profondità di penetrazione raggiunte in ogni configurazione analizzata sono riassunte in tabella 5.2.

Tabella 5.2: Profondità raggiunta dall’impattatore (in mm) nei casi considerati per impatto verticale centrale.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s
Cub 3	38.11	fail	fail
Cub 4	25.64	fail	fail
Cub 5	21.09	fail	fail
Cub 10	9.11	14.40	22.10
Cub 20	4.66	6.77	10.28
Tet 3	15.42	29.47	fail
Tet 4	10.46	20.02	34.63
Tet 5	10.03	16.97	28.14
Tet 10	5.21	7.79	11.76
Tet 20	3.74	5.48	7.90

Come si può osservare dai dati ottenuti, tutti i casi analizzati si sono dimostrati adatti a resistere ad un impatto a velocità 4.43 m/s. Nel caso di velocità iniziale di 7.5 m/s, invece, le configurazioni Cub 3, Cub 4 e Cub 5 si sono dimostrate inefficienti a resistere all’impatto, dato che l’impattatore sfonda completamente il liner in tutto il suo spessore e va a sbattere sul layer inferiore; a velocità maggiore, anche la configurazione Tet 3 non si è rivelata adatta a tale tipologia di urto, portando di nuovo, sebbene in tempi diversi, al completo sfondamento del liner.

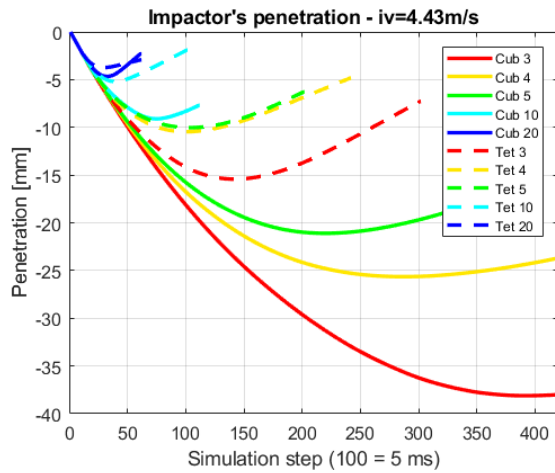
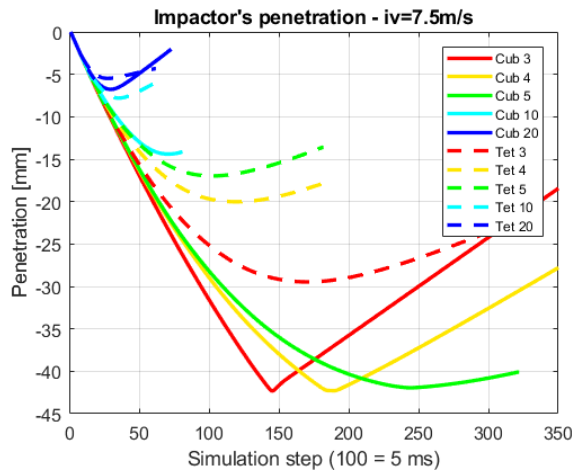
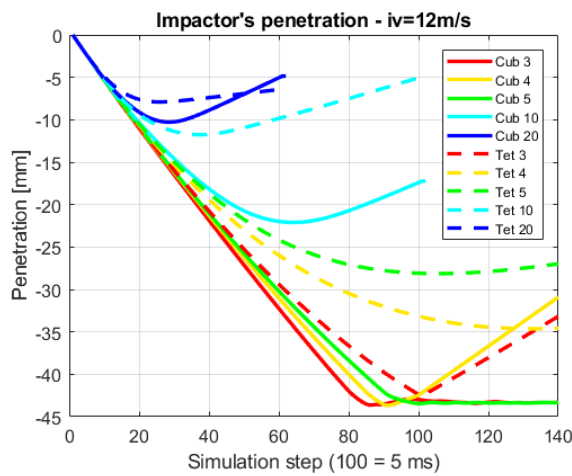
(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s .(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s .(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s .

Figura 5.3: Profondità di penetrazione dell'impatatore nel provino per differenti velocità iniziali, nel caso di impatto verticale centrale.

Come ci si aspettava, le strutture a lattice con celle piramidali subiscono una minore penetrazione a tutte le velocità, essendo l'insieme più rigido a causa della presenza degli elementi obliqui, soggetti a sforzo normale, che, quindi, forniscono un ulteriore ostacolo allo sfondamento da parte di oggetti con cui si potrebbe venire a contatto in caso di incidente stradale.

Altra osservazione può essere fatta in relazione alla densità relativa rispetto alla profondità di penetrazione. Si nota dalla figura 5.4 che le tre curve corrispondenti alle tre velocità analizzate hanno circa lo stesso andamento, soprattutto per densità relative superiori a 0.5, sebbene, come ci si aspettava, la profondità raggiunta è maggiore man mano che la velocità d'impatto aumenta. Al di sotto del valore di densità relativa 0.4, invece, si nota un repentino aumento della penetrazione raggiunta a causa della minore quantità di materiale impegnato a contrastare il fenomeno d'impatto, e alla maggiore snellezza degli elementi *beam* che risultano più lunghi a causa della maggiore dimensione delle celle, provocando a loro volta una diminuzione della tensione di buckling e, quindi, riducendo la resistenza degli elementi stessi. Tuttavia, questo non è l'unico parametro di cui dover tenere conto per determinare la bontà o meno di una particolare struttura a lattice al fine della protezione contro gli impatti; nei paragrafi successivi attenzione verrà posta alla quantità di energia assorbita, e al picco di forza trasmessa al layer inferiore del provino multistrato che, se costituisse un casco, equivarrebbe alla forza trasmessa alla testa del motociclista.

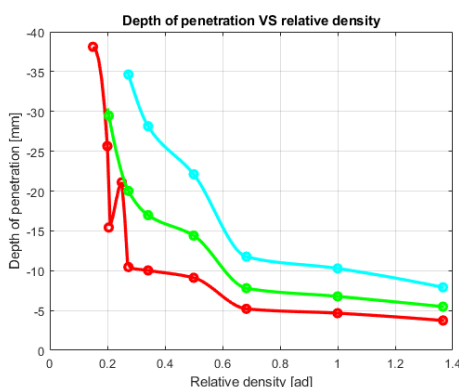


Figura 5.4: Andamento della profondità di penetrazione del liner rispetto alla densità relativa dello stesso. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.

5.4 Energia assorbita

Trascurando il calore generato durante il fenomeno d'urto, o causa degli attriti, le uniche altre forme di energia che istantaneamente compaiono nel sistema sono quella cinetica, dovuta al movimento dei vari componenti del provino, e quella interna, dovuta all'energia da essi accumulata internamente, principalmente sotto forma di deformazione plastica. In formule dunque si

può scrivere:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_k(t) + E_I(t) \\ &= (E_{k_{impactor}}(t) + E_{k_{ts}}(t) + E_{k_L}(t)) + (E_{I_{ts}}(t) + E_{I_L}(t)) \end{aligned} \quad (5.7)$$

dove:

- i pedici k e I si riferiscono rispettivamente alle energie cinetica e interna;
- i pedici $impactor$, ts e L si riferiscono rispettivamente all'impattatore sferico, alla lamina superiore (*top sheet*), e al liner con struttura a lattice.

Nelle ipotesi poste e per come è stato modellato il sistema, non ci sono forme di energia aggiuntive, per cui vale la legge di conservazione dell'energia durante tutta l'evoluzione del fenomeno di impatto.

Un istante prima dell'urto il provino è fermo e l'unico corpo in movimento è l'impattatore, dunque l'energia iniziale, ovvero l'energia all'impatto, è unicamente quella cinetica della sfera di acciaio:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{k_{impactor}} \\ &= \frac{1}{2} m_{impactor} v_i^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

tale è anche, per quanto detto sopra, l'energia totale finale. Per le velocità analizzate di 4.43, 7.5 e 12 m/s le energie di impatto sono pari a, rispettivamente, 2.94 J, 8.44 J, e 21.6 J.

I modi di ricavare l'energia assorbita dalla struttura a lattice sono due: si chiede direttamente al software di valutarla, oppure si fa la differenza tra l'energia cinetica iniziale e quella di rimbalzo dell'impattatore. Il primo metodo è diretto ma non sempre affidabile in quanto potrebbe contenere errori numerici che si sono propagati durante la simulazione; infatti, nei casi studiati, questo metodo fornisce valori completamente errati, come si può vedere dalla figura 5.5, nella quale l'energia interna del liner assume valori ben superiori alla quantità di energia iniziale; un'ipotesi per giustificare tale andamento delle energie interne è quella per cui il failure di molti elementi *beam*, che si verifica durante l'impatto, anche a bassa velocità, ne provoca la cancellazione da parte del software per mantenere l'efficienza computazionale, causando, così, una propagazione di errori di calcolo considerevole, e un valore dell'energia interna della sola struttura a lattice molto superiore all'energia iniziale dell'impattatore. Il secondo metodo, invece, offre una stima molto più veritiera del fenomeno di dissipazione energetica, ed è perciò quest'ultimo

il metodo utilizzato nel prosieguo del presente testo per valutare la quota di energia assorbita dal liner.

$$\begin{aligned} E_a &= E_{k_{impactor}}(t_f) - E_{k_{impactor}}(t_i) \\ &= \frac{1}{2}m_{impactor}(v_i^2 - v_f^2) \end{aligned} \quad (5.9)$$

dove:

- $m_{impactor}$ è la massa dell'impattatore e vale 0.3 kg;
- v_i e v_f sono, rispettivamente, le velocità iniziale e finale, ovvero di rimbalzo, dell'impattatore.

Da precedenti studi condotti su scenari simili a quello qui analizzato, si evince che l'energia assorbita è principalmente convertita in energia interna del liner e, di questa, oltre l'80% è sotto forma di energia di deformazione plastica. Nel presente lavoro non è stato possibile verificare questa informazione a causa, come accennato poche righe fa, dell'elevato errore numerico. In questa sede non vengono, dunque, fatte considerazioni sulle varie forme di energia costituenti quella interna, limitandosi a fare osservazioni sull'energia cinetica persa dall'impattatore durante il fenomeno d'urto, in quanto sufficiente a descrivere la capacità di assorbimento di energia del provino, indipendentemente da quale quota compete ad un layer piuttosto che ad un altro, nonostante, per certo, un ruolo di primaria importanza è giocato dalla deformazione plastica della struttura a lattice. Sulla base di queste considerazioni, l'andamento dell'energia cinetica della sfera nei vari casi considerati è riportato in figura 5.6, mentre una comparazione tra densità relativa delle strutture a lattice e energia assorbita dal liner è plottata in figura 5.7. Come si può notare, all'aumentare della densità di celle lungo lo spessore del provino si osserva un decadimento dell'energia cinetica più repentino, ovvero l'impattatore viene rallentato tanto più velocemente quanto maggiore è la

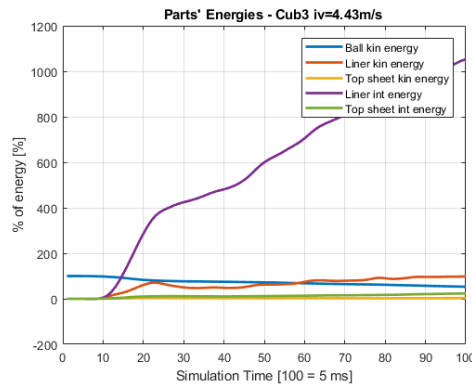


Figura 5.5: Andamento delle varie forme di energia dei componenti costituenti il provino; si nota come l'errore numerico dovuto al failure degli elementi beam faccia assumere alle energie interne valori completamente errati.

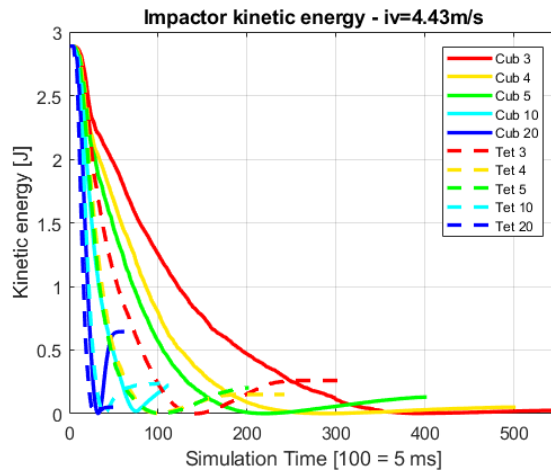
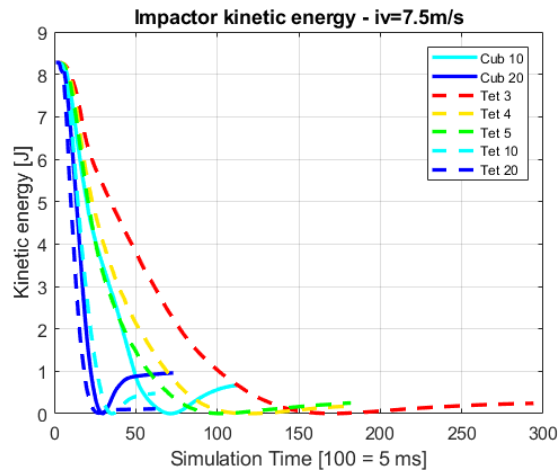
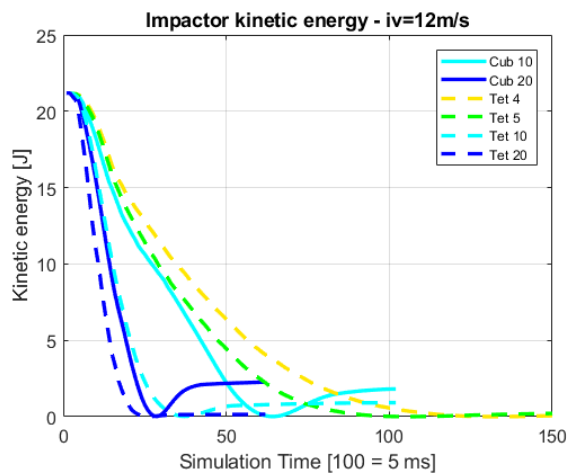
(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s .(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s .(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s .

Figura 5.6: Andamento dell'energia cinetica dell'impattatore nel caso di urto verticale centrale.

densità relativa della struttura a lattice, e la forza trasmessa cresce di conseguenza fino a raggiungere il suo massimo quando la velocità della sfera è nulla. Tale effetto sembra non essere influenzato dall'aumentare dell'energia d'impatto, potendo, infatti, osservare che il tempo in cui l'impattatore rallenta a zero è praticamente sempre lo stesso per la specifica configurazione del liner; questo, ovviamente, influenza la forza trasmessa, che aumenta all'aumentare della velocità d'impatto e della densità della struttura a lattice, come si vedrà nella sezione successiva; tale comportamento è da attribuirsi alla natura del nylon 6, che reagisce diversamente a seconda della velocità di deformazione a cui è sottoposto, e che, perciò, per una stessa configurazione della struttura a lattice, riesce a rallentare l'impattatore circa nello stesso tempo anche se questo lo colpisce a differente velocità.

Confrontando la capacità di assorbimento dell'energia rispetto alla densità relativa non si nota un andamento particolare, tuttavia, è comune a tutte le velocità di impatto analizzate che la configurazione Cub 20 (densità relativa pari a 1) sia la più sfavorevole sotto questo aspetto, mostrando un calo dal 3 al 20% nell'assorbimento di energia rispetto alle altre strutture a lattice considerate.

È stato anche considerato un coefficiente identificativo dell'efficienza di assorbimento dell'energia riferito ai singoli casi studiati, già utilizzato in un precedente articolo pubblicato [54], e definito come il rapporto tra l'energia assorbita e quella totale al momento dell'impatto:

$$\eta = \frac{E_a}{E_{total}} \quad (5.10)$$

Tale coefficiente offre un indicatore immediato dell'attitudine o meno di quella particolare struttura a lattice all'impiego come assorbitore di energia nei fenomeni d'impatto. Dalla tabella 5.3 si vede che, in generale, l'efficienza è elevata, superiore al 90%, mentre è più scarsa nelle strutture a lattice con configurazione Cub 20 e Tet 10, che sono anche quelle in cui i picchi di forza trasmessa sono tra i più elevati. Nelle strutture Cub si osserva una leggera

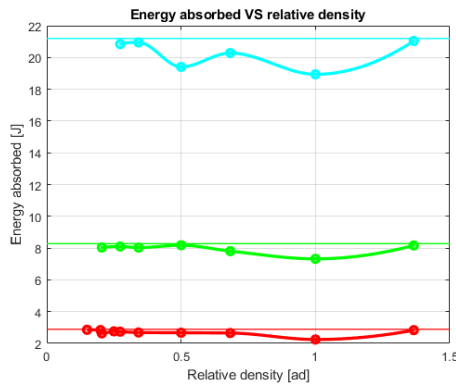


Figura 5.7: Efficienza di assorbimento energetico del liner in funzione della sua densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s; quelle orizzontali indicano la massima energia che può essere assorbita.

