



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Correlazione numerico-sperimentale di un assorbitore d'urto in
materiale composito per vettura Formula SAE.**

Relatore: Prof. Giovanni Meneghetti

Correlatori: Ing. Alessandro Croce (HPE GROUP)

Ing. Simone Lanzani (HPE GROUP)

Laureando: Davide Citarella

Anno Accademico 2023/2024

ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di istituire una corrispondenza biunivoca tra il modello agli elementi finiti dell'impact attenuator di una vettura di Formula SAE, realizzato completamente in fibra di carbonio ed il corrispondente test sperimentale. Quest'ultimo consiste nel lasciar impattare una massa in caduta libera da un'altezza ben definita con l'obiettivo di registrare la decelerazione ottenuta in relazione all'energia accumulata dall'assorbitore che, per regolamento FSAE, deve essere almeno pari a 7350 J.

Al fine di perseguire tale scopo, verrà utilizzato il software RADIOSS che adotta una strategia atta a tracciare gli stress su ciascun layer del composito ed eliminare tutti gli elementi che non soddisfano il criterio di cedimento inizialmente definito.

L'elaborato includerà anche il processo di selezione, a seguito della caratterizzazione sperimentale, dei materiali compositi e la modellazione analitica, in via previsionale, dell'assorbitore d'urto per un pre-dimensionamento.

Verranno infine svolte considerazioni sull'ottimizzazione della massa e della rigidità dell'impact attenuator e saranno proposte alcune alternative sull'adozione di materiali differenti da quelli utilizzati nella presente trattazione, ad esempio il Kevlar.

L'elaborato è strutturato come segue:

- CAPITOLO 1** In questo capitolo si fornisce una visione generale di alcuni degli assorbitori utilizzati in ambito FSAE a partire dalla stagione 2019-2020 e l'evoluzione in termini progettuali, di materiale e prestazioni ottenute. In particolare, si pone particolare attenzione agli obiettivi principali tali da fornire una guida sulle procedure operative atte a migliorare l'assorbimento di energia e la decelerazione massima raggiunta durante l'urto.
- CAPITOLO 2** In questo capitolo si affronta il danneggiamento dei materiali compositi non inteso in senso lato, bensì focalizzato al caso di carico assiale e flessionale. Tale condizione di carico è quella riscontrata nel caso di un impatto di tipo assiale che si ripercuote sui fenomeni di danneggiamento progressivi che in questo capitolo vengono studiati ed analizzati. In tal caso,
- CAPITOLO 3** In questo capitolo si tratta la caratterizzazione sperimentale dei materiali utilizzati nella presente trattazione. In particolare, si farà riferimento ai materiali in fibra di carbonio utilizzati ed anche la struttura cellulare dell'honeycomb. Inoltre, verranno sintetizzati i risultati sperimentali già in ottica di pronto utilizzo all'interno del modello numerico, quale oggetto del presente lavoro di tesi.
- CAPITOLO 4** In tale capitolo si va descrivendo il modello numerico realizzato per la correlazione numerico-sperimentale dell'assorbitore. In particolare, in tale sezione si andranno studiando i parametri principali da inserire all'interno del modello in relazione alle principali problematiche riscontrabili nella definizione dei contatti, delle condizioni al contorno ed infine nelle proprietà da associare agli elementi del modello, con il rispettivo materiale in essere.
- CAPITOLO 5** In questo capitolo si vanno analizzando i risultati ottenuti dalla prova sperimentale e dalla simulazione numerica nell'ottica di correlare gli uni agli altri in ottica di validazione del modello numerico. In particolare, in tale sezione si andranno a coprire le macroaree legate all'energia assorbita, al picco di accelerazione e il suo valore medio nel tempo, la deformazione complessiva dell'assorbitore sia qualitativa che quantitativa.
- CAPITOLO 6** In questo capitolo vengono tratte le conclusioni circa il lavoro effettuato, possibili miglioramenti ed implementazioni future.

INDICE

1	Introduzione	13
1.1	Tipologie di assorbitore d'urto	13
1.1.1	Assorbitore d'urto: stagione 2019-2020	14
1.1.2	Assorbitore d'urto: stagione 2020-2021	15
2	Danneggiamento dei materiali compositi	19
2.1	SEA: caratterizzazione e discussione curva di carico	20
2.1.1	SEA: Fattori di influenza	23
2.2	Meccanismi di cedimento e risposta meccanica	25
2.2.1	Meccanismi di cedimento macroscopici: Carico assiale	26
2.2.2	Meccanismi di cedimento macroscopici: Carico flessionale	26
2.2.3	Meccanismi di cedimento microscopici: Carico assiale	26
3	Caratterizzazione sperimentale	33
3.1	Prova di trazione	33
3.1.1	Prova di taglio	34
3.1.2	Prova di compressione	35
3.2	Caratterizzazione sperimentale CFRP: GG200P_WS_100	37
3.2.1	Risultati sperimentali provini: direzione 0°	38
3.3	Caratterizzazione sperimentale: Honeycomb	42
3.3.1	Prova di taglio: Caratteristiche meccaniche nel piano TL	43
3.3.2	Prova di taglio: Caratteristiche meccaniche nel piano TW	45
3.3.3	Prova di taglio: Caratteristiche meccaniche nel piano LW	47
3.3.4	Prova di compressione: Caratteristiche meccaniche in T, L e W	48
4	Modellazione numerica	57
4.1	Definizione e discretizzazione della geometria	58
4.2	Definizione di vincoli e carichi	61
4.3	Definizione del materiale	63
4.3.1	Comportamento tensionale	63
4.3.2	Comportamento a taglio: Delaminazione	64
4.3.3	Comportamento plastico	64
4.4	Caratterizzazione numerica del materiale	66
4.5	Definizione delle proprietà: /PROP/TYPE11 (SH_SANDW)	73
4.6	Sequenza di laminazione: Stagione 2022-2023	76
4.6.1	Sequenza di laminazione: Stagione 2023-2024	77
4.7	Definizione dei contatti: PROP/INTER/TYPE/7	78
4.8	Aspetti critici, problematiche affrontate e risultati ottenuti	84

5	Analisi dei risultati	87
5.1	Post processing: risultati stagione 2022-2023	89
5.1.1	SEA: analisi e discussione dei risultati	90
5.2	Post processing: risultati stagione 2023-2024	95
5.2.1	Confronto danneggiamento numerico-sperimentale	96
5.3	Confronto stagione 2022-2023 – 2023-2024	98
5.3.1	Introduzione	99
5.3.2	Confronto numerico - sperimentale	100
5.4	Aspetti critici e problematiche affrontate	104
6	Conclusioni e sviluppi futuri	107
7	Ringraziamenti	109
8	Bibliografia	111

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1	Immagini che ritraggono la caduta della massa sull'assorbitore realizzato in Honeycomb della stagione 2019-2020.	15
Figura 1.2	Impact attenuator post crush a sinistra e AIP a destra, deformato plasticamente. Stagione 2019-2020.	15
Figura 1.3	Realizzazione dello stampo con conseguente mascheratura e riempimento.	16
Figura 1.4	Sequenza di laminazione dell'assorbitore secondo layup 0-45°.	17
Figura 1.5	Cianfrinatura e deposizione honeycomb nomex.	17
Figura 1.6	Applicazione secondo film di adesivo e seconda laminazione effettuata.	17
Figura 1.7	Da sinistra verso destra, posizionamento del controstampo, processo di cura ed estrazione finale.	18
Figura 1.8	Dati sperimentali ottenuti con accelerometro montato in torre di caduta sulla massa battente in caduta libera sull'assorbitore.	18
Figura 2.1	Grafico di carico di rottura contro lo spostamento della massa in caduta al variare dei diversi tubi in parete sottile utilizzati da Mamalis per la caratterizzazione sperimentale. [1].....	20
Figura 2.2	Confronto tra il grafico di forza contro tempo derivante dal drop test eseguito su provini opportunamente preparati secondo normativa [2] ed analogo grafico relativo ai dati sperimentali raccolti in torre di caduta presso l'azienda ospitante OZ S.p.a.	21
Figura 2.3	Confronto tra il grafico di forza contro spostamento della massa battente nel caso di drop test su provini normati ed analogo grafico relativo ai dati sperimentali raccolti in torre di caduta presso l'azienda ospitante OZ S.p.a.	21
Figura 2.4	Grafico dell'energia nel tempo derivante da prove di drop test su provini opportunamente curati secondo normativa [2].	23
Figura 2.5	Cuneo di deformazione tratto da [1] ed analisi dinamica del danneggiamento.	28
Figura 2.6	Influenza cianfrinatura rispetto al caso di un tubo a sezione quadrato non cianfrinato. [4]	29
Figura 2.7	Meccanismo di cedimento per splaying mode [4].	30
Figura 2.8	Meccanismo di cedimento per fragmentation mode [4].	31
Figura 3.1	Grafico sperimentale ingegneristico tensione deformazione con fibre orientate a 0°. ..	33
Figura 3.2	Grafico sperimentale ingegneristico tensione deformazione con fibre orientate a 90°. ..	34
Figura 3.3	Grafico sperimentale ingegneristico tensione deformazione a taglio.	35
Figura 3.4	Curve ingegneristiche sforzo-deformazione: compressione in direzione 0°.	35
Figura 3.5	Curve ingegneristiche sforzo-deformazione: compressione in direzione 90°.	36
Figura 3.6	Curve ingegneristiche sforzo-deformazione: compressione in direzione 45°.	36
Figura 3.7	Estensometro utilizzato per la caratterizzazione sperimentale ed estensimetri adottati per la determinazione delle proprietà a taglio del provino.	37
Figura 3.8	Datasheet T700 direttamente dal produttore Microtex.	38