Tabella 5.3: Efficienza (in %) di assorbimento di energia nei casi considerati per impatto verticale centrale.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	avg	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	98.85	/	/	/	/
Cub 4	98.23	/	/	/	/
Cub 5	95.49	/	/	/	/
Cub 10	92.48	98.78	91.56	94.27	96.65 (-2.15%)
Cub 20	77.70	88.44	89.36	85.17	88.38 (-0.07%)
Tet 3	90.97	97.07	/	/	97.18 (+0.11%)
Tet 4	94.78	97.85	98.33	/	96.37 (-1.51%)
Tet 5	92.98	96.98	98.86	96.27	95.74 (-1.28%)
Tet 10	91.85	94.32	95.69	93.95	96.76 (+2.59%)
Tet 20	98.08	98.64	99.29	98.67	83.60 (-15.25%)

diminuzione dell'efficienza nell'assorbimento di energia all'aumentare della densità, mentre per le strutture Tet non si può dire altrettanto, essendo più difficile individuare un trend; in generale, però, l'efficienza di queste ultime aumenta all'aumentare della velocità di impatto, probabilmente perché il maggior numero di elementi *beam* offre una maggiore opportunità di assorbimento di energia per unità di volume. Facendo una media delle efficienze alle velocità considerate, le configurazioni migliori per impatto centrale ortogonale risultano essere le Cub 10, Tet 5 e Tet 10, tuttavia, come presentato nella successiva sezione, bisogna tenere conto anche delle forze trasmesse al layer inferiore, e non solo della quantità di energia assorbita dal materiale.

Sempre dalla tabella 5.3, se confrontiamo i casi analizzati con il comportamento di un EPS di densità equivalente, osserviamo una pressoché analoga quantità di energia assorbita, con differenze che si attestano tra -15% (l'EPS è meno efficiente del 15%) e +2.5% (l'EPS è più efficiente del 2.5%), dunque, a parità di massa, i due mostrano una efficienza di assorbimento energetico praticamente uguale. Si ricorda che questo confronto con il polistirene si riferisce unicamente agli impatti con velocità di 7.5 m/s, ritenendo di primaria importanza questo caso essendo stabilito dalla normativa.

Un'altra importante osservazione riguarda i pannelli sandwich con anima in honeycomb. Come accennato inizialmente, il valore di 4.43 m/s di velocità di impatto e la forma e massa della sfera impattante, nonché le dimensioni del provino, sono state assunte in riferimento al paper [54] come termine di paragone per verificare la migliore attitudine all'assorbimento energetico delle strutture a lattice rispetto agli honeycomb. Andando a confrontare i risultati ottenuti nell'articolo appena citato con quelli esposti in questo documento, si vede che l'efficienza energetica dell'honeycomb è pari a circa il 84.93%,

contro una media del 94.86% per le strutture a lattice considerate (eccezione fatta per la configurazione Cub 20 che, invece, risulta più scarsa), alcune delle quali arrivano quasi al 99% di efficienza.

5.5 Forze trasmesse

L'andamento della forza trasmessa alla lamina inferiore per impatti alle tre diverse velocità considerate è riportato in figura 5.9. Tale forza è, in realtà, la sola componente lungo l'asse y , in quanto l'urto avviene anch'esso verticalmente e centralmente su un provino simmetrico, dunque ogni componente in direzione orizzontale sarà compensata dalla corrispettiva nella metà opposta del provino, cosicché la risultante in tale direzione risulti praticamente nulla. E' interessante notare dalla figura 5.8 quale sia l'effetto che la presenza del liner ha nell'attenuare tali forze rispetto al caso (in figura indicato con la linea nera tratteggiata) in cui esso non sia presente: a seconda della configurazione della struttura a lattice, i valori registrati sono da $\frac{1}{5}$ a $\frac{1}{19}$ rispetto al caso in cui non sia presente il liner.

Come ci si aspettava, il picco di forza trasmessa è maggiore all'aumentare della velocità a cui si verifica la collisione, con andamento quasi lineare. Dato che la forza massima si verifica nel momento in cui l'impattatore rallenta fino a velocità nulla, come per le energie, tale picco avviene temporalmente circa nello stesso momento anche variando l'entità dell'impatto, mentre si osserva che maggiore è la rigidità della struttura a lattice e meglio è definito il picco; quando, invece, si testano le configurazioni che hanno densità minore lungo lo spessore, si ottengono

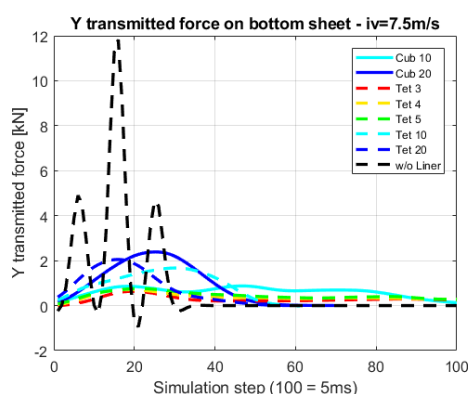


Figura 5.8: Forza trasmessa per impatto a 7.5 m/s in presenza e in assenza del liner in struttura a lattice.

generalmente uno o due picchi seguiti da una forza di entità minore che perdura nel tempo, probabilmente rumore ad alta frequenza eliminabile cambiando la frequenza di taglio del filtro applicato. In generale, si osserva anche che la forza trasmessa nel caso di impiego delle strutture a celle prismatiche è minore, essendo queste dotate di minore rigidità rispetto alle corrispondenti configurazioni a celle piramidali; a quest'ultima considerazione fa eccezione il caso Cub 20 che, come visto nella precedente sezione, oltre a dimostrarsi

Tabella 5.4: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) nei casi considerati per impatto verticale centrale.

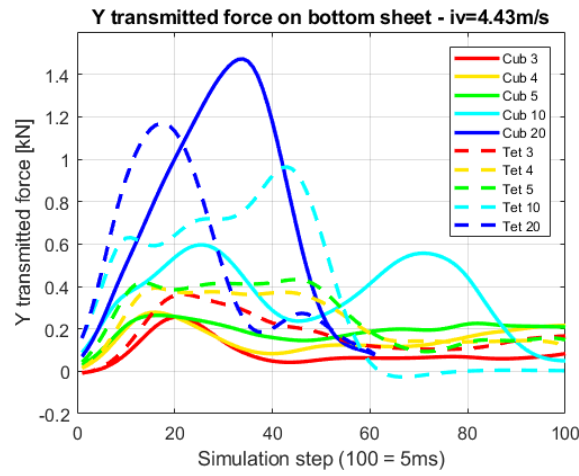
	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	0.2556	/	/	/
Cub 4	0.2780	/	/	/
Cub 5	0.2635	/	/	/
Cub 10	0.5959	0.9890	1.7058	3.0140 (+204.75%)
Cub 20	1.4726	2.3877	4.0421	4.4113 (+84.75%)
Tet 3	0.3626	0.6349	/	1.7514 (+175.85%)
Tet 4	0.3928	0.7083	0.9854	2.3640 (+233.76%)
Tet 5	0.4324	0.7574	1.0491	2.8002 (+269.71%)
Tet 10	0.9634	1.6741	2.6009	4.2391 (+153.22%)
Tet 20	1.1681	2.0518	3.1227	4.8971 (+138.67%)

peggiore sotto l'aspetto dell'assorbimento energetico, si dimostra anche qui il caso più sfavorevole essendo quello che, tra tutti quelli studiati, fa registrare il valore più alto di forza trasmessa al layer inferiore.

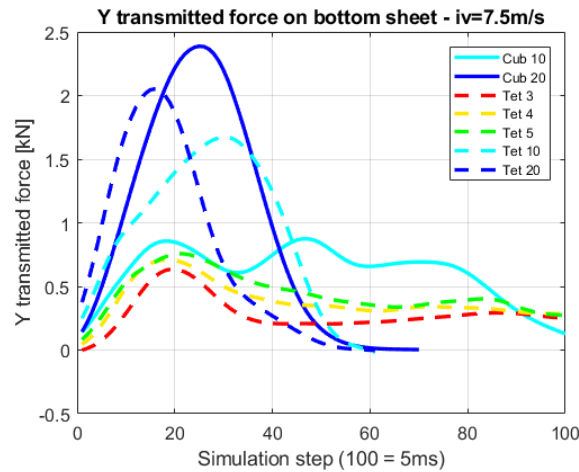
Analizzando la variazione delle forze trasmesse rispetto alla densità relativa, si nota un andamento circa lineare per bassi valori di densità relativa, andamento che poi sale tanto più repentinamente quanto maggiore è la velocità della sfera, fino a raggiungere un massimo per una densità relativa pari a 1, che si realizza per una struttura a lattice in configurazione Cub 20; tale picco diviene poi più accentuato passando da 4.43 a 7.5 a 12 m/s di velocità di impatto. Quindi, se le celle sono prismatiche e di dimensioni molto minori di quelle dell'impattatore, si ha un decadimento delle prestazioni protettive sia in termini di energia assorbita sia in termini di forza trasmessa.

Le forze più basse, e alcuni dei valori più alti di energia assorbita, si registrano nelle configurazioni di strutture a lattice a minore densità, essendo quelle con la minore massa che, a seguito dell'impatto, va a premere sul layer sottostante. Per ridurre le forze trasmesse, dunque, si dovrebbe agire sulla massa del liner, aspetto questo di estrema utilità in un casco motociclistico in quanto ridurrebbe anche l'inerzia della testa in caso di incidente, diminuendo di conseguenza i carichi agenti sul collo e l'entità delle conseguenti lesioni in cui si potrebbe incorrere. Parlando in termini di massa, la configurazione Tet 20 è quella più pesante tra quelle studiate, tuttavia, il maggior numero di elementi *beam* presenti fa sì che il valore massimo di forza trasmessa in seguito all'urto sia dal 14 al 22% più basso della configurazione Cub 20.

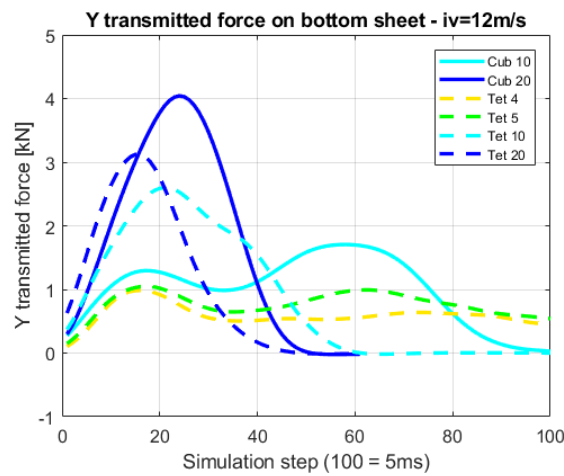
Si osservi anche che non è possibile in questa sede definire un valore di soglia per le forze trasmesse così da avere un termine di paragone con la normativa vigente, in quanto le modalità con cui sono stati condotti gli studi



(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s.



(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s.



(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s.

Figura 5.9: Forza verticale trasmessa al layer inferiore.

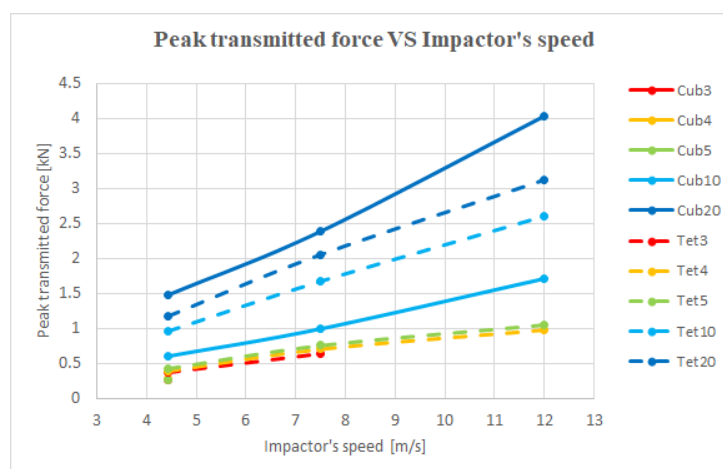


Figura 5.10: Forza trasmessa in funzione della velocità d'impatto nei vari casi analizzati.

qui presentati sono notevolmente diverse da quelle con cui i test vengono eseguiti. Non ha, dunque, senso né riferirsi ad un valore limite di accelerazione massima di soglia oltre la quale non si può andare, né un termine equivalente all'*Head Injury Criterion (HIC)*, parametri ai quali, invece, la ECE 22.05 si riferisce come discriminanti della validità o meno di un casco motociclistico di proteggere la testa del conducente.

E', però, possibile, come fatto per l'energia assorbita, confrontare i risultati ottenuti con liner in EPS di densità equivalente. In tal caso le differenze sono decisamente notevoli, come si può vedere anche dalla figura 5.12 e dalla tabella 5.4; parlando in termini percentuali si osserva che la forza massima trasmessa dalla struttura a lattice oscilla da -84% a -269% rispetto ai corrispondenti valori per l'EPS. Questo si ipotizza sia dovuto al fatto che il polistirene espanso è molto meno deformabile della struttura a lattice di corrispondente densità; infatti, confrontando la profondità di penetrazione raggiunta nei due materiali, si osserva che è molto maggiore per le strutture a lattice rispetto all'EPS di densità equivalente. Questo significa che, a parità di velocità d'impatto, nei primi la sfera viene rallentata in uno spazio, e quindi,

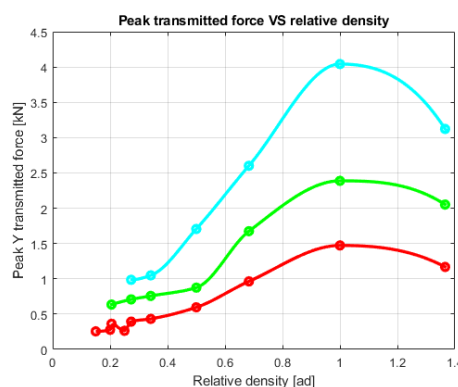


Figura 5.11: Forza trasmessa in funzione della densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.

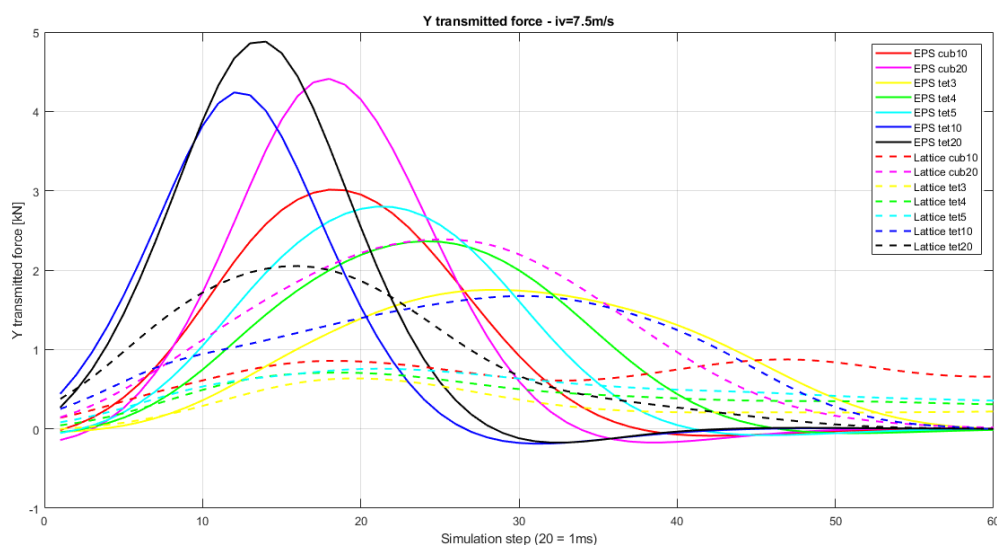


Figura 5.12: Comparazione tra gli andamenti nel tempo della forza trasmessa da un liner in EPS (linee continue) e uno in struttura a lattice (linee tratteggiate), per impatto verticale centrale a 7.5 m/s.

in un tempo, maggiore; ciò significa che la decelerazione subita dall'impattatore è maggiore nel caso del polistirene, e, per la legge di Newton, essendo la massa la stessa, la forza trasmessa è maggiore per gli EPS e minore per le strutture a lattice. Questo aspetto si può osservare anche in figura 5.12 dove i picchi per dell'EPS avvengono in genere prima di quelli delle strutture a lattice.