Figura 3.9	Provini fissati in macchina di prova per la caratterizzazione sperimentale durante la prova di trazione.	40
Figura 3.10	Andamento delle tensioni con angolo di off-axis rispetto alla direzione principale.	40
Figura 3.11	Curva tensione-deformazione ingegneristica per il materiale T700.....	41
Figura 3.12	Direzioni di riferimento Honeycomb [8] e setup prova sperimentale.	42
Figura 3.13	Istantanee delle diverse fasi della prova di caratterizzazione Honeycomb in direzione L. [8].....	44
Figura 3.14	Provino Honeycomb post-mortem: termine della prova di caratterizzazione. [8].....	44
Figura 3.15	Curva sperimentale tensione deformazione a taglio. [8].....	45
Figura 3.16	Istantanee delle diverse fasi della prova di caratterizzazione Honeycomb in direzione W. [8].	46
Figura 3.17	Grafico relativo alle tensioni e deformazioni angolari che si verificano all'interno della struttura a nido d'ape nel piano WT. [8].....	46
Figura 3.18	Istantanee delle diverse fasi della prova di caratterizzazione Honeycomb nel piano LW. [8].....	47
Figura 3.19	Grafico relativo alle tensioni e deformazioni angolari che si verificano all'interno della struttura a nido d'ape nel piano LW. [8].....	47
Figura 3.20	Honeycomb prima e dopo la compressione lungo la direzione T. [8]	48
Figura 3.21	Honeycomb prima e dopo la compressione lungo la direzione W. [8]	48
Figura 3.22	Honeycomb prima e dopo la compressione lungo la direzione L. [8]	49
Figura 3.23	Curva sperimentale ottenuta dalla compressione in direzione T dell'honeycomb.	49
Figura 3.24	Curva sperimentale ottenuta dalla compressione in direzione L dell'honeycomb.	50
Figura 3.25	Curva sperimentale ottenuta dalla compressione in direzione W dell'honeycomb.	51
Figura 3.26	Curva energia tempo con chiarificazione delle differenti quote parti di energia assorbite.	52
Figura 3.27	Curva tensione deformazione in direzione T dell'honeycomb Plascore stagione 2019-2020.	53
Figura 3.28	Datasheet dell'honeycomb utilizzato durante la caratterizzazione sperimentale della stagione 2019-2020 e che viene utilizzato nel modello numerico.	54
Figura 3.29	Dati sperimentali assorbitore realizzato in Honeycomb di tipo FSAE per la stagione 2019-2020.....	55
Figura 3.30	Curva accelerazione - tempo filtrata, con istanti temporali di campionamento.....	55
Figura 4.1	Visualizzazione modello numerico per l'IA relativo alla stagione 2022-2023.	58
Figura 4.2	Set di elementi e nodi rispettivamente creati ai fini dei contatti e della definizione dei laminati.....	59
Figura 4.3	Definizione della part card per ciascun componente e definizione della card relativa al rigido.	60
Figura 4.4	Modellazione numerica della massa battente in caduta libera. Rigido collegato ad elementi shell.....	60

Figura 4.5	Grafico dell'accelerazione sperimentale in funzione del tempo espresso in (s). Tali dati derivano dall'accelerometro montato sopra la massa battente in torre di caduta.	61
Figura 4.6	Impostazione nel modello numerico della velocità di impatto del nodo del master associato alla massa in caduta libera.	62
Figura 4.7	Inserimento nel modello numerico della funzione gravità.	63
Figura 4.8	Curva elasto-plastica prevista per il modello di Tsai-Wu. Paragone con grafico puramente elastico.	64
Figura 4.9	Comportamento plastico secondo il criterio di Tsai-Wu.	65
Figura 4.10	Evoluzione delle condizioni a rottura al variare dello snervamento del materiale.	65
Figura 4.11	Caratterizzazione numerica del materiale: compressione, trazione e taglio di un elemento 2x2 [11].	66
Figura 4.12	Grafico di CRASURV al variare dell'incrudimento del materiale.	68
Figura 4.13	Grafico di tensione in direzione 1 [7] e definizione delle grandezze di deformazione nelle diverse direzioni.	68
Figura 4.14	Grafici sperimentali ottenuti dalla caratterizzazione del T700 ottenuta in laboratorio.	69
Figura 4.15	Da sinistra verso destra la direzione di laminazione delle fibre e le normali alle plies distese.	74
Figura 4.16	Orientazione di ciascun layer all'interno del pannello composito con riferimento al vettore che ne indica l'orientazione.	74
Figura 4.17	Definizione della superficie media nel pannello composito dal primo all'ultimo layer [7].	75
Figura 4.18	Card della proprietà /PROP/SH_SANDW/ inserita all'interno del modello numerico [7].	76
Figura 4.19	Grafico comparativo e parametri in Istf.	79
Figura 4.20	Grafico comparativo parametrico in Igap.	80
Figura 4.21	Grafico comparativo parametrico in STmin.	81
Figura 4.22	Grafico comparativo e parametrico in Gapmin.	81
Figura 4.23	Impostazione del Gap min con riferimento alle impostazioni presentate in [7].	82
Figura 4.24	Grafico comparativo e parametrico in INACTI per il contatto solo ed esclusivo di massa e assorbitore.	82
Figura 4.25	Grafico comparativo parametro in INACTI per tutti e soli i contatti ad esclusione di quello tra la massa battente e l'assorbitore.	83
Figura 4.26	Contour delle forze di contatto tra assorbitore e massa battente in corrispondenza della prima pelle, ossia quella superiore di copertura.	84
Figura 5.1	Dati sperimentali derivanti dalla prova eseguita in torre di caduta nella stagione 2022-2023.	87
Figura 5.2	Dati sperimentali derivanti dalla prova eseguita in torre di caduta nella stagione 2023-2024.	88

Figura 5.3	Confronto dei dati sperimentali delle due stagioni, campionati negli appositi intervalli.	88
Figura 5.4	Confronto dati sperimentali filtrati delle due stagioni.	89
Figura 5.5	Dati sperimentali stagione 2022-2023 grezzi e funzione filtro.	89
Figura 5.6	Confronto dati sperimentali ottenuti da test in torre di caduta e dati provenienti dal modello numerico.	90
Figura 5.7	A sinistra si possono osservare i valori forniti in output dal modello numerico mentre a destra gli stessi valori in termini di accelerazione contrapposti allo spostamento della massa sia numerici che sperimentali.....	91
Figura 5.8	Dati numerici energia cinetica della stagione 2022-2023.	92
Figura 5.9	Confronto tra energia cinetica ottenuta dal modello numerico e dai dati sperimentali.	92
Figura 5.10	Confronto tra energia interna numerica e sperimentale.....	93
Figura 5.11	Grafici di energia interna ed energia cinetica nel tempo: risultati stagione 2022-2023.	93
Figura 5.12	Curve di spostamento della massa battente: confronto tra modello numerico e modello sperimentale. In particolare, la curva verde fa riferimento al caso numerico mentre quella arancione a quella sperimentale.....	94
Figura 5.13	Grafico comparativo delle velocità di decelerazione del modello numerico e di quello sperimentale a confronto.	95
Figura 5.14	Grafico comparativo delle energie cinetica nel caso di modello numerico e sperimentale.	95
Figura 5.15	Grafico comparativo degli spostamenti del caso numerico e di quello sperimentale, ciascuna con la propria unità di misura.	96
Figura 5.16	Risultati attesi secondo il modello analitico da confrontare con quelli ottenuti sperimentalmente e numericamente.	96
Figura 5.17	Grafico frame by frame della sequenza temporale per il danneggiamento sperimentale dell'assorbitore nel caso sperimentale. Test effettuato in torre di caduta in OZ.	97
Figura 5.18	Grafico frame by frame della sequenza temporale per il danneggiamento numerico dell'assorbitore nel caso numerico.	97
Figura 5.19	Momento in cui avviene il danneggiamento dell'assorbitore in corrispondenza della variazione di rigidità, da 2 a 3 pelli in termini di layup. Frame di riferimento 12-13..	98
Figura 5.20	Momento in cui avviene il danneggiamento dell'assorbitore in corrispondenza della variazione di rigidità. Frame di riferimento 12-13.	98
Figura 5.21	Modelli numerici a confronto: a sinistra quello relativo alla stagione 2022-2023 ed a destra quello della stagione 2023-2024.....	99
Figura 5.22	Confronto rilievi sperimentali, anche filtrati, delle stagioni 2022-2023 e 2023-2024.	100
Figura 5.23	Confronto tra le due stagioni in termini di spostamento della massa battente nonché deformazione della stessa e relativa velocità.	101
Figura 5.24	Confronto tra le due stagioni in termini di energia assorbita dalla crashbox in condizioni di perfetta conversione dell'energia cinetica in energia interna.	101

Figura 5.25	Confronto sperimentale e numerico dell'assorbitore delle due stagioni in termini di spostamento della massa sospesa ovvero di deformazione dell'assorbitore.	102
Figura 5.26	Mostra l'andamento dello spostamento e quindi la deformazione del piatto antintrusione nel tempo.	102
Figura 5.27	Mostra l'andamento, con particolare attenzione, dell'energia cinetica nel tempo.....	103
Figura 5.28	Andamento di tensione e deformazione nel tempo per le stagioni 2022-2023 e 2023-2024.	103
Figura 5.29	Figura rappresentativa dell'energia interna accumulata dall'AIP. Particolare attenzione va al tratto successivo ai 40 ms.....	104
Figura 5.30	Grafico correlativo massa-time step in condizioni già di convergenza.	104
Figura 5.31	Confronto tra i dati sperimentali e numerici della stagione 2022-2023 con riferimento all'errore (curva verde) legato all'errore nella definizione del materiale associato ad un errore di contatto.....	105
Figura 5.32	Errore numerico dovuto all'incremento della massa all'interno del modello e quindi un conseguente incremento dell'energia cinetica.	106

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1	Provini realizzati per prova di trazione.....	39
Tabella 3-2	Provini realizzati per prova di compressione.	41
Tabella 3-3	Tabella rappresentativa delle proprietà meccaniche del materiale T700.	42
Tabella 3-4	Caratteristiche honeycomb IMATEC 4.5 pcf.	43
Tabella 4-1	Lista di unità di misura utilizzato all'interno dell'ambiente simulativo.	58
Tabella 4-2	In questa tabella si riportano i valori di deformazione per il T700 e T300 che vengono utilizzati nel presente modello numerico.....	67
Tabella 4-3	Tabella delle proprietà relativa al materiale commercialmente noto come T700.	70
Tabella 4-4	Tabella delle proprietà relativa al materiale commercialmente noto come T300.	70
Tabella 4-5	Tabella che fornisce i valori da inserire all'interno del modello per caratterizzare numericamente i materiali quali T700 e T300.	73
Tabella 4-6	Tabella identificativa della card del materiale composito con le diverse plies con orientazione, spessore, quota e tipologia di materiale.	75
Tabella 4-7	Tabella per inserimento spessori e quote di impilaggio composito.	75
Tabella 5-1	Tabella riassuntiva risultati stagione 2022-2023.	94
Tabella 5-2	Confronto risultati del modello analitico, numerico e simulazione sperimentale stagione 2023-2024.....	96

CAPITOLO 1

Introduzione

1 Assorbitore d'urto per vettura Formula SAE

L'assorbitore d'urto per vettura FSAE è costituito, almeno per il caso del prototipo elettrico dell'Università degli Studi di Padova, da un attenuatore d'urto, nel seguito chiamato impact attenuator (IA) e da un piatto sul quale esso è incollato noto come anti-intrusion plate (AIP). L'assorbitore d'urto viene posizionato sulla parte terminale anteriore della vettura in modo da tutelare il pilota in caso di urto frontale.

Il regolamento FSAE [3] prevede che tale IA debba assorbire l'energia cinetica della vettura in caso di crash ed in particolare, si deve garantire che l'assorbitore sia in grado di assorbire l'energia cinetica di una vettura di massa pari a 300 kg che impatta una barriera rigida ad una velocità di 7.0 m/s. Pertanto, l'energia cinetica ad essa associata è pari a 7350 J. L'assorbitore d'urto dovrà attenuare l'equivalente dell'energia cinetica e quindi almeno un'energia pari a 7350 J.

Come precedentemente anticipato, l'IA deve essere assicurato in maniera salda all'AIP mediante un adesivo strutturale oppure attraverso saldatura e/o giunzione bullonata. I materiali che possono essere utilizzati per tale assorbitore non hanno delle specifiche precise e possono essere pertanto scelte in base al volere del progettista.

L'attenuatore d'urto, oggetto di tale trattazione, viene validato attraverso una prova di impatto condotta nell'azienda OZ S.p.a con l'utilizzo di una torre di caduta che permette alla massa battente di 300 kg di cadere da un'altezza di 2.5m al fine di garantire l'assorbimento o meno dell'energia richiesta dal regolamento.

Come previsto dal regolamento di FSG nella sezione 3.17T, 3.18T e 3.19T l'impact attenuator e quindi l'anti intrusion plate sottostante devono essere in grado di soddisfare i requisiti precedentemente espressi con le seguenti specifiche tecniche:

- Decelerazione media minore di 20g;
- Picco di decelerazione minore di 40g;
- Deformazione plastica permanente meno di 25mm.

Le caratteristiche geometriche dell'assorbitore d'urto hanno delle caratteristiche geometriche ben definite ossia una dimensione minima di 200mm oltre il front bulkhead con dimensioni minime di 100 x 200 mm in altezza e larghezza rispettivamente.

Pertanto, i target del design riguardano l'assorbimento di 7350J, energia che quantitativamente viene assorbita dalla forza media integrale che la struttura di assorbimento offre, moltiplicata per la lunghezza verticale di rottura che interessa il fenomeno di crushing.

1.1 Tipologie di assorbitore d'urto

A partire dalla stagione 2019-2020 si sono realizzati annualmente alcuni assorbitori d'urto sempre più innovativi che in questo paragrafo verranno ripresi per comprendere l'evoluzione degli stessi e la relativa direzione scelta ai fini progettuali.

Gli obiettivi perseguiti in tal senso sono quelli di aumentare la rigidezza dell'assorbitore in modo da ridurre il picco di accelerazione ma anche il valore medio dello stesso, con la finalità intrinseca di aumentarne l'energia assorbita a fronte di una deformazione residua inferiore ossia uno spostamento della massa sospesa sempre maggiore di quello della passata stagione. In tal senso si considera anche la finalità di ridurre il peso complessivo dell'assieme AIP e AI.

1.1.1 Assorbitore d'urto: stagione 2019-2020

Durante la stagione 2019-2020 si è scelto di utilizzare un AI realizzato in honeycomb, materiale con struttura a nido d'ape a bassa densità, utilizzato maggiormente in strutture aeronautiche, incollato ad un AIP in materiale composito. Per la progettazione dell'assorbitore si abbia a disposizione soltanto il modello analitico, ben correlato ai dati sperimentali e basato sulle considerazioni energetiche di seguito indicate.

Nella fase di progettazione di questo assorbitore d'urto è stato necessario garantire la minima distanza tra i fori e gli spigoli dell'AIP come previsto da regolamento. Infatti, il rapporto tra la distanza dal centro del foro e dal bordo dell'AIP e il diametro del foro D deve rispettare la seguente relazione:

$$\frac{e}{D} > 1.5 \quad (1.1)$$

Al fine di evitare picchi asimmetrici dello stato tensionale all'interno dell'assorbitore e falsando così la decelerazione rilevata dall'accelerometro, è stato deciso di garantire almeno la simmetria geometrica in direzione assiale, considerando che quella trasversale non è assicurabile a causa del processo di laminazione stesso. Inoltre, si è fatto in modo che la distanza dal centro dell'assorbitore, nonché centro dell'impatto, delle viti fosse uguale per ciascuna di esse.

In tal caso, con riferimento a quanto discusso in precedenza in merito all'energia assorbita dall'assorbitore, l'honeycomb avrà una certa resistenza allo schiacciamento (crushed length). Si ricava così la forza di schiacciamento, moltiplicando la resistenza allo schiacciamento per l'area frontale della crashbox. Di conseguenza l'energia assorbita si calcola come segue:

$$E = F \times h = C_s \times h \times A \quad (1.2)$$

Con riferimento al caso di figura seguente che è caratterizzato da un honeycomb con C_s pari a 3 MPa, area $100 \times 200 \text{ mm}^2$, si avrà costantemente una forza pari a 60 kN. Invertendo la formula precedentemente scritta si può ottenere la lunghezza necessaria per assorbire l'energia potenziale che la massa in caduta ha ad una certa altezza, trasformata poi in energia cinetica della stessa.

Con il caso di riferimento si avranno 0.123m di crushed length minima necessaria. Infatti, si ha:

$$h = \frac{E}{F} = \frac{7350 \text{ J}}{60000 \text{ N}} = 0.123 \text{ m} \quad (1.3)$$

Ritornando nuovamente alla forza precedentemente calcolata, nota la massa in caduta libera, è possibile calcolare la decelerazione media della massa battente, primo parametro critico per il regolamento FSAE. Nel caso dell'assorbitore realizzato in honeycomb con le precedenti specifiche si ottiene una decelerazione come di seguito:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{60000}{300} = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{200}{9.81 \text{ g}} = 20.38 \text{ g} \quad (1.4)$$

Con tale considerazione è possibile comprendere che la forza che oppone la struttura deve essere significativa a sufficienza per assorbire tutta l'energia ma non tale da provocare una decelerazione media superiore ai 20g.



Figura 1.1 Immagini che ritraggono la caduta della massa sull'assorbitore realizzato in Honeycomb della stagione 2019-2020.

A seguito della prova sperimentale eseguita in torre di caduta si sono ottenute le seguenti deformazioni in termini di IA e AIP. Mentre per l'IA era scontato che lavorasse in compressione pura e che quindi tendesse a deformarsi fino alla compattazione equivalente alla quota parte di energia di deformazione plastica che ha assorbito durante l'urto si può notare, dalla figura di destra, che anche il piatto in materiale composito si è deformato plasticamente in maniera irreversibile. Tale aspetto vuole sottolineare che la struttura a nido d'ape non è a tal punto cedevole da far lavorare l'AIP in maniera completamente elastica.



Figura 1.2 Impact attenuator post crush a sinistra e AIP a destra, deformato plasticamente. Stagione 2019-2020.

1.1.2 Assorbitore d'urto: stagione 2020-2021

A differenza del caso precedente, durante questa stagione si è avviata la progettazione dell'assorbitore d'urto in materiale composito e pertanto la forza opposta all'avanzamento della massa dalla sezione resistente, nel caso di materiale composito, è funzione della distanza z dal punto di contatto tra la massa e l'assorbitore.

In particolare, di seguito è rappresentata la forza che il componente esibisce ad una certa distanza dal punto di contatto.

$$F_{\text{comp}} = s(z) \times t(z) \times p(z) \times K \quad (1.5)$$

Dove $s(z)$ è la tensione del limite elastico del laminato lungo la coordinata z , t lo spessore del laminato anch'esso funzione di z e p invece il perimetro della sezione che si oppone all'avanzamento della massa ed anche quest'ultimo funzione di z . K , invece, viene definito come fattore di correlazione, ed è funzione dell'angolo di incidenza del laminato con la verticale e dalla rigidezza allo scorrimento relativo fra le facce che, nel caso di honeycomb di alluminio è basso, circa 0.2.