5.5.1 Effetto della sensibilità del materiale alla velocità di deformazione

All'inizio del presente lavoro si è fatto cenno al fatto che è stato testato a scopo conoscitivo anche il caso in cui il liner, sempre costituito da una struttura a lattice in nylon, e quindi modellato con un materiale di tipo *piecewise linear plasticity*, sia caratterizzato da una risposta quasi insensibile agli effetti della velocità con cui, a seguito dell'impatto, la deformazione avviene. I coefficienti di Cowper-Symonds C e P sono, quindi, stati posti, rispettivamente, pari a 0.01 e 5.6, ed è stata testata la risposta del materiale ad un impatto centrale verticale a 7.5 m/s. I risultati ottenuti sono riportati in figura 5.13 e in tabella 5.5, in cui compaiono anche gli andamenti e i valori ottenuti, invece, per il caso reale in cui la struttura a lattice risente sostanzialmente degli effetti della velocità di deformazione. Si può immediatamente constata-

Tabella 5.5: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) ed efficienza di assorbimento energetico (in %) nei casi considerati, per impatto centrale verticale a 7.5 m/s e modelli costitutivi poco sensibile alla velocità di deformazione (A) e reale (B).

	F trasmessa [kN]		Efficienza energetica [%]	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Cub 3	/	/	/	/
Cub 4	/	/	/	/
Cub 5	/	/	/	/
Cub 10	2.0044	0.9890	81.89	98.78
Cub 20	5.3942	2.3877	61.40	88.44
Tet 3	1.5584	0.6349	97.81	97.07
Tet 4	5.0593	0.7083	95.72	97.85
Tet 5	2.3284	0.7574	95.28	96.98
Tet 10	4.3877	1.6741	70.84	94.32
Tet 20	6.3610	2.0518	95.81	98.64

re come un materiale molto sensibile alla velocità di deformazione abbia una risposta completamente diversa rispetto ad un materiale che, invece, risente poco di questo aspetto, e si intuisce il motivo per cui per la struttura a lattice sia stato usato proprio un materiale con le caratteristiche descritte. I picchi di forza trasmessa sono molto maggiori per tutte le configurazioni di celle se la velocità di deformazione ha poca influenza sul comportamento del materiale, e anche la capacità di assorbimento energetico ne risente, attestandosi qualche punto percentuale in meno. Non sono stati tenuti in considerazione i casi Cub 3, 4, e 5 a causa del completo sfondamento che questi subiscono per la tipologia di impatto considerata.

5.6 Materiale coinvolto nell'impatto

Come mostra la figura 5.14 si osserva che, al momento dell'urto, la prima porzione di materiale a cedere è quella diametralmente opposta alla regione in cui avviene l'impatto, ovvero quella sulla verticale della sfera ma in corrispondenza del layer inferiore; questo è dovuto al fatto che il materiale di cui la struttura a lattice è fabbricata, il nylon 6, ha una diversa resistenza a compressione e a trazione, dimostrandosi molto più cedevole a trazione. Quando l'impattatore colpisce la lamina di alluminio superiore, questa va a comprimere la struttura a lattice direttamente sotto la zona dell'urto, facendo così sollevare le zone periferiche del provino, comportamento che risulta in una dilatazione degli elementi vicini al layer inferiore; questi, essendo sottoposti a

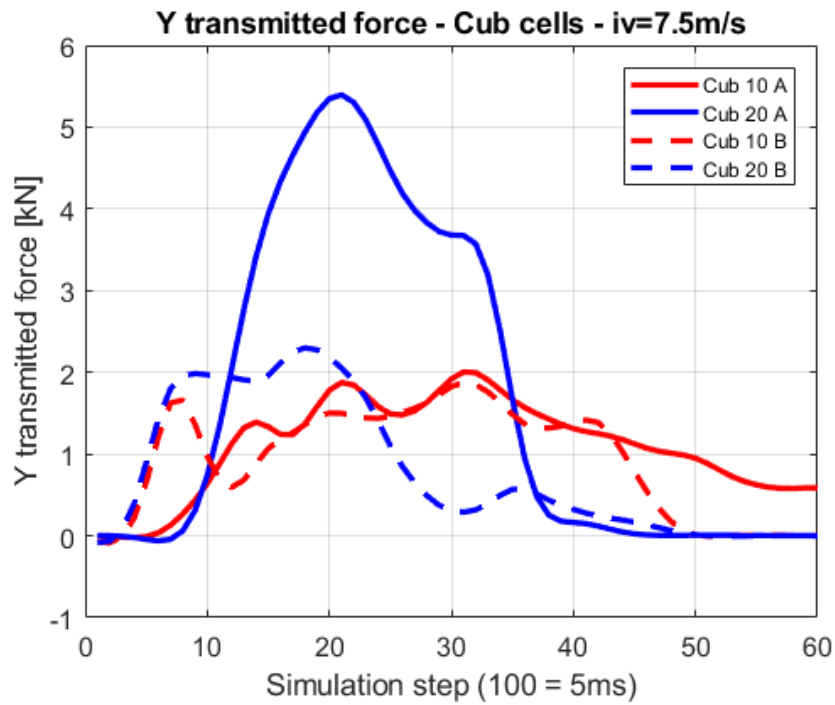
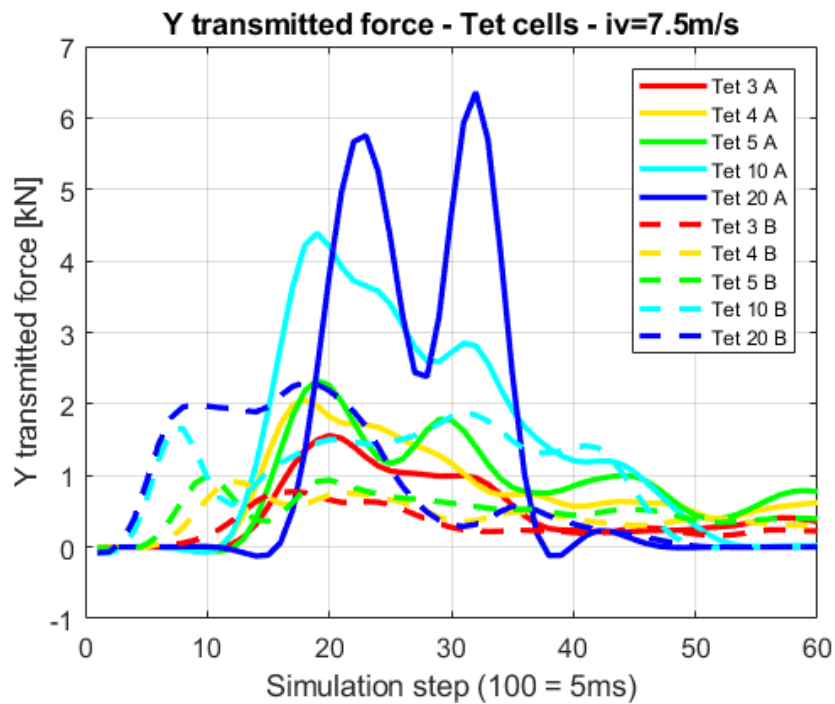
(a) *Celle prismatiche.*(b) *Celle piramidali.*

Figura 5.13: Comparazione delle forze trasmesse al layer inferiore per modello costitutivo poco sensibile alla velocità di deformazione (casi A) e per modello costitutivo reale (casi B).

trazione, resistono meno e vanno in *failure* dissipando energia, mentre quelli a ridosso della zona di impatto, sottoposti a compressione, si deformano plasticamente. La zona di materiale che subisce le deformazioni più rilevanti può essere individuata in un tronco di cono avente per asse la direzione di impatto, e diametro della faccia superiore pari a circa il doppio del diametro dell'impattatore, mentre la base risulta più ampia, estendendosi fino a quasi le estremità del provino, anche se l'effettiva quantità di materiale interessato dipende dalla densità del liner. Le celle a metà spessore, invece, cominciano a deformare solo più tardi, quando la lamina di alluminio arriva quasi a toccarle, mentre prima avviene il cedimento delle celle a ridosso del layer superiore; analogo comportamento avviene vicino al layer inferiore, dove la struttura a lattice si deforma pesantemente solo per lo strato di celle più esterno.

Tutto ciò avviene sia per le configurazioni Cub che per quelle Tet, ma in quest'ultimo caso la profondità di penetrazione è minore a causa dell'azione anche degli elementi diagonali, e la struttura a lattice lontana dalla zona di impatto risulta meno interessata dall'effetto di questo evento.

In sostanza, la deformazione del liner avviene simmetricamente, con un cedimento iniziale delle celle a ridosso dei layer inferiore e superiore che man mano si propaga alle celle più interne del provino, andando più in profondità per i liner con densità più bassa, mentre rimane limitato agli strati superficiali per quelli con le densità maggiori. Analogamente, la zona interessata dall'urto, quella cioè che viene deformata maggiormente, è tanto minore quanto più denso è il liner, concetto che spiega anche il perché le forze trasmesse in questi casi siano maggiori rispetto alle strutture a lattice a minore densità. Lo stato tensionale, poi, essendo il provino di dimensioni limitate, si propaga in seguito all'urto e lo coinvolge in ogni sua parte, più velocemente nel caso di celle prismatiche rispetto al caso di celle piramidali, essendo le prime meno rigide e più deformabili a flessione.

5.7 Influenza dello spessore del top sheet

Il compito del top sheet è quello di distribuire la forza dell'impatto sulla maggiore quantità possibile di materiale sottostante, così da diminuire la tensione di compressione sul liner e ridurre l'entità delle forze trasmesse alla testa, nonché aumentare la quantità di energia assorbita. Anche questo componente, perciò, gioca un ruolo importante nel fenomeno dell'assorbimento energetico.

A tale scopo, è stato condotto uno studio, sempre con l'ausilio del metodo agli elementi finiti, su come la variazione di spessore della lamina di alluminio possa portare ulteriore beneficio alle performance delle strutture a lattice.

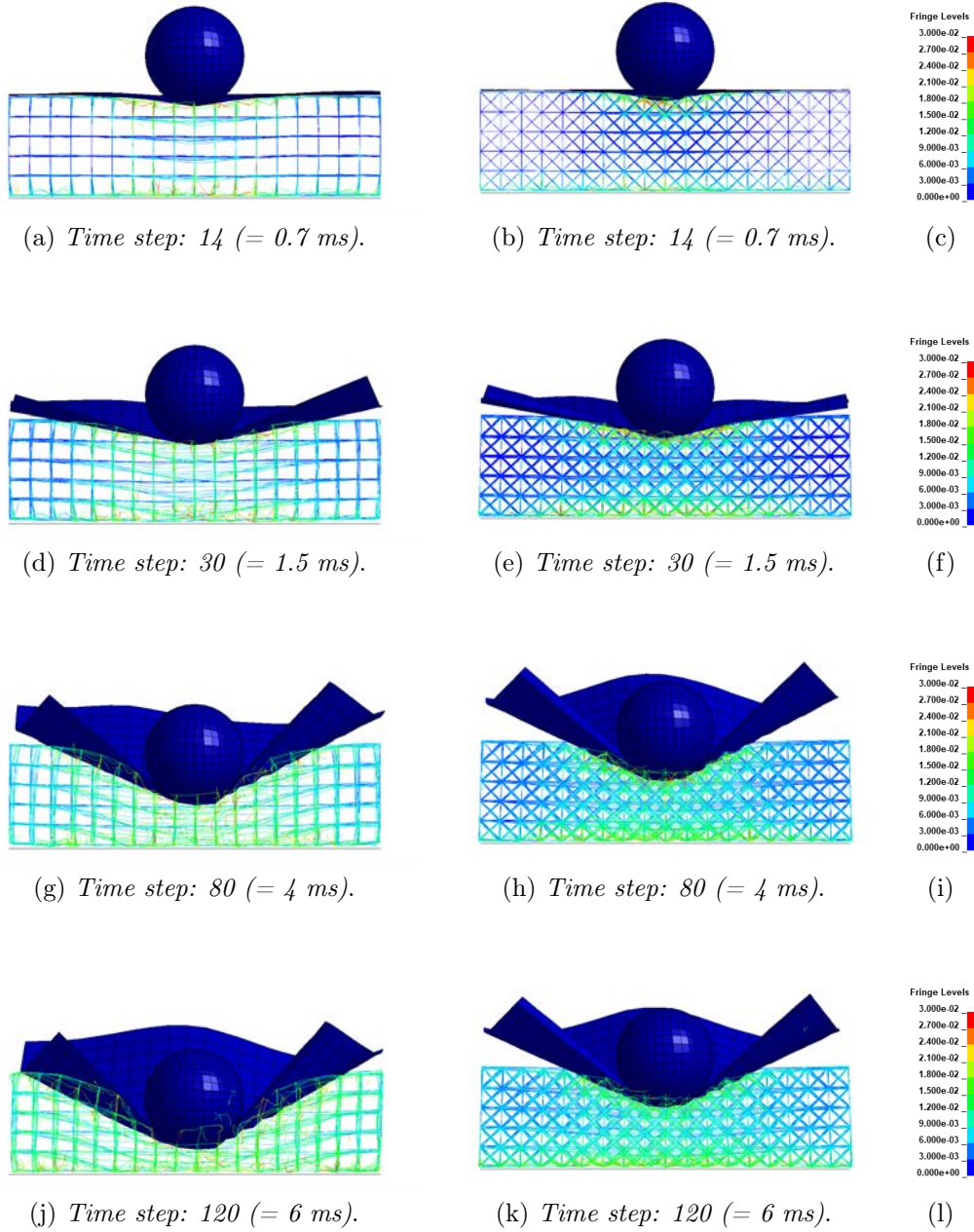


Figura 5.14: Valori della tensione di Von Mises (in GPa) durante la deformazione della struttura a liner causata dal fenomeno d'impatto per le configurazioni Cub 5 (a sinistra) e Tet 5 (a destra).

Tabella 5.6: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) ed efficienza di assorbimento energetico (in %) per configurazione Tet 5 sottoposta ad impatto centrale verticale a diverse velocità e per spessori del top sheet variabili.

Spessore [mm]	Forza y trasmessa [kN]		
	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s
0.05	0.3042	0.2805	0.1591
0.1	0.3779	0.5691	0.7567
0.2	0.4324	0.7574	1.0491
0.3	0.6623	1.0716	1.4770
0.4	0.7134	1.3107	1.8924

Spessore [mm]	Efficienza energetica [%]		
	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s
0.05	98.77	53.58	57.82
0.1	98.52	98.68	99.43
0.2	92.98	96.98	98.86
0.3	91.00	94.03	97.42
0.4	90.39	93.04	96.77

Per prima cosa è stata individuata la configurazione che meglio assolve alla funzione di assorbimento degli impatti, quella che, cioè, resiste a tutte le velocità studiate e possiede tra i più alti valori di efficienza energetica e tra i più bassi picchi di forza trasmessa; tale è risultata essere la configurazione Tet 5 che, sebbene non sia sempre la migliore se si considerano i singoli casi, è quella che mediamente dimostra le performance maggiori. E' stato, dunque, considerato un provino con struttura a lattice in configurazione Tet 5 e si è fatto variare lo spessore del top sheet facendogli assumere i valori 0.05 mm, 0.1 mm, 0.3 mm e 0.4 mm; si ricorda che il valore di 0.2 mm era stato assunto di default in tutte le casistiche studiate prima, quindi i risultati per questo spessore sono già stati ottenuti. Le velocità di impatto sono state ancora una volta 4.43, 7.5 e 12 m/s, mentre la direzione d'urto considerata è stata solo quella verticale centrale. Non sono state effettuate altre modifiche di sorta al modello analizzato.

I risultati ottenuti sono riassunti in tabella 5.6 e sono graficati in figura 5.15.

Si può subito notare che una lamina di spessore di 0.05 mm è troppo sottile e viene perforata sia per velocità dell'impattatore di 7.5 m/s sia per velocità di 12 m/s; questi due casi sono, dunque, da scartarsi per failure di uno dei componenti del provino. In tutti gli altri casi si osserva un aumento della forza trasmessa e una diminuzione dell'efficienza energetica all'aumentare dello spessore del foglio di alluminio, fenomeno dovuto alla maggiore rigidità che esso viene ad assumere, la quale causa una distribuzione del carico su

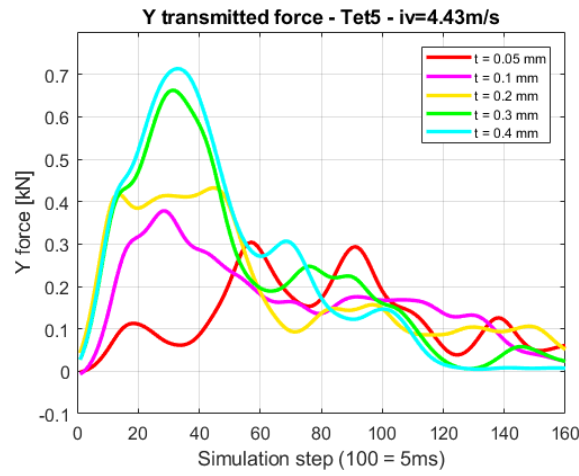
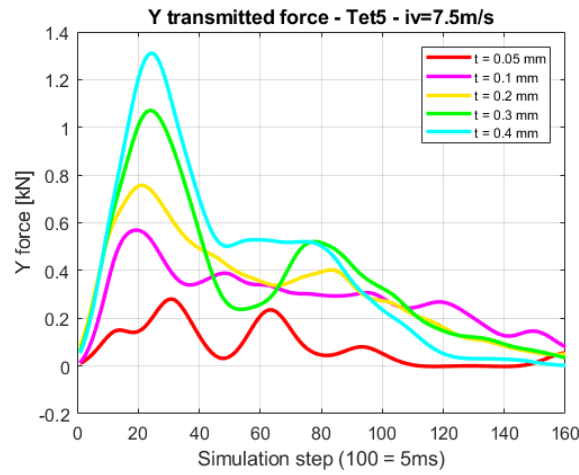
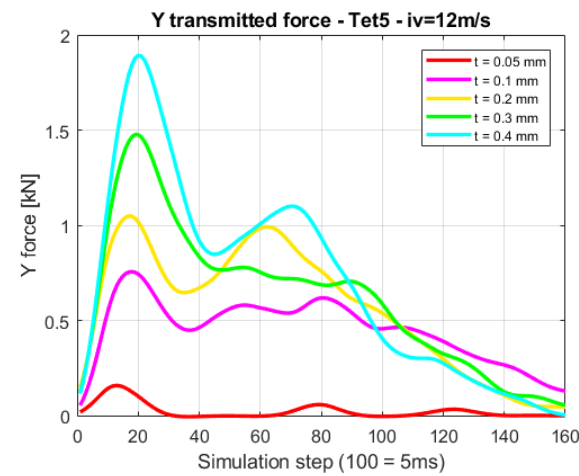
(a) $v.i. = 4.43$ m/s.(b) $v.i. = 7.5$ m/s.(c) $v.i = 12$ m/s.

Figura 5.15: Andamento della forza trasmessa al layer inferiore al variare dello spessore del top sheet per impatto verticale centrale.

un'area maggiore e quindi su un numero di elementi beam più alto, i quali sono conseguentemente soggetti ad un carico inferiore che non fa raggiungere loro la tensione di snervamento; non deformandosi plasticamente, dunque, l'energia che assorbono è solamente di natura elastica e, perciò, la rilasciano un istante dopo, causando un calo nell'efficienza e un aumento dell'entità di forza trasmessa al layer inferiore. La figura 5.16 mostra lo stato tensionale del top sheet in tre istanti temporali successivi: un istante dopo che l'impattatore ha toccato la lamina (0.5 ms), circa al momento di massima penetrazione e conseguente picco di forza (1.0 ms), e all'istante in cui la sfera sta acquistando velocità di rimbalzo (2.0 ms).

Un lieve aumento nelle prestazioni si ottiene riducendo lo spessore del top sheet da 0.2 a 0.1 mm, così che la sua deformazione successiva all'impatto sia più pronunciata, assorbendo una ulteriore quota di energia, con un miglioramento dallo 0.5 al 5% in termini di efficienza di assorbimento energetico, e dal 12 al 28% per quanto riguarda l'entità di forza trasmessa; valori percentuali ancora migliori si ottengono facendo il confronto con un EPS di densità equivalente.

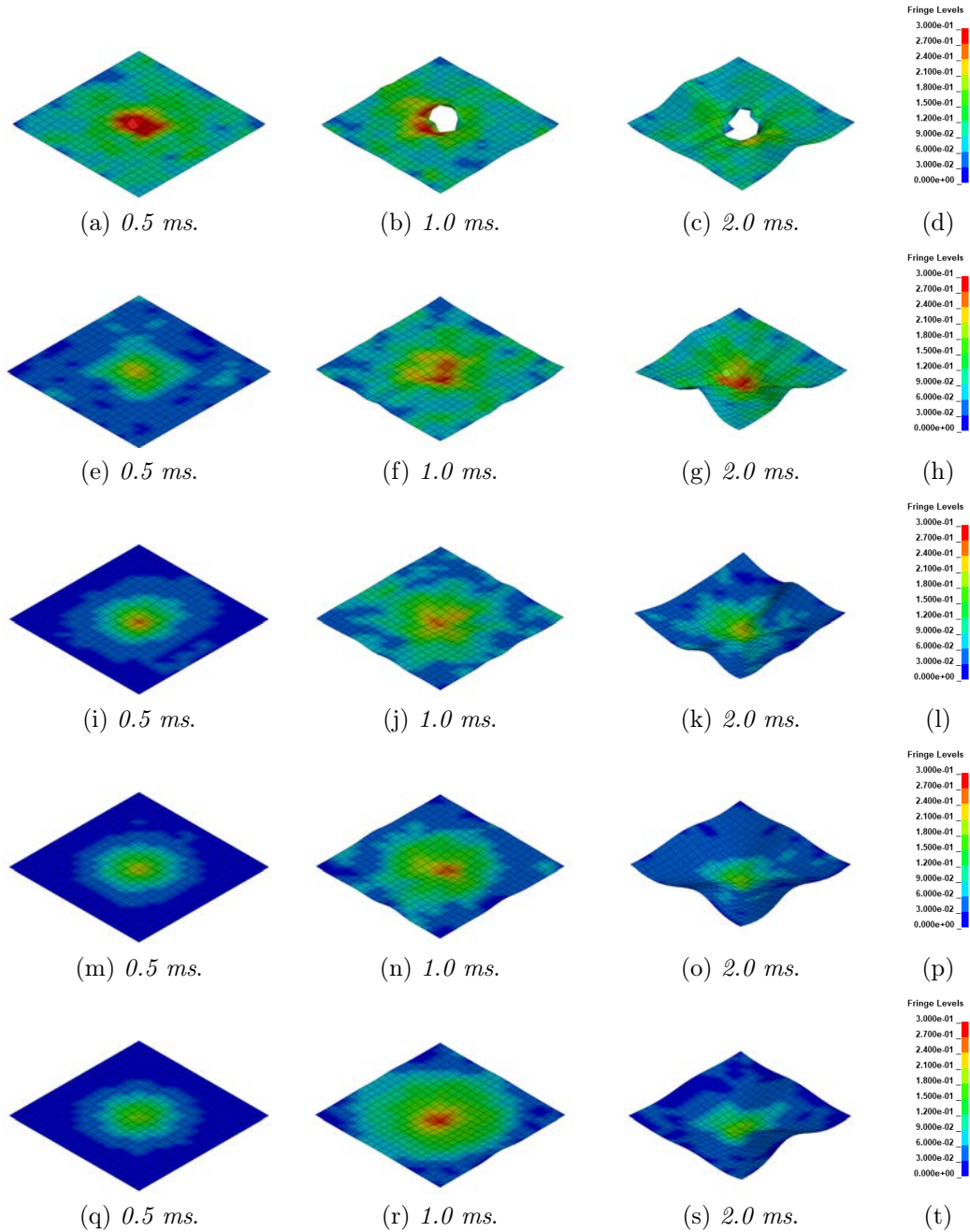


Figura 5.16: Stato tensionale di Von Mises (valori in GPa) del top sheet al variare del suo spessore per impatto verticale centrale a 7.5 m/s. Fig. a-d: spessore 0.05 mm; Fig. e-h: 0.1 mm; Fig. i-l: 0.2 mm; Fig. m-p: 0.3 mm; Fig. q-t: 0.4

Capitolo 6

Impatto obliquo

In molti incidenti motociclistici l'impatto che si verifica presenta anche una componente di velocità tangenziale alla calotta esterna del casco dovuta alla velocità residua del motociclista al momento dell'urto; tale componente genera una forza sulla testa, e, di conseguenza, un momento sul collo. Ecco che, allora, si rende giustificata la scelta di studiare, in questa sede, anche il comportamento del provino multistrato quando sottoposto ad impatti obliqui; nello specifico, sono stati analizzati comportamenti del provino quando l'impattatore lo colpisce centralmente alle stesse velocità considerate precedentemente (4.43, 7.5, e 12 m/s), ma nel caso in cui la direzione d'urto sia inclinata di 45° rispetto alla verticale alla superficie. Anche qui, poi, i valori ottenuti da simulazioni numeriche agli elementi finiti sono stati confrontati con quelli scaturiti dall'analisi di un provino con liner in EPS di densità equivalente a quella delle varie strutture a lattice considerate. Anche in questo caso si sono analizzati efficienza dell'assorbimento energetico, profondità di penetrazione nel provino, e valore massimo della forza trasmessa (di quest'ultima si sono riportati i valori sia ortogonalmente al provino, sia tangenzialmente al provino, per i motivi di cui sopra).

6.1 Modello FE

Il provino multistrato non è stato soggetto a cambiamenti di alcuna sorta. L'unica modifica apportata ha riguardato la direzione di impatto, la quale è stata impostata ricorrendo al teorema di Pitagora per fare in modo che la risultante delle componenti verticale e orizzontale della velocità risultasse ancora una volta 4.43 m/s, 7.5 m/s, e 12 m/s. Per garantire una maggiore aderenza tra la sfera e la lamina di alluminio superiore, un fattore d'attrito è stato implementato; dalla letteratura [54] ed essendo i materiali dei due

oggetti rispettivamente acciaio e alluminio, il valore del coefficiente d'attrito è stato assunto pari a 0.3, sia per quello statico sia per quello dinamico. In termini pratici per fare questo, si è scelta dalla libreria LS-Dyna la card `CONTACT → AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` e si è impostata come appena descritto, con il top sheet come corpo *slave*, e la sfera come corpo *master*. Le condizioni al contorno sono state mantenute inalterate.

6.2 Analisi risultati

Chiaramente le profondità di penetrazione raggiunte dall'impattatore sono minori rispetto ai casi precedenti, dato che in direzione obliqua la quantità di materiale del liner che la sfera incontra è maggiore, e la componente verticale di velocità è divisa per la radice di due essendo l'angolo d'urto pari a 45° .

Qui, ancora più di prima, la collisione della sfera sul provino multistrato provoca il *failure* di molti elementi costituenti le celle della struttura a lattice, rompendo anche i vincoli di incollaggio che tengono fissi il liner e la lamina superiore; come risultato entrambi questi layer, in seguito all'impatto e soprattutto nelle configurazioni a minore densità, cominciano a muoversi nella stessa direzione della componente orizzontale della velocità di impatto, acquistando,

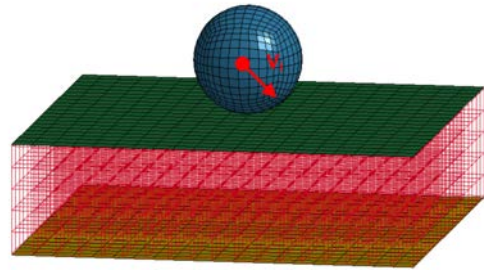


Figura 6.1: Modello del provino soggetto ad impatto centrale obliquo.

perciò, energia cinetica che anche qui viene trascurata nel bilancio energetico, essendo di entità molto inferiore rispetto a quella dell'impattatore. Questa scelta limita in un certo senso la bontà dei risultati ottenuti, dato che una quota di energia derivante dalla collisione non viene direttamente assorbita dalla struttura a lattice ma viene trasformata in energia cinetica del liner e del layer superiore; questa quota, per ottenere un risultato preciso, dovrebbe essere sottratta dalla differenza tra l'energia cinetica iniziale e finale dell'impattatore, cosa che qui non viene eseguita a causa dell'errore numerico che falsifica la misura dell'energia cinetica dei due componenti in movimento. Le efficienze energetiche risultanti, perciò, sono più elevate di qualche punto percentuale di quello che effettivamente sarebbero. Tuttavia, in un casco motociclistico reale, l'insieme è molto meno soggetto a questo movimento relativo tra le parti, perciò si ritiene che in una situazione reale anche la forza trasmessa sarà leggermente maggiore rispetto ai valori di segui-

to presentati per le configurazioni a bassa densità (nelle quali l'impattatore penetra maggiormente nel liner, rimanendo incastrato al suo interno). Per i casi a maggiore densità, invece, i valori presentati possono ritenersi affidabili in quanto la profondità di penetrazione è talmente bassa da non provocare una rottura degli incollaggi al layer inferiore e, quindi, da non causare movimento del liner o del top sheet.

6.3 Energia assorbita

Anche se l'impattatore incontra una maggiore quantità di materiale, la componente orizzontale della velocità è tutt'altro che trascurabile e tende a far rimbalzare via la sfera; dunque, per questo e per i motivi sopra accennati, nel caso di impatto obliquo l'efficienza energetica cala notevolmente in tutti i modelli studiati; se per impatto verticale un valore medio di efficienza di assorbimento energetico era 95%, ora si scende al 40-80%, con i valori più bassi che si registrano per velocità della sfera minori, casi in cui l'impattatore penetra poco nella struttura a lattice, coinvolgendo, così, nel fenomeno dissipativo una minore quantità di materiale; si osserva, infatti, un aumento del valore di η all'aumentare della velocità di impatto, con i valori mediamente maggiori per la configurazione Tet 5. Per il provino fatto in EPS, colpito da impattatore lanciato a 7.5 m/s, le differenze in termini di assorbimento energetico variano tra il 6 e il 40%, dove quest'ultimo valore si riscontra nuovamente per il caso Cub 20, mentre, in generale, il polistirene si dimostra essere più efficiente rispetto alle configurazioni Cub e meno efficiente rispetto a quelle Tet 3, 4, e 5, ancora a causa degli elementi diagonali presenti nelle celle di questa tipologia che offrono un maggior numero di componenti deformabili plasticamente.