Per la realizzazione dell'assorbitore si è utilizzato come materiale non honeycomb di alluminio bensì honeycomb nomex 3.0 (per il quale il coefficiente di correlazione scelto è pari a 0.2) con spessore di 15 mm, sufficiente a garantire una buona rigidezza flessionale delle pareti ma con peso abbastanza contenuto. Successivamente si è fatto uso di materiale Carbon Kevlar fabric, 2020-38%-CK2X2T-256-1000 ed il layup del musetto è di semplice realizzazione in quanto si tratta di due pelli orientate a 0° e 45° su tutta la parete verticale per lato della struttura sandwich. Alla base si è aggiunta una pelle di rinforzo a 0° ed una pelle sul tetto. Pertanto, il layup utilizzato è uguale a quello seguente:

- La prima pelle ricopre l'intera superficie ed è orientata con un angolo di 45° con riferimento alla direzione verticale;
- La seconda pelle viene poggiata sull'intera superficie nuovamente ma ha un'orientazione di 0° con la direzione verticale;
- La terza pelle è alta 50 mm in altezza e costituisce solamente un rinforzo alla base orientato a 0° con la direzione verticale.

Per la parte di manufacturing si riportando di seguito i passaggi fondamentali del processo di realizzazione:

- Realizzazione degli stampi [Figura 1.3.];
- Laminazione dello stampo [Figura 1.4.];
- Deposito di un film di adesivo per assicurare un collegamento tra il primo layer ed il core in honeycomb;
- Aggiunta di honeycomb nomex di spessore pari a 15 mm [Figura 1.5.];
- Successivo riempimento con nuovo film di adesivo [Figura 1.6.];
- Laminazione del secondo layer composito [Figura 1.7.];
- Aggiunta del controstampo o secondo stampo. [Figura 1.7.];
- Processo termico di cura [Figura 1.7.];
- Estrazione dallo stampo [Figura 1.7.].

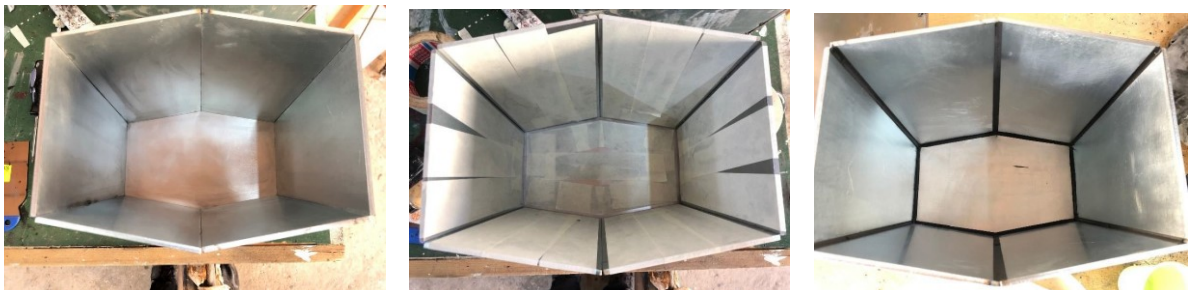


Figura 1.3 Realizzazione dello stampo con conseguente mascheratura e riempimento.

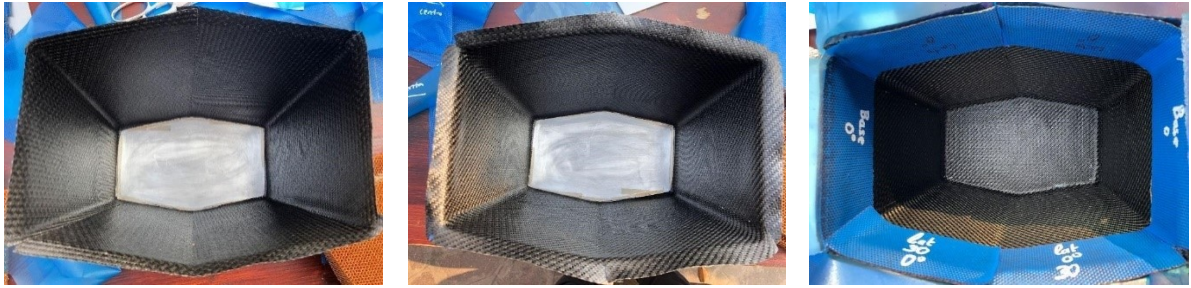


Figura 1.4 Sequenza di laminazione dell'assorbitore secondo layup 0-45°.

A seguito dell'applicazione del film di adesivo per garantire un'adesione tra le pelli del composito ed il core di honeycomb, si è aggiunto il core di nomex opportunamente cianfrinato al fine di garantire una buona adesione con il film di adesivo, tipologia MTA240B.

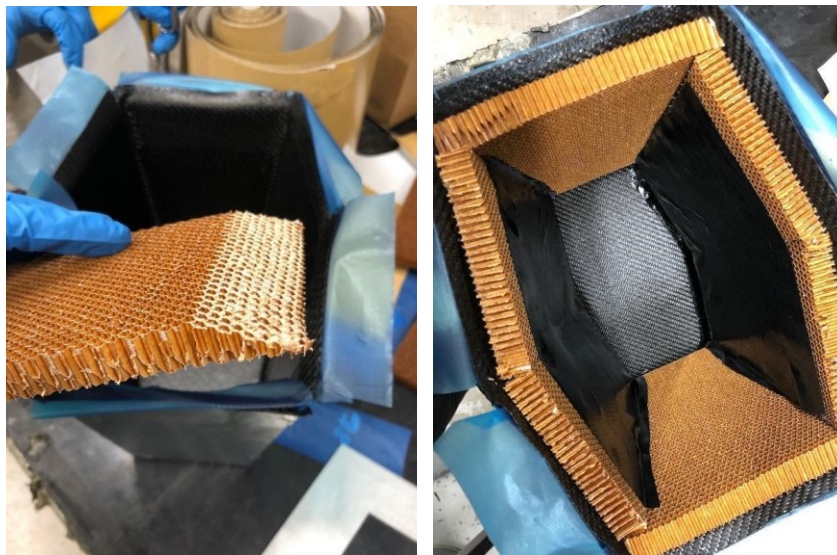


Figura 1.5 Cianfratura e deposizione honeycomb nomex.

Dopo l'applicazione del nomex si è proceduto con la deposizione di un nuovo film di adesivo ed il secondo layer del laminato composito. Questo secondo layer di fatto è essenzialmente simmetrico rispetto al core.



Figura 1.6 Applicazione secondo film di adesivo e seconda laminazione effettuata.



Figura 1.7 Da sinistra verso destra, posizionamento del controstampo, processo di cura ed estrazione finale.

Con riferimento a quanto sopra riportato, sono state eseguite prove sperimentali di drop test su tale assorbitore ed i risultati ottenuti sono stati i seguenti, con le seguenti precisazioni: l'impatto non è avvenuto con una velocità di 7 m/s perché la massa non cade da un'altezza di 2.45m bensì da un'altezza di 1.6m. Pertanto, l'energia complessivamente assorbita anziché essere pari a 7350 J è pari a 4850J.

Le curve sperimentali di riferimento sono però le seguenti:

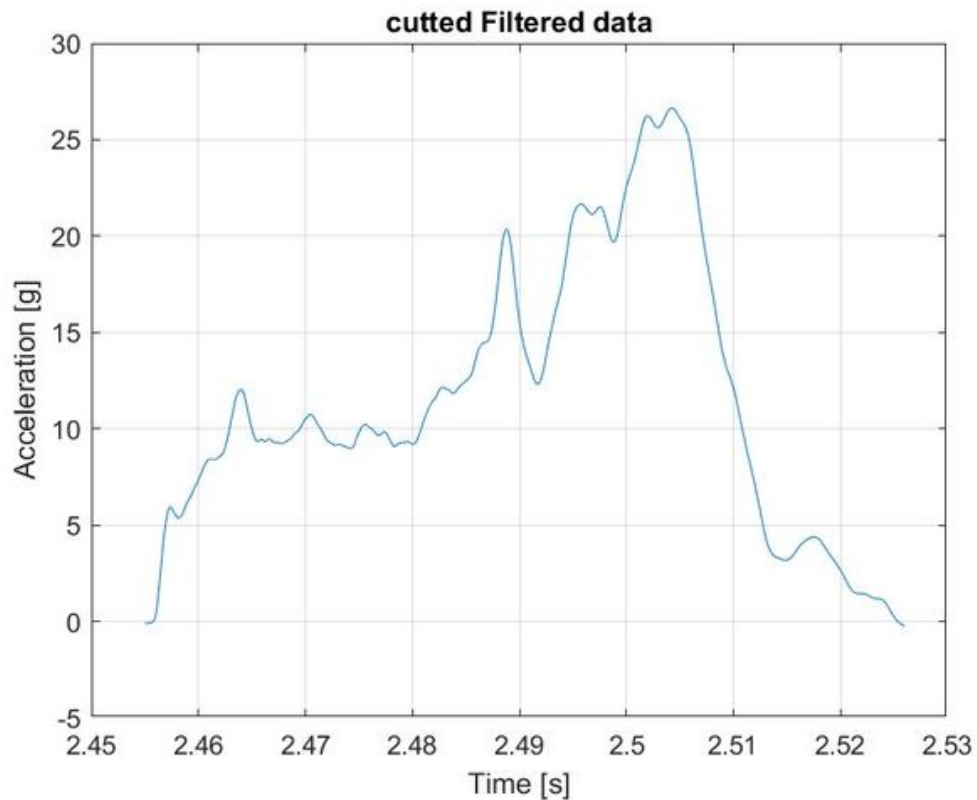


Figura 1.8 Dati sperimentali ottenuti con accelerometro montato in torre di caduta sulla massa battente in caduta libera sull'assorbitore.