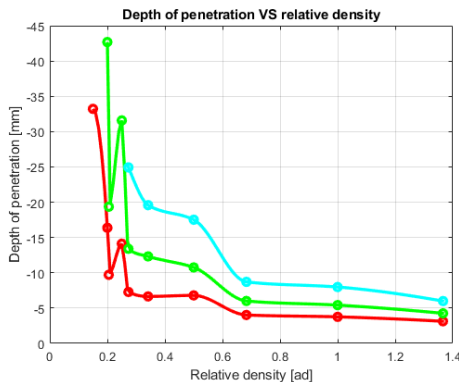
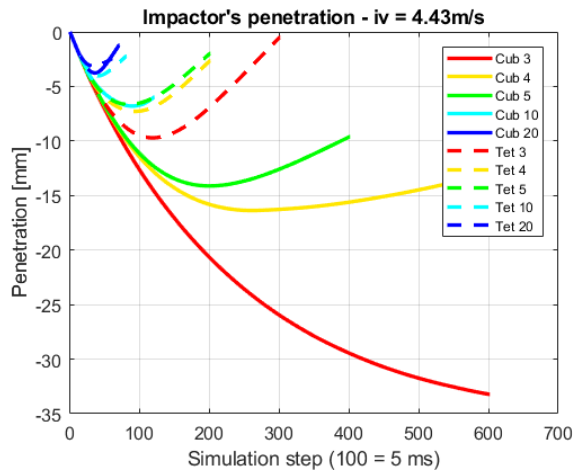
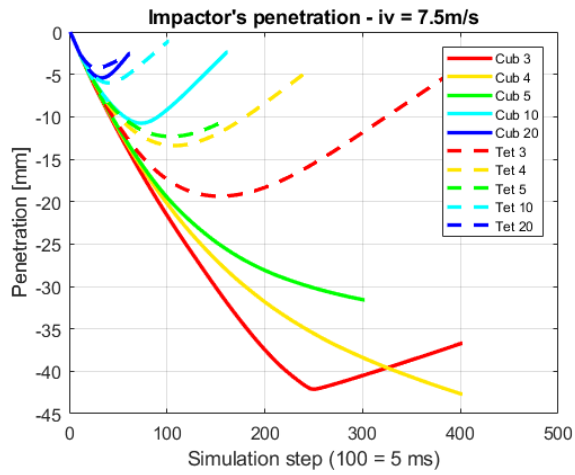


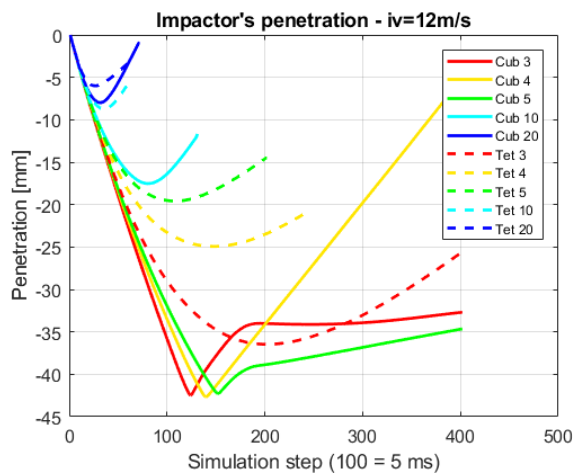
Figura 6.2: Andamento della profondità di penetrazione del liner rispetto alla densità relativa dello stesso. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.



(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s.



(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s.



(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s.

Figura 6.3: Profondità di penetrazione dell'impatatore nel provino per differenti velocità iniziali, nel caso di impatto centrale obliquo.

Tabella 6.1: Profondità raggiunta dall'impattatore (in mm) nei casi considerati per impatto centrale obliquo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s
Cub 3	33.22	fail	fail
Cub 4	16.37	fail	fail
Cub 5	14.12	31.58	fail
Cub 10	6.79	10.76	17.52
Cub 20	3.76	5.42	7.98
Tet 3	9.71	19.37	36.47
Tet 4	7.28	13.40	24.93
Tet 5	6.65	12.32	19.58
Tet 10	4.02	6.01	8.71
Tet 20	3.13	4.26	5.99

Tabella 6.2: Efficienza (in %) di assorbimento energetico nei casi considerati per impatto centrale obliquo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	avg	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	58.31	/	/	/	/
Cub 4	60.97	/	/	/	/
Cub 5	60.28	60.46	/	/	66.99 (+10.81%)
Cub 10	58.80	61.47	72.12	64.13	65.42 (+6.43%)
Cub 20	40.19	49.69	56.82	48.89	70.96 (+42.82%)
Tet 3	68.47	79.73	79.39	/	66.56 (-16.51%)
Tet 4	65.92	75.69	80.11	/	64.79 (-14.39%)
Tet 5	64.87	71.06	73.46	69.80	65.44 (-7.92%)
Tet 10	53.08	56.79	60.55	56.81	64.60 (+13.76%)
Tet 20	56.73	59.86	62.23	59.60	71.95 (+20.21%)

6.4 Forze trasmesse

Essendo la direzione dell'impatto inclinata di 45° , la forza che si sviluppa sul layer inferiore può essere scomposta in una componente ortogonale (direzione y) e in una orizzontale (direzione x). In generale i valori delle componenti verticali aumentano all'aumentare della velocità e della densità della struttura a lattice che, quindi, si irrigidisce, mentre le componenti x diminuiscono passando dalle configurazioni a minore densità a quelle a maggiore densità dato che, essendo più rigide ed essendo presente più materiale, riescono ad assorbire maggiormente la forza che le colpisce; in ogni caso, comunque, il loro valore non supera i 30 N. In direzione y i valori risultanti sono sempre inferiori al caso di urto verticale centrale.

Anche in questo caso è stato effettuato un confronto con un liner fabbrica-

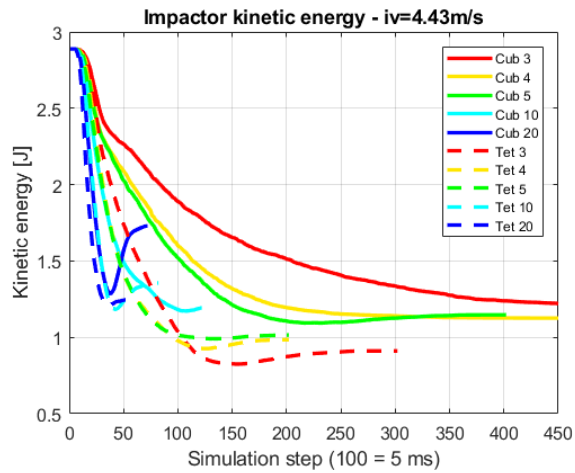
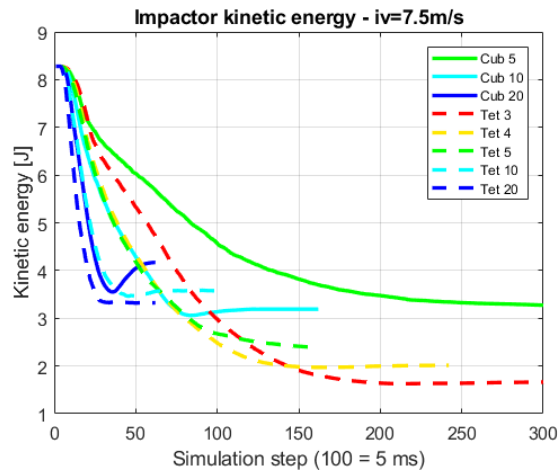
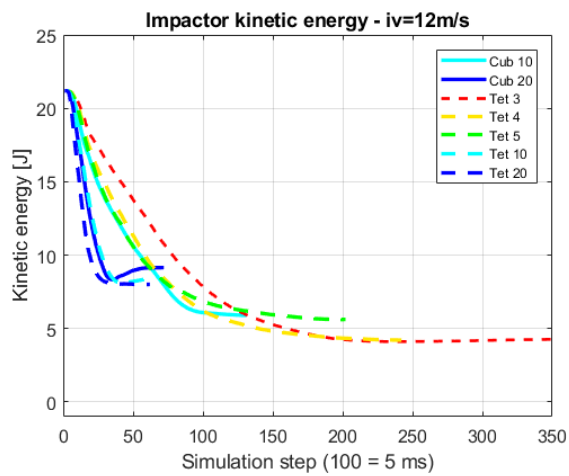
(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s .(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s .(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s .

Figura 6.4: Andamento dell'energia cinetica dell'impatatore nel caso di impatto centrale obliquo.

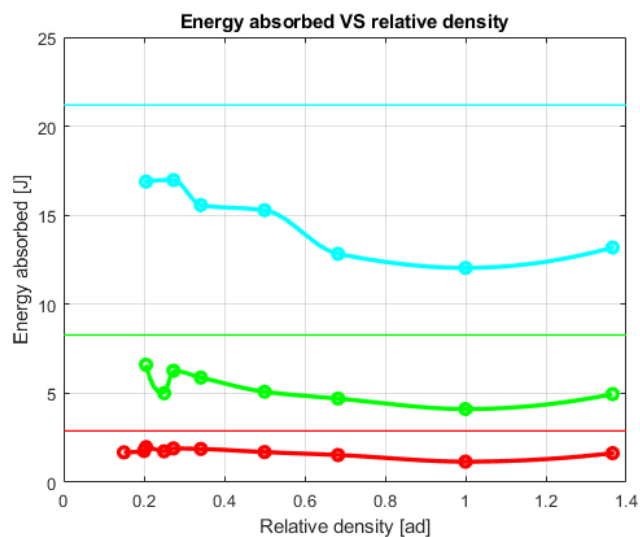


Figura 6.5: Efficienza di assorbimento energetico del liner in funzione della sua densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s; le linee orizzontali indicano l'energia iniziale dell'impattatore, ovvero la quantità massima di energia che può essere assorbita.

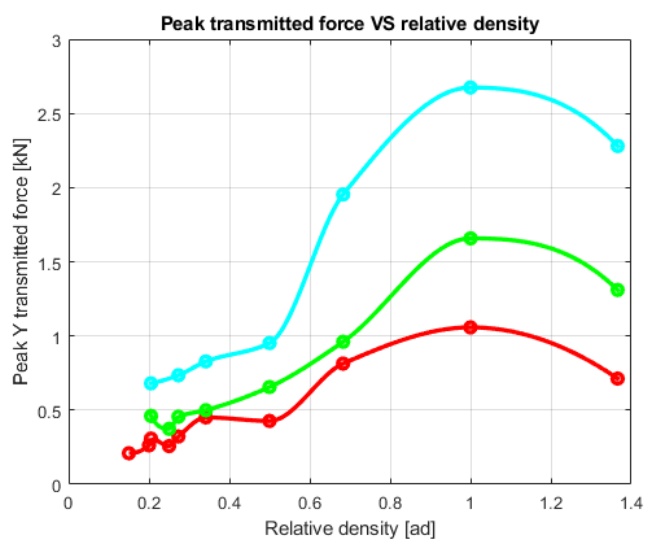


Figura 6.6: Forza trasmessa in funzione della densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.

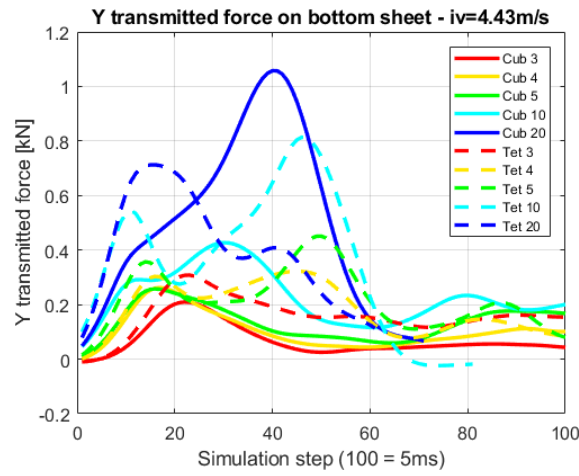
Tabella 6.3: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse x nei casi considerati per impatto centrale obliquo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	0.0335	/	/	/
Cub 4	0.0214	/	/	/
Cub 5	0.0015	0.0071	/	0.2801
Cub 10	2.07e-4	3.43e-4	0.0013	0.5556
Cub 20	3.36e-6	1.49e-7	0.0027	0.6727
Tet 3	0.0014	0.0223	0.0119	0.3240
Tet 4	6.53e-4	0.0037	0.0234	0.4680
Tet 5	8.16e-4	9.38e-4	0.0045	0.5167
Tet 10	4.64e-4	0.0013	8.91e-5	0.7605
Tet 20	1.08e-5	1.57e-4	1.94e-4	0.9037

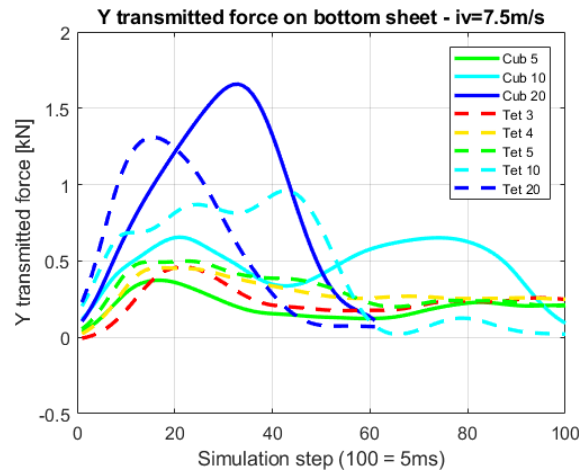
Tabella 6.4: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse y nei casi considerati per impatto centrale obliquo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	0.2094	/	/	/
Cub 4	0.2623	/	/	/
Cub 5	0.2576	0.3737	/	1.0618 (+184.13%)
Cub 10	0.4272	0.6559	0.9520	1.9871 (+202.96%)
Cub 20	1.0577	1.6578	2.6743	3.2015 (+93.12%)
Tet 3	0.3082	0.4607	0.6803	1.1701 (+153.98%)
Tet 4	0.3222	0.4554	0.7350	1.5922 (+249.63%)
Tet 5	0.4510	0.4992	0.8283	1.8009 (+260.76%)
Tet 10	0.8138	0.9606	1.9539	3.0693 (+219.52%)
Tet 20	0.7126	1.3100	2.2801	3.5735 (+172.79%)

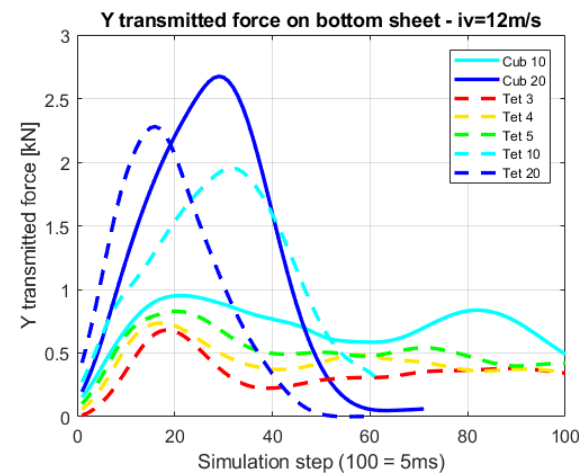
to in EPS di densità equivalente. Come si può vedere dalla tabella 6.4 e dalla figura 6.8 le forze trasmesse sono ben superiori rispetto all'impiego di una struttura a lattice, soprattutto per quanto riguarda le componenti x ; questo è da attribuirsi alla capacità flessionale degli elementi verticali delle celle della struttura a lattice, che sono in grado di flettersi assorbendo l'impatto e riducendo così il carico sul layer inferiore, cosa che, invece, il polistirene non è in grado di fare essendo un materiale solido. Questa differenza si nota palesemente soprattutto per le densità maggiori, dove l'EPS trasmette centinaia di Newton contro i decimi o addirittura centesimi di Newton delle strutture a lattice.



(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s.



(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s.



(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s.

Figura 6.7: Forza trasmessa al layer inferiore per impatto centrale obliquo.

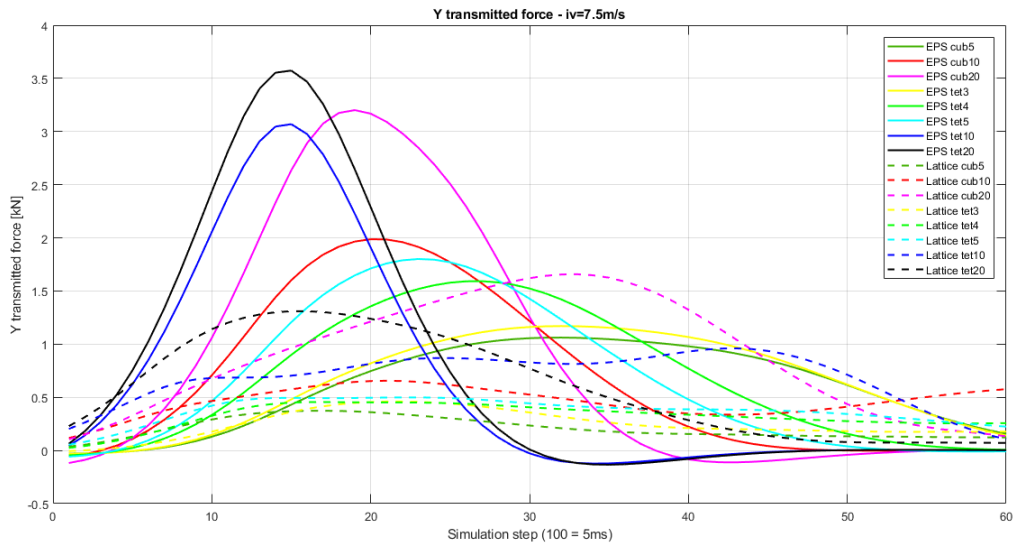
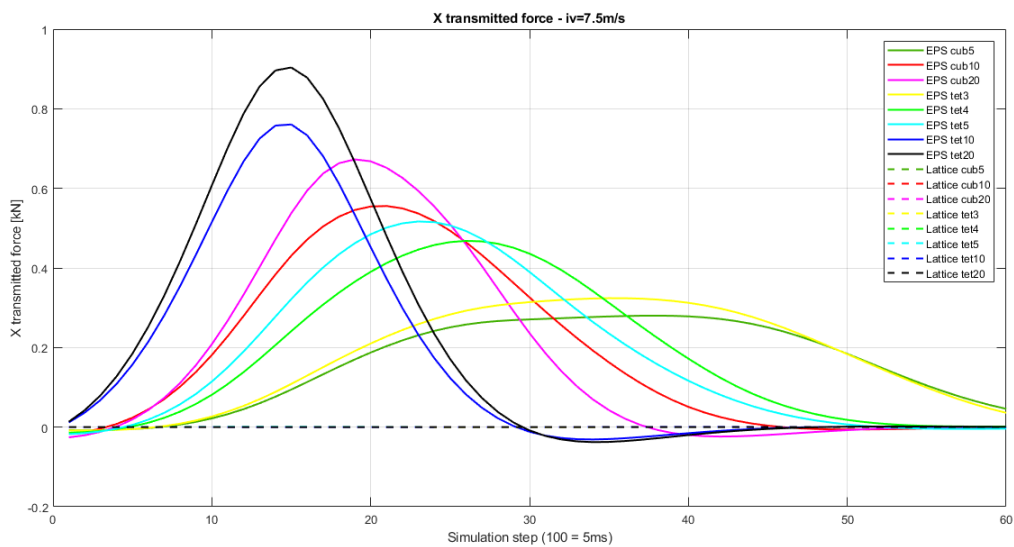
(a) Componenti in y delle forze.(b) Componenti in x delle forze; si nota come in questo caso la differenza di valori nel caso dei due materiali sia abissale.

Figura 6.8: Comparazione tra gli andamenti nel tempo della forza trasmessa da un liner in EPS (linee continue) e uno in struttura a lattice (linee tratteggiate), per impatto centrale obliquo a 7.5 m/s.

Capitolo 7

Impatto sul bordo

Tutti i casi sottoposti ad impatto verticale sono stati indagati anche nel caso in cui l'impattatore collida col provino multistrato in prossimità di uno dei suoi bordi, a simulare un urto che avvenga in prossimità della periferia di un casco motociclistico, in una zona, cioè, dove una ridotta quantità di liner interviene nel fenomeno di assorbimento dell'energia. Impattando sul bordo, infatti, la sfera schiaccia la lamina superiore di alluminio sul liner analogamente ai casi studiati prima, ma questa volta una porzione più piccola di *top sheet* interviene a distribuire l'energia dell'impatto, e quindi una minore quantità di struttura a lattice la assorbe. Il contributo di entrambi questi importanti componenti a ridurre le conseguenze del fenomeno d'impatto è, dunque, diminuito, e tale effetto è ben visibile nei risultati delle analisi agli elementi finiti effettuate, le quali mostrano, in generale, una riduzione della quantità di energia assorbita e un aumento del picco di forza trasmessa, come può essere visto più nel dettaglio nelle sezioni che seguono.

7.1 Modello FE

Anche per questo scenario, non sono state apportate modifiche nè al provino nè alle condizioni al contorno; l'unico cambiamento riguarda il punto di impatto, spostato verso l'estremità della lamina di alluminio, e la direzione d'impatto, di nuovo verticale. Ora la sfera è stata traslata verso il bordo, ortogonalmente allo stesso, di una quantità pari a 55 mm, in modo che la sua proiezione in pianta sia completamente contenuta sulla superficie del provino multistrato. Come prima, un fattore d'attrito pari a 0.3 è stato tenuto in considerazione tra impattatore e top sheet, implementandolo nel modello in modo analogo a come descritto nel capitolo precedente.

7.2 Analisi risultati

Le quantità su cui si è andati ad indagare sono le medesime dello scenario con impatto centrale obliquo, quindi profondità di penetrazione nel liner, efficienza di assorbimento energetico, e entità delle forze trasmesse, sia lungo x sia lungo y . Si può subito osservare che in tutti i casi analizzati la profondità di penetrazione è maggiore rispetto al caso di impatto verticale centrale, risultato atteso proprio per il fatto che la quantità di materiale (sia del layer superiore, sia del liner) coinvolto nel fenomeno dissipativo è inferiore. La differenza nei valori è, tuttavia, notevole nelle configurazioni con liner di minore densità, mentre è inferiore al millimetro in quelle a maggiore densità, in analogia con quanto osservato nel caso di impatto obliquo.

In questi casi non è stata misurata solo la componente verticale (lungo l'asse y) della velocità dell'impattatore, bensì anche quella lungo x , dato che qui il rimbalzo non è più solamente nella direzione opposta a quella dell'urto ma è presente anche una componente orizzontale, con orientazione che va dal centro del provino verso il bordo su cui impatta la sfera. Di conseguenza, per reazione si instaurerà anche una componente di forza orizzontale che tende a spingere il provino in direzione opposta alla componente x della velocità di rimbalzo; l'entità di questa forza, come si può vedere dalla tabella 7.4, varia da poche decine di Newton, per le configurazioni a più bassa densità del liner, ad alcuni decimi di Newton per quelle più dense e rigide. La causa di questo comportamento è da attribuirsi alla disuniformità di distribuzione del materiale sotto la zona d'impatto, ma non solo; ad elevate velocità d'urto, gli elementi incollati del liner con la lamina superiore ed inferiore, cedono al carico a cui sono sottoposti, rompendosi e permettendo alla struttura a lattice di scorrere in direzione opposta al lato soggetto all'impatto (verso sinistra se l'impatto avviene sul lato destro, come nei casi considerati). In tal caso, il liner acquista energia cinetica che, però, è comunque trascurabile rispetto alla quota assorbita per deformazione dallo stesso, e, come per l'impatto obliquo, non viene tenuta in considerazione nel bilancio delle energie. L'efficienza energetica sarà, dunque, più bassa rispetto ai valori presentati qui, ma l'errore è molto inferiore rispetto al caso di impatto obliquo perché minore è la velocità che guadagna il liner in seguito all'urto.

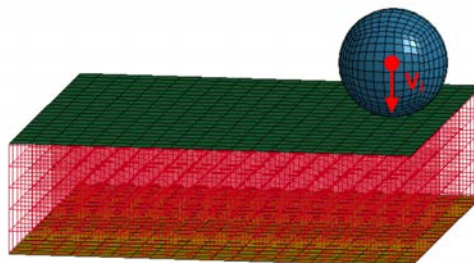
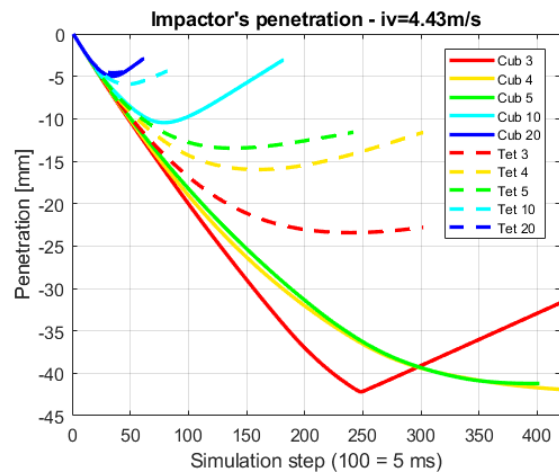
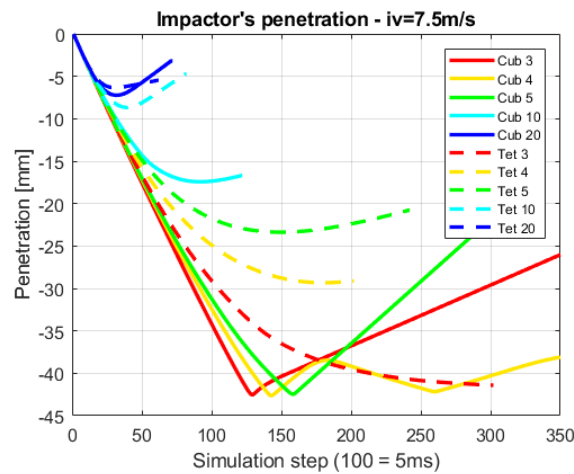


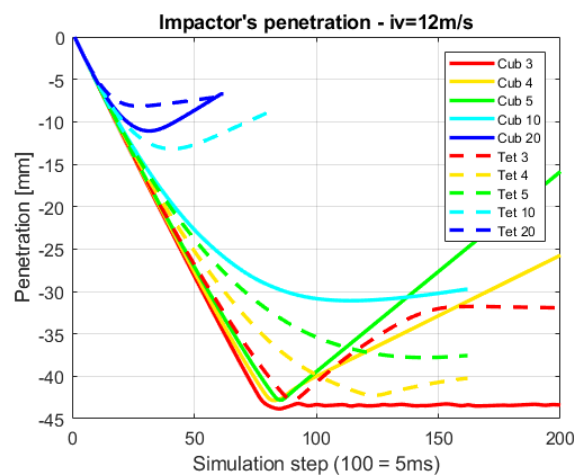
Figura 7.1: Modello del provino soggetto ad impatto verticale sul bordo.



(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s.



(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s.



(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s.

Figura 7.2: Profondità di penetrazione dell'impatto nel provino per differenti velocità iniziali, per impatto verticale sul bordo.

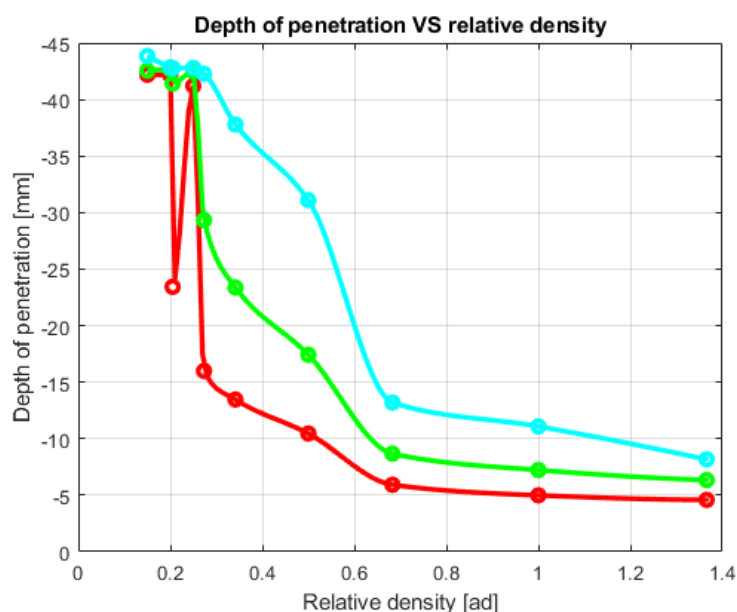


Figura 7.3: Andamento della profondità di penetrazione del liner rispetto alla densità relativa dello stesso. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.

Proprio per la minore resistenza del provino all'impatto sul bordo, si ottiene un numero maggiore di casi che non riescono ad impedire il completo sfondamento del liner (tabella 7.1); ora le configurazioni Cub 3, 4 e 5 cedono completamente a tutte le velocità analizzate, la configurazione Tet 3 resiste solo se l'impattatore ha velocità di 4.43 m/s, e il caso Tet 4 non è adatto ad un urto a 12 m/s. In generale, poi, le profondità raggiunte dalla sfera nel liner sono maggiori sia del caso per impatto verticale centrale, sia di quello per impatto obliquo.

7.3 Energia assorbita

L'efficienza energetica si attesta in tutti i casi considerati tra l'80% e il 99%, con i valori più scarsi ancora una volta individuabili per la configurazione Cub 20, sebbene in questo caso ci sia un miglioramento di qualche punto percentuale rispetto allo scenario di impatto verticale centrale. Facendo una media tra i valori di η per le varie velocità d'urto considerate, si nota che i casi migliori sono quelli delle configurazioni Tet 5 e Tet 20, come lo erano per l'impatto verticale centrale. Facendo un confronto con un provino in EPS di massa equivalente si vede che questo è, in media, il 5% più efficiente

nell'assorbimento di energia rispetto alle strutture a lattice, fatto salvo per il caso Tet 20 in cui, invece, il polistirene espanso è circa il 16% meno efficiente. Questo lieve miglioramento, però, si verifica a scapito dell'intervallo temporale in cui il fenomeno d'urto avviene, che nel caso dell'EPS è molto più breve; ciò si traduce in accelerazioni (e quindi forze trasmesse) più elevate rispetto ai provini con strutture a lattice.

7.4 Forze trasmesse

I valori dei picchi di forza verticale trasmessa sono poco più alti di quelli dell'impatto obliquo, mentre sono inferiori rispetto a quelli che si verificano nell'impatto verticale centrale, con una differenza tanto maggiore quanto maggiore è la velocità di impatto. Inoltre, si dimostrano essere leggermente inferiori nei casi con celle prismatiche, e leggermente superiori nelle configurazioni con celle piramidali, a prova ulteriore della maggiore rigidità di queste ultime, in cui gli elementi diagonali provvedono a rendere la struttura meno deformabile. Come accennato prima, il confronto con un provino in EPS non lascia dubbi sul migliore comportamento delle strutture a lattice; queste fanno registrare valori di forza trasmessa dal 54% al 294% in meno rispetto al polistirene, dimostrando ancora una volta la loro migliore attitudine all'impiego nel campo della protezione dagli impatti rispetto ai materiali tradizionali. La maggiore differenza di valori si ottiene per le celle Tet, probabilmente perchè maggiore è la densità equivalente dell'EPS che, perciò, risponde sempre di più all'impatto come un materiale rigido.

Come per l'impatto obliquo, anche l'impatto verticale sul bordo fa registrare componenti di forza lungo la direzione x molto esigue, da poche decine di Newton nelle configurazioni a lattice a minore densità, ad alcuni decimi di Newton in quelle a maggiore densità. Sebbene anche in questo caso nei provini in EPS le componenti orizzontali della forza conseguenti all'impatto siano dell'ordine delle decine o centinaia di Newton, ovvero circa due ordini di grandezza più alte di quelle delle strutture a lattice, restano sempre molto meno intense di quelle sviluppatesi in seguito ad impatto obliquo.

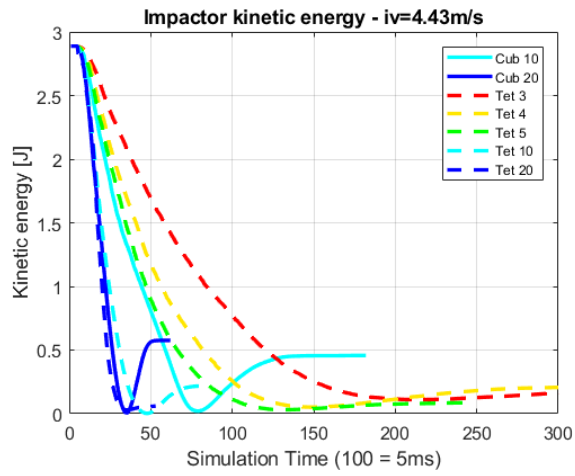
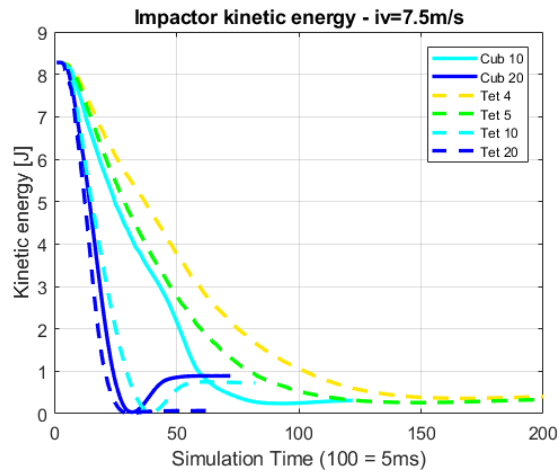
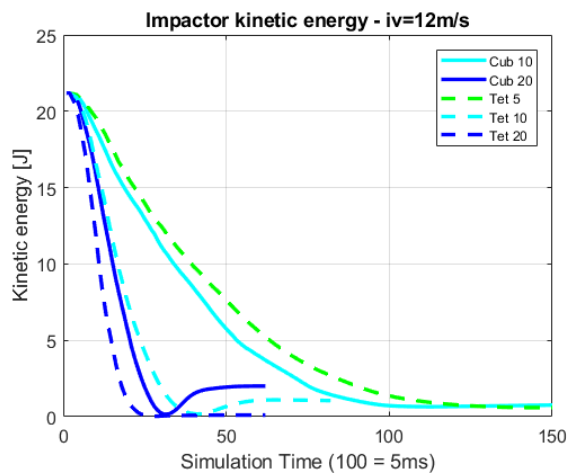
(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s .(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s .(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s .