CAPITOLO 2

Danneggiamento materiali compositi

Il miglioramento della capacità di assorbimento degli urti, soprattutto nell'ambito automotive, ha subito una grande spinta negli ultimi anni sempre nel rispetto dei vincoli imposti dalla fisica di un crash, di qualunque tipologia esso sia. Infatti, nel caso in cui siano permesse soltanto piccole deformazioni allora devono essere accettate ingenti momenti e forze di trasferimento. Viceversa, nel caso in cui si manifestino grandi deformazioni deve essere comunque garantito un volume minimo di integrità strutturale per tutelare la salute del guidatore.

Il parametro fisico che va tenuto sotto controllo durante la dinamica di un crash consiste nell'energia assorbita durante l'urto che, a seconda del materiale, può variare in maniera consistente. Ad esempio, la differenza tra un acciaio o polimero ed una struttura in composito consiste principalmente nel meccanismo di danneggiamento che caratterizza i materiali compositi come la rottura della matrice, rottura delle fibre (head o microbuckling failure) o scollamento relativo di fibra e matrice piuttosto che la delaminazione tra i diversi layers della struttura composita.

Il test sperimentale, a conferma del modello numerico che verrà analizzato in questa tesi è quello con carico assiale. Infatti, quest'ultimo è sperimentalmente verificato essere la tipologia di crash maggiormente efficiente in termini di design. Questo non deve però giustificare una mancata verifica sul comportamento flessionale di un composito a parete sottile la cui mancata considerazione potrebbe portare, come si vedrà nel seguito, ad una sottostima del picco di decelerazione dovuto al fatto che il carico flessionale ricopre un ruolo contrapposto alla resistenza assiale dell'assorbitore stesso.

2 SEA: Definizione

Diversi studi, finalizzati all'esaminazione delle capacità di assorbimento dell'energia dei materiali compositi, sono stati eseguiti con riferimento al crash assiale di componenti realizzati in materiale composito e caratterizzati da spessori delle pareti ridotte, in quanto questo design sembrerebbe essere quello più efficiente nelle simulazioni a crash del composito.

Indipendentemente dal tipo di prova che si analizza, sia essa impulsiva che quasi statica, l'energia assorbita dal composito viene misurata sempre come l'area sottesa dalla curva carico contro spostamento. Pertanto, l'integrale della curva nello spostamento fornisce il valore dell'energia totale accumulata dall'assorbitore durante la sua deformazione.

Per energia totale si intende la somma dell'energia elastica che l'assorbitore accumula ma che poi restituisce alla massa in caduta libera e l'energia di deformazione plastica, ossia quel contributo dominante dell'energia, che porta al danneggiamento progressivo del materiale composito con conseguenti meccanismi di danneggiamento che nel seguito vengono spiegati con maggiore dettaglio.

Inizialmente, la parete dell'assorbitore lavora elasticamente ed il carico cresce fino al suo valore massimo e solo successivamente cala bruscamente. Il valore del picco sarà funzione della geometria del componente e chiaramente del layup utilizzato per la laminazione. In particolare, per componenti compositi in parete sottile, il comportamento a frattura delle pareti condiziona la stabilità al carico, così come l'entità del carico e l'energia totale assorbita durante la fase di crushing.

Soprattutto nel campo automotive, la capacità delle strutture di assorbire energia viene descritta in termini di energia specifica assorbita (SEA); nello specifico si analizzerà tale aspetto comparando l'energia assorbita con riferimento all'energia di impatto. L'andamento della curva è strettamente correlato, come si vedrà nel seguito, ai meccanismi di danneggiamento che il composito subisce durante l'impatto.

Il progressivo danneggiamento, come precedentemente accennato, è incipiente da una condizione di quasi completa assenza dei meccanismi di danneggiamento per poi proseguire attraverso una condizione in cui si avrà delaminazione tra le lamine fino ad una rottura delle fibre. Un'osservazione

importante da fare è che tale valore di energia assorbita non è in alcun modo un indicatore assoluto del comportamento a rottura del composito in quanto, anche a parità di materiale, la capacità dello stesso di assorbire energia può differire di molto a seconda dello spessore del laminato così come del materiale opportunamente combinato in layup differenziati; si tratta cioè di una funzione di materiale, spessore e layup.

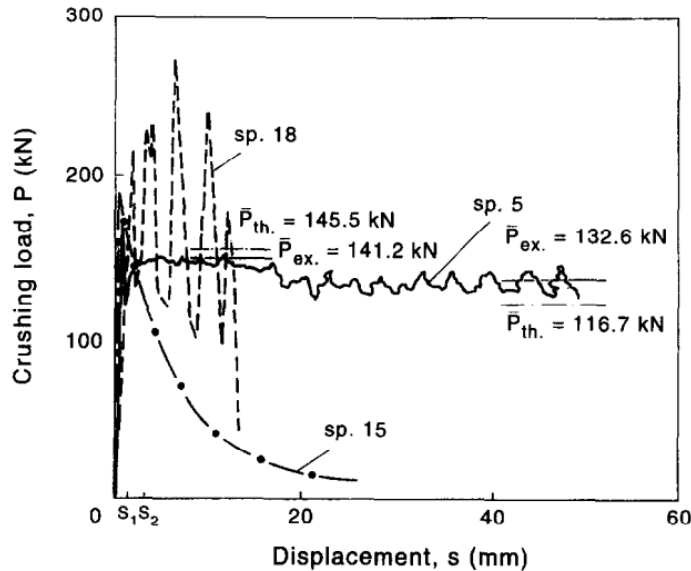


Figura 2.1 Grafico di carico di rottura contro lo spostamento della massa in caduta al variare dei diversi tubi in parete sottile utilizzati da Mamalis per la caratterizzazione sperimentale. [1]

Come è possibile notare dalla figura precedente, rappresentativa della curva carico contro deformazione, la parte finale della prova, condotta in condizioni quasi statiche, presenta una serie di picchi e valli di carico alternate rappresentative dei fenomeni microscopici che avvengono durante il danneggiamento.

2.1 SEA: caratterizzazione e discussione curva di carico

Solitamente, il diagramma ricavato sperimentalmente da un test di impatto viene definito come una curva che rappresenta la forza nel tempo. Tale grafico, è noto come curva di carico della prova di impatto. Nel seguito, si riporta la curva di carico di un materiale composito, come riportata in [2], confrontandola con la curva numerica ottenuta modellando il modello dell'assorbitore della vettura di Formula SAE della stagione 2023-2024.

Si può notare dal confronto delle curve che l'andamento qualitativo delle fa presagire una potenziale correttezza del modello almeno per quella che è la fisica del problema. Si rimanda al capitolo 5 per la descrizione analitico-sperimentale delle curve nella loro interezza.

Considerando la breve durata del fenomeno di danneggiamento del composito corrisposto ad una massa che si muove ad una velocità di circa 7 m/s (nella realtà sperimentale di cui si vanno a rielaborare i dati si tratta di una velocità di impatto di 6.76 m/s) l'asse delle ascisse è espresso in millisecondi (ms) anziché in secondi (s).

A titolo anticipatorio, si introduce che la durata dell'urto nel caso dell'assorbitore Formula SAE, oggetto della presente trattazione, ha una durata complessiva, considerando anche il ritorno elastico del materiale e quindi la leggera risalita della massa battente, di circa 50 ms.

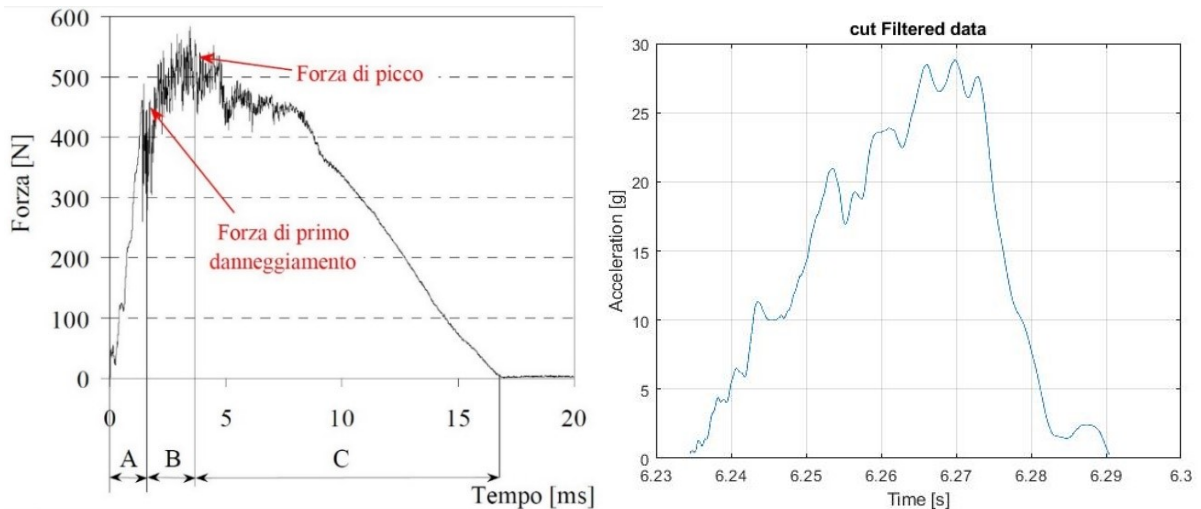


Figura 2.2 Confronto tra il grafico di forza contro tempo derivante dal drop test eseguito su provini opportunamente preparati secondo normativa [2] ed analogo grafico relativo ai dati sperimentali raccolti in torre di caduta presso l'azienda ospitante OZ S.p.a.