Figura 7.4: Andamento dell'energia cinetica dell'impatatore nel caso di impatto verticale sul bordo.

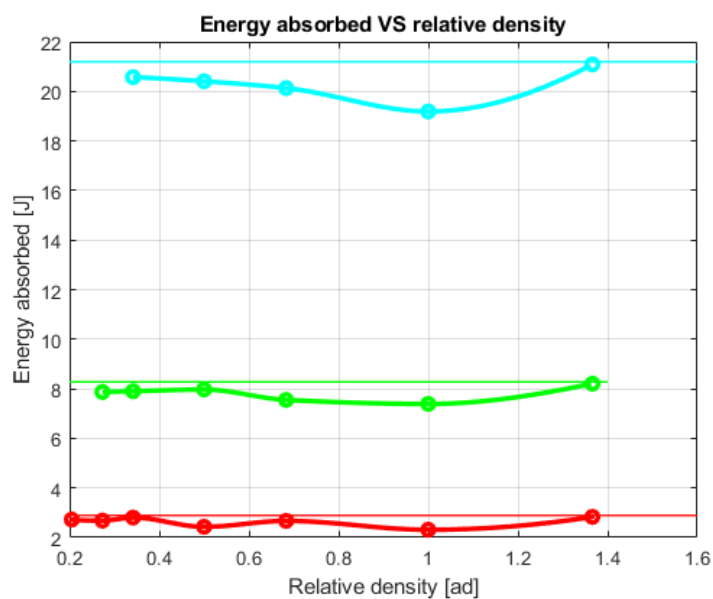


Figura 7.5: Efficienza di assorbimento energetico del liner in funzione della sua densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.

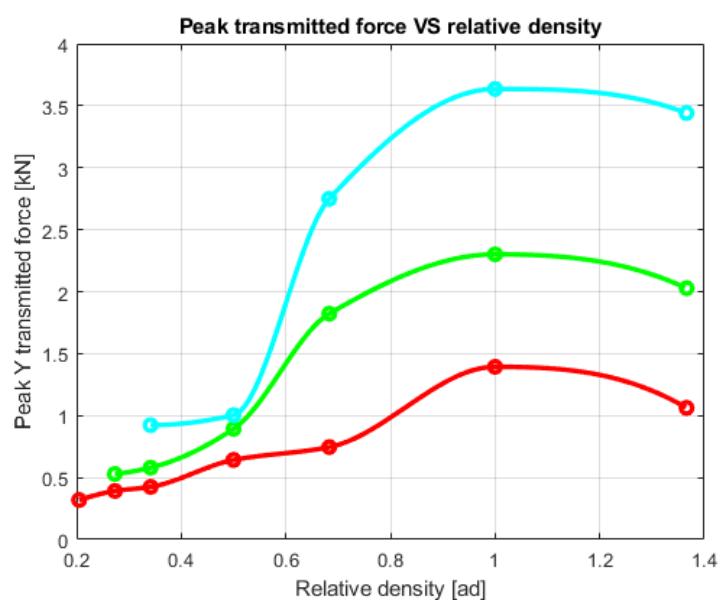
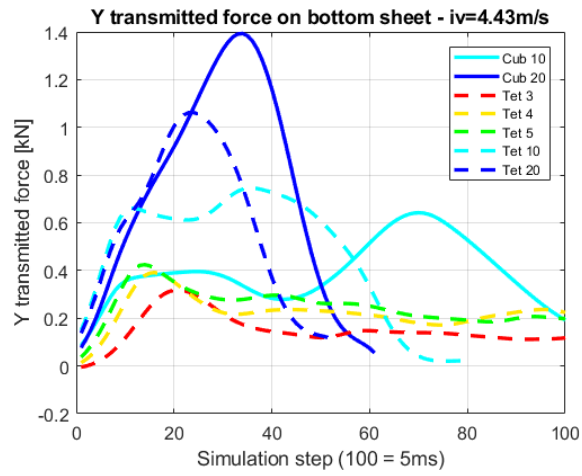
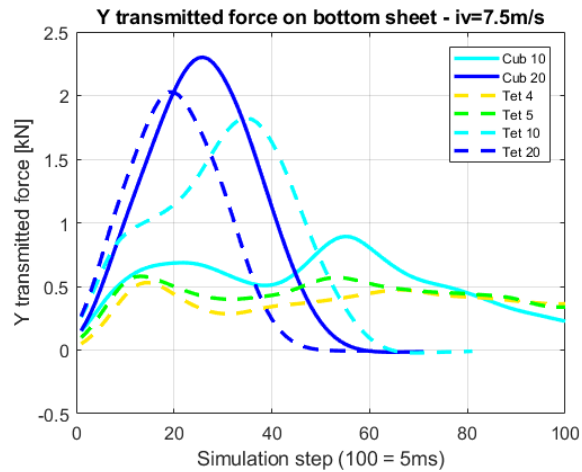


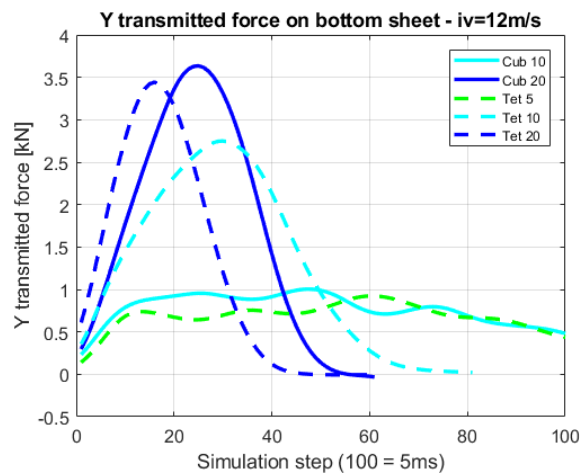
Figura 7.6: Forza trasmessa in funzione della densità relativa. La curva azzurra è riferita a velocità di impatto di 12m/s, quella verde a 7.5m/s, quella rossa a 4.43m/s.



(a) Caso per velocità iniziale di 4.43m/s.

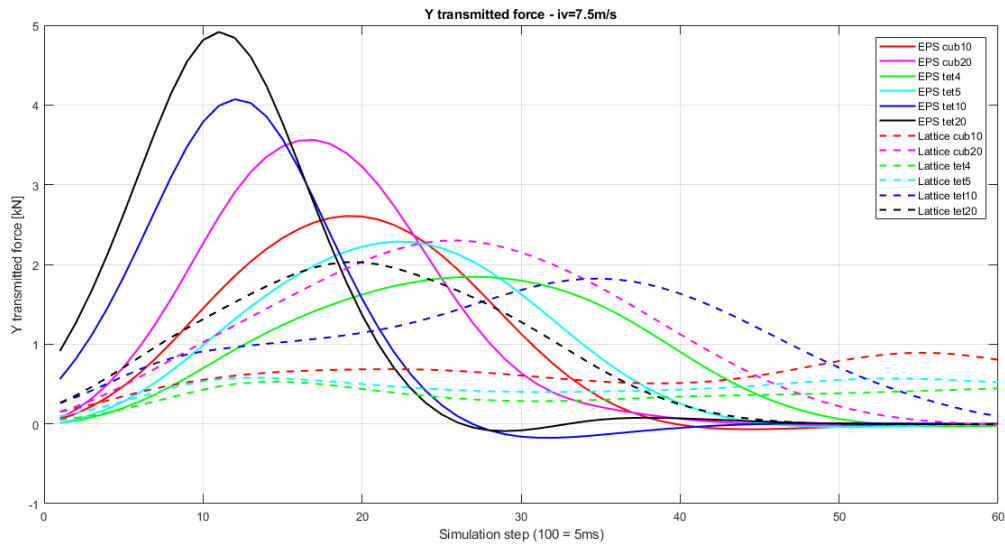


(b) Caso per velocità iniziale di 7.5m/s.

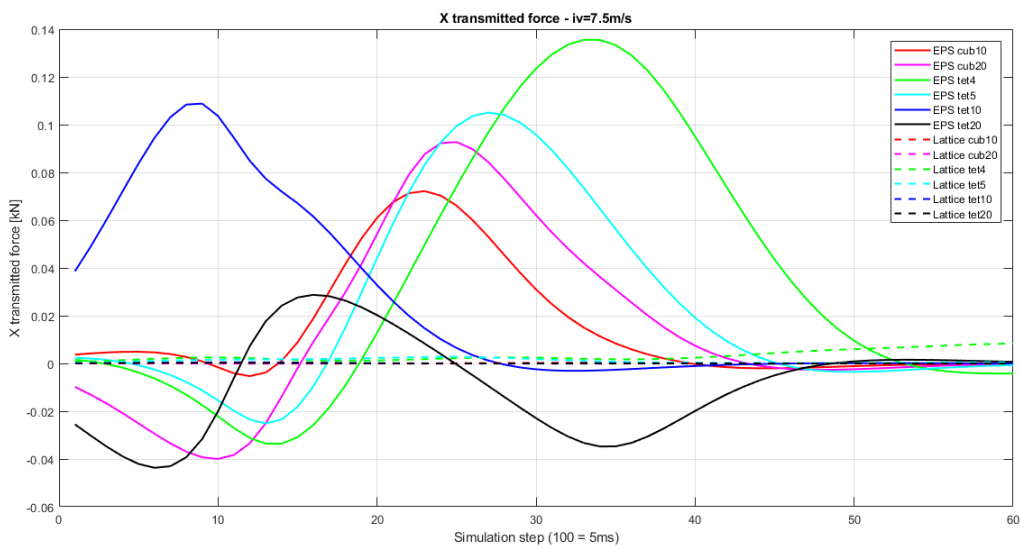


(c) Caso per velocità iniziale di 12m/s.

Figura 7.7: Forza trasmessa al layer inferiore nel caso di impatto verticale sul bordo.



(a) Componenti lungo y delle forze.



(b) Componenti lungo x delle forze; si nota come in questo caso la differenza di valori nel caso dei due materiali sia abissale.

Figura 7.8: Comparazione tra gli andamenti nel tempo della forza trasmessa da un liner in EPS (linee continue) e in struttura a lattice (linee tratteggiate), per impatto verticale sul bordo a 7.5 m/s..

Tabella 7.1: Profondità raggiunta dall'impattatore (in mm) nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s
Cub 3	fail	fail	fail
Cub 4	fail	fail	fail
Cub 5	fail	fail	fail
Cub 10	10.46	17.42	31.09
Cub 20	4.99	7.23	11.09
Tet 3	23.43	fail	fail
Tet 4	15.99	29.33	fail
Tet 5	13.46	23.37	37.79
Tet 10	5.93	8.68	13.19
Tet 20	4.59	6.35	8.17

Tabella 7.2: Efficienza (in %) di assorbimento energetico nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	avg	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	/	/	/	/	/
Cub 4	/	/	/	/	/
Cub 5	/	/	/	/	/
Cub 10	84.17	96.28	96.29	92.25	97.80 (+1.59%)
Cub 20	80.08	89.24	90.54	86.62	93.96 (+5.29%)
Tet 3	93.36	/	/	/	/
Tet 4	92.85	95.10	/	/	97.89 (+2.94%)
Tet 5	97.04	95.45	97.08	96.53	98.29 (+2.97%)
Tet 10	92.46	91.22	94.99	92.89	95.79 (+5.02%)
Tet 20	98.03	99.14	99.49	98.89	83.25 (-16.02%)

Tabella 7.3: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse x nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	/	/	/	/
Cub 4	/	/	/	/
Cub 5	/	/	/	/
Cub 10	2.71e-4	2.72e-4	4.71e-4	0.0722
Cub 20	7.28e-6	9.84e-7	7.15e-6	0.0927
Tet 3	0.0528	/	/	/
Tet 4	0.0190	0.0245	/	0.1355
Tet 5	0.0023	0.0028	0.0087	0.1051
Tet 10	2.43e-4	4.63e-4	0.0024	0.1088
Tet 20	1.19e-5	2.89e-4	5.36e-4	0.0437

Tabella 7.4: Valori massimi di forza trasmessa (in kilo-Newton) lungo l'asse y nei casi considerati per impatto verticale sul bordo.

	iv= 4.43 m/s	iv= 7.5 m/s	iv= 12 m/s	EPS (iv=7.5 m/s)
Cub 3	/	/	/	/
Cub 4	/	/	/	/
Cub 5	/	/	/	/
Cub 10	0.6422	0.8926	1.0031	2.6078 (+192.15%)
Cub 20	1.3934	2.3011	3.6350	3.5623 (+54.81%)
Tet 3	0.3185	/	/	/
Tet 4	0.3917	0.5292	/	1.8450 (+248.64%)
Tet 5	0.4246	0.5800	0.9227	2.2858 (+294.10%)
Tet 10	0.7456	1.8223	2.7496	4.0784 (+123.81%)
Tet 20	1.0621	2.0279	3.4413	4.9154 (+142.39%)

Capitolo 8

Limiti del modello

Il modello numerico fin qui esposto e i risultati ottenuti offrono una descrizione del comportamento delle strutture a lattice quando impiegate come materiale costituente il liner per l'assorbimento di energia in caso di incidenti nei caschi motociclistici. Tuttavia, lo studio condotto si è basato su delle semplificazioni che di fatto ne costituiscono una limitazione, limitazione che andrà rimossa mediante ulteriori studi ed approfondimenti futuri. Queste semplificazioni vengono di seguito presentate.

1. La normativa vigente ECE 22.05 stabilisce che i test di omologazione di un casco motociclistico sono da condursi su una falsatesta, su cui è stato posizionato il casco oggetto della prova omologativa, che viene fatta cadere da un'altezza specifica; è dunque l'insieme casco più falsatesta a muoversi e l'incudine è ferma, non accade il contrario come è stato studiato in questo documento.
2. A causa del punto di cui sopra non è stato possibile stabilire un termine di paragone tra i limiti di accelerazione e di HIC definiti dalla normativa, e le forze e accelerazioni massime dedotte nel presente studio.
3. Un casco motociclistico ha sempre una forma quasi emisferica; qui, invece, il provino multistrato è stato assunto piatto sebbene le sue dimensioni siano comparabili con quelle di una notevole porzione di casco, dimensioni tali perciò da avere almeno una minima curvatura.
4. La lamina superiore del provino, che ha la funzione di ripartire il carico trasmesso dall'impattatore al sottostante layer a lattice, è stata modellata come un layer il cui materiale è alluminio così da avere un termine di comparazione con il comportamento dei pannelli sandwich

[54]. In un normale casco motociclistico la calotta esterna solitamente è realizzata in un materiale polimerico o composito, le cui proprietà e il cui peso possono variare sostanzialmente rispetto a quelle adottate in questa sede, di conseguenza anche il comportamento del liner potrà essere diverso. La vastità di tipologie di materiali polimerici impiegati, inoltre, limita la possibilità di eseguire uno studio generico, e anche per questo motivo in questa sede la scelta è ricaduta sull'alluminio. Oltretutto, una calotta in composito può offrire un ulteriore contributo alla dissipazione energetica se è soggetta a delaminazione durante l'impatto.

5. La lamina superiore di alluminio non è stata vincolata in alcun modo al liner, per cui può muoversi e deformarsi liberamente in seguito all'impatto della sfera, la quale la trascina con sé all'interno della struttura a lattice; se fosse fissata sul bordo, come accade in un casco motociclistico, questo movimento sarebbe ostacolato dal fissaggio stesso, causando al momento dell'impatto uno stato tensionale che tenderebbe in primo luogo a facilitare la rottura del top sheet, e, in secondo luogo, a ridurre considerevolmente la penetrazione dell'impattatore.
6. Il layer inferiore è stato modellato come una lamina rigida quando in un casco reale essa non è presente, ovvero è costituita dall'imbottitura interna del casco atta a conferirgli comodità e che è a diretto contatto con la testa del motociclista.
7. La densità equivalente di alcuni EPS considerati è in molti casi troppo elevata, ovvero comporterebbe un aumento del peso del casco inaccettabile. Bisognerebbe, dunque, orientarsi verso i liner a minore densità, anche se questi sono più soggetti a penetrazione completa da parte dell'impattatore, cosa che in generale non avviene per un corrispondente layer in EPS.
8. Per gli impatti sul bordo il liner scorre, mentre nella realtà, essendo confinato nel casco, il movimento a cui questo è soggetto è molto limitato nello spazio; un'osservazione simile riguarda gli impatti obliqui. Dunque, la quota di energia cinetica di questi componenti che il software FEM restituisce è, in realtà, quasi nulla e ingegneristicamente trascurabile. Anche la lamina superiore di alluminio acquisisce energia cinetica a seguito dell'impatto nei casi analizzati, cosa che in uno scenario reale non si verifica essendo la calotta esterna fissata ai layer inferiori ed è molto difficile che una collisione causi la completa separazione di uno strato dagli altri.