L'osservazione da effettuare consiste nel fatto che la scala dei tempi in ascissa del grafico sperimentale deve essere traslata di un valore pari all'estremo inferiore dell'intervallo di campionamento scelto in modo tale da far coincidere lo zero del grafico con l'origine degli assi. Inoltre, anche qui, come di seguito, si dovrà considerare un fattore di scala delle ordinate pari alla massa dell'impatto.

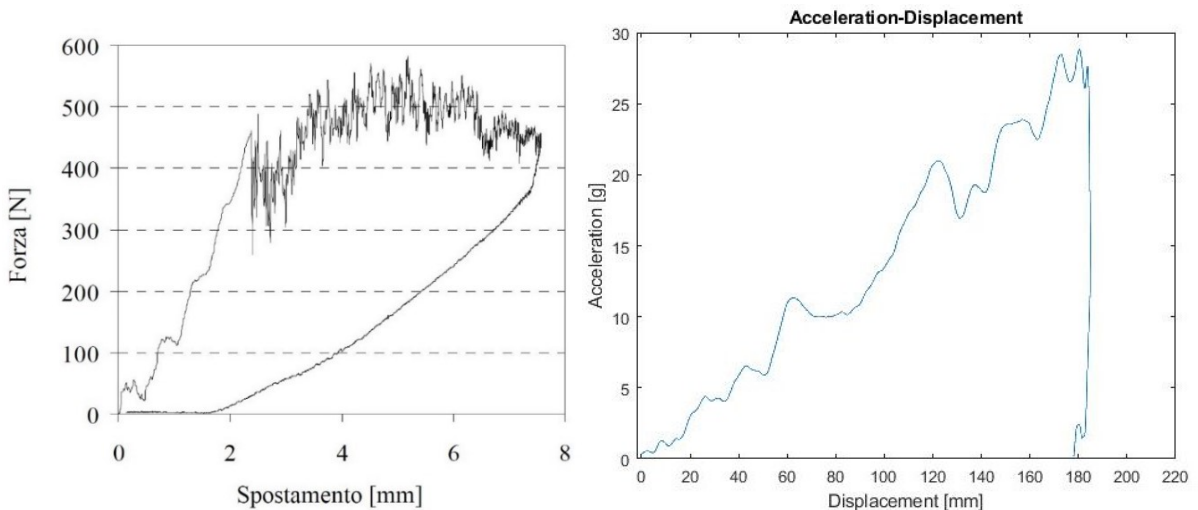


Figura 2.3 Confronto tra il grafico di forza contro spostamento della massa battente nel caso di drop test su provini normati ed analogo grafico relativo ai dati sperimentali raccolti in torre di caduta presso l'azienda ospitante OZ S.p.a.

Nel capitolo 5 si avrà modo di approfondire la tematica riguardante l'intervallo scelto per il campionamento dei dati derivanti dall'accelerometro, intanto quello che si vuole esprimere è il confronto tra i due grafici: vi è chiaramente un effetto scala da applicare in quanto il grafico di sinistra è espresso in [N] mentre quello di destra in accelerazione [g]. Nel caso in oggetto ci sarà da applicare al grafico di destra un fattore scala pari alla massa del barilotto ovvero 300 Kg.

Ad ogni modo, si può osservare come anche se il campionamento è tale da non garantire un ritorno a zero in termini di deformazione si può evincere che anche nel caso in trattazione si dispone di una curva forza-deformazione che descrive un'area chiusa, il cui integrale è esattamente l'energia assorbita.

Dalla curva riportata in Figura 2.2. si possono individuare due valori fondamentali:

- Il primo è la forza di primo danneggiamento;
- Il secondo consiste nella forza massima o forza di picco.

Come nel caso che verrà trattato in questa tesi, la curva è rappresentativa del caso di impatto senza perforazione.

Al di là dei valori massimi, si possono identificare tre zone. La prima zona è rappresentativa delle perturbazioni dinamiche dovute al fenomeno vibratorio ossia alle frequenze proprie del componente durante la dinamica dell'impatto tra assorbitore e massa in caduta. In questa prima fase, si può considerare il comportamento del materiale lineare elastico e l'intervallo di tempo come un transitorio di breve durata.

Al termine del primo tratto (A), si nota una variazione del comportamento dalla linearità che guida verso il valore corrispondente al limite di elasticità definito come "yield force". Si può notare che nel momento in cui si raggiunge tale valore di forza si ha un significativo calo della forza nella curva di carico a cui compete il cedimento iniziale del materiale. In corrispondenza di tale istante non è possibile definire con certezza la causa del meccanismo di primo cedimento, sia esso dovuto alle tensioni interlaminari che generano delaminazione e sia esso dovuto alla rottura delle fibre che si verifica attorno alla zona di contatto tra quello che è il materiale e chiaramente l'impattore quale massa battente nel caso in oggetto.

Nella seconda zona (B), la velocità di crescita del carico è sempre più lenta ed è accompagnata da diverse perturbazione dell'output dell'accelerometro e quindi della forza stessa a causa della formazione delle cricche interne al materiale e successivamente il propagarsi della delaminazione [2].

Nell'ultimo tratto (C) invece si nota come la curva presenti una decrescita significativa della forza. Nel caso di successivo rimbalzo della massa battente, così come accade nel caso dell'assorbitore Formula SAE di entrambe le stagioni in trattazione, le delaminazioni si bloccano senza portare ad una rottura completa del materiale. In tal caso, una volta che è stata dissipata tutta l'energia cinetica della massa battente, l'assorbitore è in grado di generare una forza di reazione a seguito dell'energia elastica, quota parte dell'energia totale accumulata, che ha assorbito durante la fase di caricamento.

È importante comprendere quale sia il quantitativo di energia che l'assorbitore è in grado di assorbire. A tal fine si può considerare la curva di carico modificata ossia quella che presenta in ascissa la posizione della massa battente anziché il tempo. Si osserva in tal caso in figura 2.3, così come in figura 2.4 (ottenuta dall'analisi dei dati sperimentali della prova sperimentale dell'assorbitore FSAE), come la forza aumenta progressivamente con lo spostamento fino a raggiungere un picco di forza massima laddove il percussore inverte il suo moto.

Particolare attenzione va posta nella fase di scarico per la quale la forza decresce fino ad annullarsi senza però percorrere un tratto di curva uguale a quello di carico. Pertanto, come visibile dalla figura 2.3, la curva descrive un ciclo chiuso ove l'aria sottesa dalla curva è proprio l'energia assorbita dal materiale e dissipata per mezzo dei diversi meccanismi di danneggiamento che vanno caratterizzando il failure del composito.

Dal momento che risulta particolarmente importante conoscere come viene accumulata ed eventualmente ridistribuita tale energia, si ritiene doveroso chiarire che i contributi energetici possono essere di due tipologie differenti:

- Energia di deformazione elastica;
- Energia dissipata per danneggiamento.

La prima risulta essere una grandezza conservativa e quindi, a seguito della rimozione del carico, si rende nuovamente disponibile all'ambiente tale energia mentre invece il secondo contributo è significativo della quota parte di energia che si spende in irreversibilità del processo. Di seguito viene riportata la figura 2.5 nella quale si vuole esprimere l'andamento dell'energia.

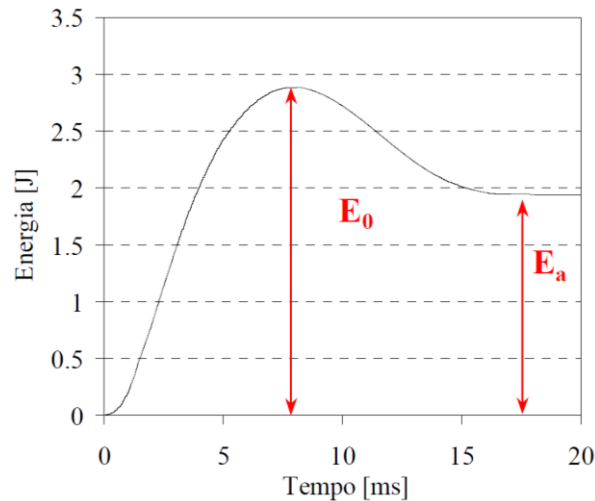


Figura 2.4 Grafico dell'energia nel tempo derivante da prove di drop test su provini opportunamente curati secondo normativa [2].

Come è possibile osservare, non appena la massa battente è in contatto con l'assorbitore si ha un iniziale accumulo di energia fornita dallo stesso. Tale acquisizione di energia prosegue fino al raggiungimento della massima deformazione. In tal caso, l'impattore si arresta e l'energia dell'impatto è completamente ceduta all'assorbitore che oltre alla deformazione elastica ha subito un considerevole danneggiamento. Successivamente, l'assorbitore restituisce all'impattore l'energia elastica accumulata riconvertendola in energia gravitazionale e cinetica. In tal caso la curva dell'energia nel tempo decresce fino ad attestarsi intorno ad un valore costante E_a .

Tale quota di energia è esattamente quella che il componente ha assorbito.

Per caratterizzare sperimentalmente i materiali, soprattutto quelli compositi, è importante definire non solo l'energia a cui si stabilizza la curva dell'energia nel tempo ma anche l'energia E_i ossia l'energia di primo cedimento che si manifesta in corrispondenza dell'istante temporale in cui il segnale di forza presenta una prima importante deviazione della simil-linearità.

2.1.1 SEA: Fattori di influenza

Dal momento che si è ora in grado di definire l'energia accumulata dall'assorbitore, si procede con la definizione dei diversi fattori che la influenzano:

- 1) **Materiale:** è necessario definire le proprietà meccaniche del materiale utilizzato, attraverso opportune prove normate, al fine di comprendere la risposta del composito all'interno di un determinato range di carico. Soprattutto per i materiali compositi, quando si parla di materiale come fattore di influenza, si intende precisamente l'insieme di fibra e matrice nella loro sinergia atta a formare il laminato, solamente dopo aver definito la sequenza di laminazione da utilizzare. Infatti, il contenuto di fibra, il diametro della fibra e la relativa lunghezza, così come la compatibilità di fibra e matrice con le relative proprietà meccaniche, giocano un ruolo fondamentale per la determinazione del SEA.

- **Materiale di fibra e matrice:** Farley [15] riporta che le capacità di assorbimento dell'energia di un tubo realizzato in materiale composito è molto dipendente dalla deformazione a rottura sia della matrice che delle fibre. Questo aspetto ritornerà utile nel momento in cui sarà necessario definire, tramite la formulazione di Crasurv, il materiale del modello numerico.

È noto, inoltre, che per raggiungere il massimo valore di assorbimento dell'energia di una fibra è bene avere nel composito una deformazione a rottura più alta per la matrice rispetto a quella della fibra essendo quest'ultima più fragile.

- Design di laminazione (layup): Farley [8] riporta che le capacità di assorbimento dell'energia variano al variare della sequenza di laminazione. In particolare, si è osservato, in prove quasi statiche, che l'energia assorbita subisce una diminuzione netta nel caso di orientazioni di laminazione per angoli compresi tra 0° e 45° all'aumentare dell'angolo di off-axis. Di contro, nel caso in cui si analizzino provini con angolo di off-axis che va tra 45° e 90° si nota un incremento dell'energia assorbita all'aumentare dell'angolo di off-axis.
- Geometria: Tubi quadrati e circolari hanno un comportamento differente nei confronti dell'accumulo di energia durante il crash. Infatti, è possibile notare che la capacità di assorbire energia è una funzione non lineare dell'aspect ratio ossia il rapporto tra il diametro del tubo e lo spessore della parete dello stesso.

2) Condizioni di carico:

- Carico assiale: la dipendenza dalla velocità di caduta è collegata al meccanismo di cedimento che controlla il progressivo danneggiamento. Se il meccanismo del progressivo danneggiamento è funzione della velocità di deformazione (strain rate) allora l'energia assorbita sarà funzione della velocità di rottura (crushing speed).

Inoltre, il coefficiente di attrito tra le differenti superfici di strisciamento può generare delle variazioni, anche significative, della velocità di danneggiamento. È importante sottolineare che è possibile che nelle strutture reali il modo di rottura possa essere molto differente tra un test dinamico ed uno quasi statico. Infatti, come riporta Savage [13], in merito ad uno studio riguardante il musetto strutturale di una vettura di Formula 1, il meccanismo di cedimento prevalente per una prova condotta in maniera quasi statica, è quello del buckling delle pelli di composito anziché il progressivo danneggiamento come descritto da Mamalis. Questo è anche uno dei motivi della presente trattazione ovvero quello di evitare di utilizzare dati statici per determinare il comportamento dinamico del composito e quindi tutti i parametri ad esso correlati. A tal fine si vuole arrivare al termine dell'elaborato, con un modello numerico correlato ai dati sperimentali in modo da catturare il meccanismo di cedimento corretto per la condizione di carico dinamico anziché statico.

- Carico flessionale: Mamalis et al. riportano in [12,32,28] il comportamento che i tubi in parete sottile, realizzati in materiale composito rinforzati con fibre di vetro, presentano al variare delle differenti geometrie e modalità di clampaggio. Quest'ultimo infatti avviene ad una delle due estremità del provino e dall'altra viene applicato un momento flettente. I meccanismi di cedimento che si hanno nel caso di flessione sono ben diversi, come consultabile in [3], rispetto a quelli riscontrati nel caso di pura compressione assiale. Inoltre, si deve considerare attentamente il modo attraverso cui si va afferrando il provino in quanto questo ha un'importante riflesso sull'energia che il provino è in grado di assorbire così come la propagazione della cricca. Chiaramente, aumentando lo spessore della parete sottile del provino aumenta la capacità dello stesso di assorbire energia così come la propagazione stessa della cricca. Un aspetto interessante invece riguarda le zone maggiormente caricate: la parte della parete che è soggetta a compressione soffre maggiormente il danneggiamento rispetto a quella posta in trazione.

Una volta raggiunto il valore massimo della tensione di rottura, ciò che accade è che se la tensione di compressione che insiste sullo spigolo dell'elemento è tale da generare, in corrispondenza dello spigolo stesso, la separazione del materiale allora si arriva ad una condizione di completa perdita di resistenza flessionale da parte della parete. Di riflesso si avrà una diminuzione dell'energia che può complessivamente essere assorbita.

- Carico combinato: Secondo alcuni autori in un urto come quello che si studierà in questo elaborato, ossia caratterizzato da un contatto diretto tra la faccia dell'assorbitore e la faccia della massa in caduta libera, si va incontro ad un'azione combinata di flessione e carico assiale. Questo si può evincere anche dal fatto che il componente soggetto al drop test, a seguito della rottura, presenta un danneggiamento non simmetrico pur partendo da una geometria simmetrica e da condizioni al contorno della prova che sono simmetriche.

Nel caso dell'assorbitore d'urto in trattazione non è possibile con esattezza determinare la condizione di simmetria durante l'urto tra la massa battente e l'assorbitore a differenza della simulazione numerica ove è possibile impostare l'assialsimmetria dell'urto. Si ritiene pertanto necessario chiarire la differenza tra le due tipologie di urto che possono accadere nel caso reale: l'urto angolato e l'urto off-axis. Per quanto riguarda il primo si tratta di un urto che avviene lateralmente rispetto alla direzione longitudinale dell'assorbitore e pertanto poco probabile, mentre la seconda tipologia riguarda l'urto che può avvenire prossimamente alla direzione longitudinale ma con un certo angolo di off-axis rispetto alla direzione longitudinale. Quest'ultimo coinvolge un attrito di tipo dinamico mentre quello angolato principalmente un attrito di tipo statico. Inoltre, tanto maggiore è l'angolo di off-axis e tanto minore sarà l'energia assorbita durante l'urto. In generale, si può concludere che l'urto off-axis garantisce un assorbimento energetico inferiore rispetto a quello angolare e pertanto, indipendentemente dalla condizione di carico verificatasi, si è comunque in condizioni di sicurezza nel considerare un attrito dinamico anziché statico.

3) Meccanismi di danneggiamento: alcuni meccanismi di danneggiamento, infatti, assorbono più energia di altri. Di seguito una serie di meccanismi possibili, alcuni di questi verranno trattati nel dettaglio nel presente elaborato.

- Propagazione della cricca;
- Flessione dei petali;
- Splitting fra i petali;
- Danno per flessione nelle fibre dove è massimo il momento flettente;
- Attrito per slittamento fra laminati adiacenti;
- Attrito per la penetrazione del cuneo nel laminato.

I meccanismi di cedimento vengono suddivisi in base alla loro appartenenza: macroscopici o microscopici.

Prima di iniziare la trattazione riguardante i meccanismi di cedimento si prosegue nella trattazione dell'assorbimento dell'energia durante il danneggiamento progressivo di un materiale composito laminato. In particolare, come riportato in [2] nella progettazione di un assorbitore d'urto si possono seguire due percorsi differenti: il primo, viene definito come una progettazione finalizzata alla resistenza al danneggiamento per impatto mentre il secondo come sola resistenza ad impatto. Per il primo si intende la capacità che il composito ha di resistere ad un impatto senza annullare completamente le prestazioni strutturali del componente strutturale stesso, mentre per la seconda si intende la capacità che l'assorbitore ha di assorbire un determinato livello di energia opportunamente prestabilito che, nel caso in trattazione, corrisponde a 7350 J [3] senza nessuna richiesta sulla capacità di carico residuo seppur evitando il completo folding del componente. La trattazione in essere considera questo secondo meccanismo di cedimento dove non vi è alcun riferimento in merito alle caratteristiche strutturali residue a seguito dell'impatto.

Nel caso scelto come riferimento applicativo e che viene utilizzato come principio fisico da imitare nella progettazione e successiva validazione dell'assorbitore, si vanno considerando due differenti materiali con orientazioni e sequenze di impilaggio delle lamine diverse che, per brevità, ivi non vengono riportate ma che possono essere consultate in [2, pag.3].

2.2 Meccanismi di cedimento e risposta meccanica

I materiali compositi, a causa della loro natura fragile sia delle fibre che delle resine, assicurano un comportamento differente rispetto ai metalli in quanto non si identifica un comportamento plastico vero e proprio ma piuttosto un comportamento caratterizzato da un meccanismo di cedimento dominante quale frattura e frammentazione i cui parametri di influenza sono stati già precedentemente descritti.

2.2.1 Meccanismi di cedimento macroscopici: Carico assiale

Mamalis et Al. definiscono tre modi di danneggiamento principali, sperimentalmente riscontrati.