9. Per le considerazioni appena esposte, nel caso si consideri un intero casco con liner in struttura a lattice sottoposto ai test regolamentati dalla normativa, probabilmente si giunge a delle conclusioni diverse riguardo a quale delle configurazioni studiate sia la migliore, essendo lo scenario per alcuni aspetti notevolmente differente. Dunque, è possibile che tra le strutture studiate la più adatta all'impiego in un casco motociclistico sia una di quelle la cui densità relativa è molto prossima a quella di un tradizionale liner in EPS.

Capitolo 9

Conclusioni

La ricerca nell'ambito della sicurezza stradale è un campo molto attivo vista la quantità di veicoli che percorrono le strade di tutto il mondo ogni giorno e il numero di incidenti che spesso provocano vittime e feriti. Di tutti gli utenti circolanti sulle strade i motociclisti sono tra i più esposti ai pericoli a causa dell'assenza di un abitacolo protettivo. La legge italiana prevede come unico dispositivo di protezione individuale obbligatorio il casco. Sarebbe auspicabile che i caschi non si limitassero a soddisfare i requisiti prestazionali imposti dalla normativa vigente, ma riuscissero a fornire una protezione ancora maggiore, così da costituire un valido strumento di difesa dalle lesioni personali in cui il motociclista potrebbe incorrere se coinvolto in un incidente.

Nel presente documento, perciò, è stato indagato, con l'ausilio del metodo agli elementi finiti, il comportamento di un provino multistrato, costituito da una lamina metallica posta sopra una struttura a lattice, soggetto ad un impatto con una sfera di acciaio. L'obiettivo dello studio è verificare la possibilità di utilizzo di strutture a lattice in nylon 6 come costituenti il liner dei caschi motociclistici per l'assorbimento dell'energia derivante da un incidente stradale. Le velocità di impatto analizzate sono state tre (4.43, 7.5 e 12 m/s) e le configurazioni della struttura a lattice dieci, di cui metà con celle prismatiche di diversa densità lungo lo spessore e metà con piramidali. L'impatto è avvenuto al centro della lamina metallica e con direzione perpendicolare ad essa o inclinata a 45°. Solo l'impatto normale è stato considerato per test sul bordo del provino. Particolare attenzione nella risposta del liner è stata data alla quantità di energia assorbita dall'urto e all'entità delle forze trasmesse allo strato inferiore. Un ulteriore caso, costituito da uno strato in EPS al posto della struttura a lattice, è stato analizzato nelle medesime condizioni come termine di paragone rappresentante l'attuale layout dei caschi motociclistici. Le densità dei provini in EPS analizzati sono state scelte in modo che il peso dei provini in polistirene e della corrispondente struttura a lattice

fossero uguali. Infine, una procedura di ottimizzazione è stata attuata anche sullo spessore del top sheet del provino, così da valutare quale fosse il valore ottimale di questo parametro che permettesse di raggiungere le prestazioni migliori.

I risultati ottenuti hanno dimostrato un miglioramento delle prestazioni sia per quanto riguarda l'efficienza di assorbimento energetico, sia rispetto all'entità delle forze trasmesse allo strato inferiore, sebbene nel primo caso il miglioramento percentuale sia generalmente modesto, di qualche punto percentuale; la riduzione dell'entità del picco di forza trasmessa, invece, è risultato notevole e pari a metà o meno dei valori di forza registrati dal polistirene di densità equivalente. In particolare, tra tutti i casi analizzati, quello che si è dimostrato avere i valori prestazionali medi più elevati, con un occhio di riguardo anche alla minima massa possibile, è stata la configurazione Tet 5; come si può anche vedere dalle tabelle riassuntive nei capitoli precedenti, tale struttura, infatti, è quella che resiste a tutte le velocità di impatto testate, permettendo mediamente un assorbimento di energia maggiore, e trasmettendo al contempo valori di forza bassi, con un aumento moderato del peso di un eventuale casco realizzato in questo materiale. Per quanto riguarda lo spessore della lamina superiore di alluminio, il valore ottimale è risultato pari a 0.1 mm, tale per cui, cioè, si riesce ad ottenere un 2-5% di energia assorbita in più, contemporaneamente a delle forze trasmesse di quasi il 30% in meno rispetto ai casi studiati.

Tutte queste considerazioni fanno pensare che l'uso delle strutture a lattice sia una valida alternativa all'attuale ed esteso impiego dell'EPS come materiale costituente il liner nei caschi motociclistici. Ulteriori approfondimenti sono da ricercarsi per ovviare alle approssimazioni insite nel modello qui analizzato ed esposte nel precedente capitolo, nonché ulteriori migliorie possono essere apportate cambiando forma e dimensioni delle celle della struttura a lattice, o il materiale di cui le stesse sono fabbricate, così da ottenere un casco in grado di assorbire la maggior quantità possibile di energia minimizzando al tempo stesso la massa e l'inerzia della testa.

Bibliografia

- [1] B.C. Liu, R. Ivers, R. Norton, S. Boufous, S. Blows, S.K. Lo, *Helmets for Preventing Injury in Motorcycle Riders*, (2008).
- [2] E. Blackman, *Helmet Protection Against Traumatic Brain Injury: A Physics Perspective on this Interdisciplinary Frontier*, Office of Scientific and Technical Information, U.S. Department of Energy, 2009.
- [3] <https://www.istat.it/it/archivio/59836>.
- [4] T.M. Ricea, L. Troszaka, J.V. Ouelleta, T. Erhardta, G.S. Smitha, B.W. Tsai, *Motorcycle helmet use and the risk of head, neck, and fatal injury: Revisiting the Hurt Study*, (2016).
- [5] <https://www.istat.it/it/archivio/202802>.
- [6] D. Khor, K. Inaba, A. Aiolfi, S. Delapena, E. Benjamin, K. Matsushima, A. M. Strumwasser, D. Demetriades, *The impact of helmet use on outcomes after a motorcycle crash*, Injury, Int. J. Care Injured 48 (2017) 1093–1097.
- [7] <https://www.istat.it/it/archivio/204440>.
- [8] <https://slideplayer.com/slide/6236825/>.
- [9] A. Lanino, A. Verri, A. Morandi, A. Marinoni, 2004, *L'incidente motociclistico in ottica medico-legale. Metodologia di identificazione delle lesioni alle diverse tipologie di urto*, Emergency care journal, Anno IV, n. I, pp. 38-44.
- [10] A. Iwata, P.K. Stys, J.A. Wolf, X.H. Chen, A.G. Taylor, D.F. Meaney, D.H. Smith, (2004), *Traumatic axonal injury induces proteolytic cleavage of the voltage-gated sodium channels modulated by tetrodotoxin and protease inhibitors*, The Journal of Neuroscience, 24 (19): 4605—4613.

- [11] J. Wasserman, R.A. Koenigsberg, (2007), *Diffuse axonal injury*, Emedicine.com, retrieved on 2008-01-26.
- [12] <https://www.vivehealth.com/blogs/resources/whiplash>.
- [13] T. Wenjin, C.L. Ming, *Design of lattice structure for additive manufacturing*, 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA), IEEE 10.1109/ISFA.2016.7790182.
- [14] V.S. Deshpande, M.F. Ashby, N.A. Fleck, 2001, *Foam topology: bending versus stretching dominated architectures*, Acta Materialia, 49(6), pp.1035-1040.
- [15] R. Lakes, 1987, *Foam structures with a negative Poisson's ratio*, Science, 235(4792), pp.1038-1040.
- [16] D. Prall, R.S. Lakes, 1997, *Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1*, International Journal of Mechanical Sciences, 39(3), pp.305-314.
- [17] E.A. Friis, R.S. Lakes, J.B. Park, 1988, *Negative Poisson's ratio polymeric and metallic foams*, Journal of Materials Science, 23(12), pp.4406-4414.
- [18] R.S. Lakes, K. Elms, 1993, *Indentability of conventional and negative Poisson's ratio foams*, Journal of Composite Materials, 27(12), pp.1193-1202.
- [19] R.S. Lakes, 1993, *Design consideration for negative Poisson's ratio materials*, Journal of Mechanical Design, 115(4).
- [20] *Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions*, Addendum 21, Regulation 22, Revision 4, 24 September 2002, United Nations Economic Commission for Europe.
- [21] M. Ghajari, S. Peldschusb, U. Galvanetto, L. Iannucci, *Effects of the presence of the body in helmet oblique impacts*, 2012
- [22] N. Bourdet, S. Mojumder, S. Piantini, C. Deck, M. Pierini, R. Willinger, *Proposal of a new motorcycle helmet test method for tangential impact*, IRC-16-65.

- [23] F.A.O. Fernandes, R.J. Alves de Sousa, *Motorcycle helmets - a state of the art review*, *Accid. Anal. Prev.* 56 (2013) 1-21.
- [24] J.P. Goldstein, *The effect of motorcycle helmet use on the probability of fatality and the severity of head and neck injuries*, Sage Publications, Inc, Vol 10 No. 3, June 1986 355-375.
- [25] K.P. Krantz, *Head and neck injuries to motorcycle and moped riders-with special regard to the effect of protective helmets*, *Injury* 16 (1985) 253-258.
- [26] R. Ramli, J. Oxley, F.M. Noor, N.K. Abdullah, M.S. Mahmood, A.K. Tajuddin, R. McClure, *Fatal injuries among motorcyclists in Klang Valley, Malaysia*, *J. Forensic Leg. Med.* 26 (2014) 39-45.
- [27] G. Badiali, E. Pasquini, O. Piccin, C. Marchetti, *Injury risk related to the helmet strap: Mandible and hyoid bone fractures with a hyoepiglottic ligament lesion*, (2010).
- [28] J.V. Ouellet, D.R. Thom, T. Smith, H.H. Hurt, *Helmets and neck injuries in fatal motorcycle crashes*, *Int Mot. Saf. Conf.*, Orange County, US (2013).
- [29] M. Richter, D. Otte, U. Lehmann, B. Chinn, E. Schuller, D. Doyle, K. Sturrock, C. Krettek, *Head injury mechanisms in helmet-protected motorcyclists: prospective multicenter study*, *J.Trauma.* 51 (2001) 949-958.
- [30] A.K. Abbas, A.F. Hefny, F.M. Abu-Zidan, *Does wearing helmets reduce motorcycle related death? A global evaluation*, *Accid. Anal. Prev.* 49 (2012) 249-252.
- [31] F.M. Shuaeib, A.M.S. Hamouda, R.S.R. Umar, M.M. Hamdan, M.S.J. Hashmi, *Motorcycle helmet - Part I. Biomechanics and computational issues*, *J. Mater. Process. Tech.* 3 (2002) 406-421.
- [32] D. Sahoo, C. Deck, R. Willinger, *Development and validation of an advanced anisotropic visco-hyperelastic human brain FE model*, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 33 (2014) 24-42.
- [33] R. Willinger, C. Deck, *Model Based Head Injury Criteria for Head Protection Optimization*, *Helmet Perform Des.* (2013) London.
- [34] A. Cernicchi, U. Galvanetto, L. Iannucci, *Virtual modelling of safety helmets: practical problems*, *Int. J. Crashworthiness* 13 (2008) 451-467.

- [35] P.K. Pinnoji, P. Mahajan, *Analysis of impact-induced damage and delamination in the composite shell of a helmet*, Mater. Des. 31 (2010) 3716–3723.
- [36] N.J. Mills, S. Wilkes, S. Derler, A. Flisch, *FEA of oblique impact tests on a motorcycle helmet*, Int. J. Impact Eng. 36 (2009) 913–925.
- [37] M. Ghajari, U. Galvanetto, L. Iannucci, R. Willinger, *Influence of the body on the response of the helmeted head during impact*, Int. J. Crashworthiness 16 (2011) 285–295.
- [38] S.J. Bonina, J.C. Gardinerb, A. Onar-Thomasc, S.S. Asfoura, G.P. Siegmund, *The effect of motorcycle helmet fit on estimating head impact kinematics from residual liner crush*, Accident Analysis and Prevention 106 (2017) 315–326.
- [39] G.D. Caserta, L. Iannucci, U. Galvanetto, *Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner*, Compos. Struct. 93 (2011) 2748–2759.
- [40] R.M. Coelho, R.J. Alves de Sousa, F.A.O. Fernandes, F. Teixeira-Dias, *New composite liners for energy absorption purposes*, Mater. Des. 43 (2013) 384–392.
- [41] L. Di Landro, G. Sala, D. Olivieri, *Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets*, Polym. Test. 21 (2002) 217–228.
- [42] L. Cui, S. Kiernan, M.D. Gilchrist, *Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials*, Mater. Sci. Eng. A 507 (2009) 215–225.
- [43] L. Cui, M.A. Forero Rueda, M.D. Gilchrist, *Optimisation of energy absorbing liner for equestrian helmets. Part II: Functionally graded foam liner*, Mater. Des. 30 (2009) 3414–3419.
- [44] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids, Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge Solid State Science Series, 1999.
- [45] A. Cernicchi, U. Galvanetto, R. Olsson, *Virtual testing of composite motorcycle helmets*, Int. J. Mod. Phys. B 22 (2008) 1705–1711.
- [46] B.J. Ramirez, V. Gupta, *Evaluation of novel temperature-stable viscoelastic polyurea foams as helmet liner materials*, Materials and Design 137 (2018) 298–304.

- [47] M.A. Forero Rueda, L. Cui, M.D. Gilchrist, *Optimisation of energy absorbing liner for equestrian helmets. Part I: Layered foam liner*, Materials and Design 30 (2009) 3405–3413.
- [48] L. Cui, M.A. Forero Rueda, M.D. Gilchrist, *Optimisation of energy absorbing liner for equestrian helmets. Part II: Functionally graded foam liner*, Materials and Design 30 (2009) 3414–3419.
- [49] S.P. Soe, P. Martin, M. Jones, M. Robinson, P. Theobald, *Feasibility of optimising bicycle helmet design safety through the use of additive manufactured TPE cellular structures*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 79 (2015) 1975–1982.
- [50] S. Banerjee, *On the mechanical properties of hierarchical lattices*, Mech. Mater. 72 (2014) 19–32.
- [51] F. Sun, C. Lai, H. Fan, D. Fang, *Crushing mechanism of hierarchical lattice structure*, Mech. Mater. 97 (2016) 164–183.
- [52] F. Sun, C. Lai, H. Fan, *In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures*, Mater. Des. 100 (2016) 280–290.
- [53] S. Farajzadeh Khosroshahi, S.A. Tsampasb, U. Galvanetto, *Feasibility study on the use of a hierarchical lattice architecture for helmet liners*, Materials Today Communications 14 (2018) 312–323.
- [54] D. Zhang, Q. Fei, P. Zhang, *Drop-weight impact behaviour of honeycomb sandwich oannels under a spherical impactor*, Composite Structures 168 (2017) 633–645.
- [55] R.J. D’Mello, S. Guntupalli, L.R. Hansen, A.M. Waas, *Dynamic axial crush response of circular cell honeycombs*, Proc. R. Soc. A (2012) 468, 2981–3005
- [56] *LS-Dyna keyword user’s manual*, (2014).
- [57] R.T. Moura, L.M. Mazzariol, A.H. Clausen, M. Langseth, M. Alves, *Axial Loading of Cylinders Made of Nylon with Nano-particles*, Proc. IMPLAST 2010 Conf (2010).
- [58] X.C. Hu, H.H. Yang, *1.11 - Polyamide and Polyester Fibers*, Comprehensive Composite Materials, Volume 1, 2000, Pages 327–344.
- [59] M. Ghajari, U. Galvanetto, *Virtual and experimental testing of helmets*, Mymosa - Motorcycle and motorcyclist safety (2010)