- 1) **Modo I:** è caratterizzato dal massimo quantitativo di energia assorbita. Esso è simile al metodo di danneggiamento di tubi circolari in parete sottile dove il cedimento è caratterizzato dalla formazione di fronde di composito che si aprono sia verso l'interno che verso l'esterno. In tal modo, la propagazione è caratterizzata dalla formazione di un numero considerevole di separazioni assiali delle pareti, in particolare dalla parte esterna. Tale meccanismo di cedimento verrà successivamente approfondito in quanto è considerato quello rappresentativo dell'assorbitore analizzato nella presente trattazione;
- 2) **Modo II:** il comportamento fragile del composito comporta una rottura catastrofica del composito con poca energia assorbita. In particolare, la cricca propaga in maniera spiraliforme o longitudinale lungo tutta la circonferenza della parete ed allo stesso tempo la formazione di cricche "angolari" che propagano longitudinalmente;
- 3) **Modo III:** si generano cricche nella stessa maniera del modo II con la differenza della sola distanza da cui questa cricca circonferenziale propaga. Infatti, per questo modo di danneggiamento, la cricca propaga da un'altezza pari alla metà della parete. La separazione della parete risulta essere guidata da onde irregolari.
- 4) **Modo IV:** il danneggiamento progressivo simile al comportamento a crush dei tubi plastici e metallici è caratterizzato da un'energia assorbita che è molto bassa.

2.2.2 Meccanismi di cedimento macroscopici: Carico flessionale

Mamalis et Al. hanno analizzato il comportamento a flessione di tubi in parete sottile ed hanno evidenziato due regioni con differenti caratteristiche macroscopiche; una zona superiore soggetta ad un carico di compressione ed una inferiore soggetta invece a trazione. In generale il collasso strutturale inizia in corrispondenza della zona soggetta a compressione, in corrispondenza della zona di fissaggio. Nei pressi di quest'ultima, la resistenza è dominata principalmente dalla stabilità a buckling delle fibre. Nella zona invece soggetta a trazione, il danneggiamento inizia e propaga verso zone ad alto livello di stress. La frattura vera e propria la si raggiunge nel momento in cui le fibre nella direzione di carico raggiungono la loro tensione di rottura. Il fenomeno è pertanto fiber-dominated.

Si osservi anche come, date le fibre orientate nella direzione del carico che raggiungono carichi prossimi alla loro tensione di rottura, parte del carico assiale si distribuisca trasversalmente generando degli sforzi di taglio che, non essendo la fibra a suo sostegno, generano delle cricche trasversali lungo la matrice.

È inoltre importante sottolineare come una transizione il più piatta possibile tra la zona di compressione e quella di trazione ricopra un ruolo fondamentale nella progettazione dell'assorbitore, proprio per la motivazione precedentemente fornita.

2.2.3 Meccanismi di cedimento microscopici: Carico assiale

Questo meccanismo verrà particolarmente analizzato nella presente trattazione in quanto si ritiene simile al cedimento strutturale delle pareti dell'assorbitore.

Il cedimento dei materiali compositi, a livello microscopico, acquisisce un'accezione molto particolarizzata al caso in esame. La definizione di cedimento, infatti, in alcune applicazioni coincide con deformazioni molto piccole mentre in altre circostanze la separazione del componente in due coincide con la frattura. In generale, il cedimento microstrutturale interno dei materiali compositi inizia ben prima del cambio delle proprietà macrostrutturali apprezzabili fisicamente. Infatti, alcuni fenomeni interni precedono tali fenomeni: rottura delle fibre, microcricche che si innestano all'interno della matrice, separazioni delle fibre dalla matrice nella forma di debonding e di pull-out, separazione delle lamine a causa dei tagli interlaminari (delaminazione fisica del composito). È possibile riscontrare macroscopicamente il danneggiamento strutturale soltanto nel momento in cui il danneggiamento interno ha una frequenza sufficientemente alta.

Farley and Jones [10] riportano che la risposta del tubo in composito a crush può essere classificata in tre modi principali:

- Taglio trasversale;
- Flessione della lamina;
- Buckling locale.

I primi due metodi sono tipici dei materiali rinforzati fibra con comportamento fragile. Gli autori sostengono che quando un carico è applicato allo spigolo del componente ciò che si verifica è un crush localizzato e si vengono a formare delle piccole cricche interlaminari e la lunghezza delle stesse determina la tipologia di cedimento strutturale. Pertanto, a seconda della lunghezza delle cricche interlaminari si parlerà di cedimento per taglio trasversale, flessione della lamina oppure una combinazione di questi (comportamento fragile). Nel caso della propagazione trasversale della cricca, la lunghezza della stessa è generalmente inferiore a quella dello spessore della parete del tubo, mentre invece la flessione della lamina è caratterizzata da cricche interlaminari, intralaminari e parallele alle fibre.

Il danneggiamento locale consiste nella formazione di fibre che localmente raggiungono la loro condizione di instabilità di punta (buckling) ad opera della deformazione plastica del materiale. L'integrità strutturale post-rottura del materiale duttile rinforzato fibra è un risultato della plasticizzazione della matrice, che ammette un'elevata deformazione senza rottura e senza separazione delle fibre. I materiali fragili rinforzati fibra esibiscono questo modo di danneggiamento quando:

- La tensione interlaminare è piccola rispetto alla resistenza della matrice;
- La matrice ha una maggiore deformazione a rottura rispetto alle fibre;
- La matrice ha un comportamento significativamente plastico sotto carichi elevati.

Il meccanismo che controlla queste differenti modalità di crushing è senz'altro la sequenza costruttiva, oltre che la tipologia di materiali utilizzati, del componente in materiale composito.

Ad esempio, nel caso della prima modalità, una "matassa" di cricche interlaminari cresce e si propaga attraverso la lamina e tra una lamina e l'altra, mentre nel caso di rottura per flessione della lamina si ha crescita e propagazione inter-intra laminare che, in aggiunta all'attrito, porta la lamina stessa alla frattura. I meccanismi che controllano invece il buckling locale della fibra sono la deformazione plastica della fibre e/o della matrice.

Con riferimento a quanto riportato da Fairfull and Hull [14] si consideri l'analisi microstrutturale eseguita durante il crushing di un tubo in materiale composito. Essendo questo un componente in parete sottile costituisce un buon riferimento per la progettazione e successivo comportamento a rottura della crashbox che si andrà analizzando nella presente trattazione.

Tornando a quanto riportato in [14] ed integrando con il documento redatto da Mamalis et al. [1], si analizzino tubi a sezione quadrata in parete sottile soggetti ad un carico assiale. I principali aspetti da sottolineare sono i seguenti:

- 1) Uno spigolo anulare di materiale composito altamente frammentato forza il tubo in direzione assiale attraverso la parete dello stesso;
- 2) In corrispondenza di questo spigolo anulare si genera, nella zona interna della parete, una microcricca che propaga a partire dalla sommità (apex tip) dello spigolo e che propaga con una velocità simile alla velocità con cui viene applicato il carico di compressione;
- 3) Due fronde continue, interne o esterne, risultanti dalla delaminazione delle plies di composito nella zona del crush si diffondono radialmente sia internamente che esternamente a partire dalla parete laterale.

- 4) Una zona molto deformata che si estende dalla cricca centrale fino allo spigolo della parete laterale mostra una combinazione di deformazione dovuta sia alla trazione che alla compressione, indistintamente.

In generale il comportamento delle fibre rinforzate dipende dalla loro orientazione. Le fibre allineate nella direzione a 0° sono poste in flessione verso l'interno e l'esterno della parete in presenza o meno della frattura compatibilmente con la loro flessibilità e gradi di vincolamento. La flessibilità delle fibre dipende anche da come risultano disposte all'interno del composito.

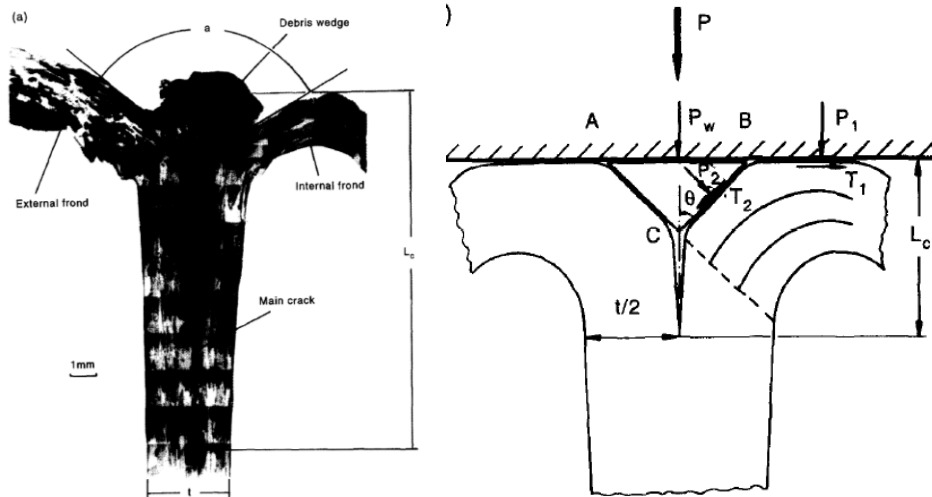


Figura 2.5 Cuneo di deformazione tratto da [1] ed analisi dinamica del danneggiamento.

Tra tutti i meccanismi di dissipazione precedentemente elencati, i due che assorbono più energia sono la forza di attrito fra il cuneo e i petali (T4) e la forza che preme (P4) la quale principalmente genera la rottura dei petali per flessione alla base.

Al fine di determinare una condizione critica alla quale vi è una rottura alla base dei petali si scrive la classica formula di Navier:

$$\sigma_c = \frac{M_f}{J} \times y_{max} \quad (2.1)$$

Nella condizione in cui la tensione σ_c raggiunge la tensione di rottura per compressione del laminato y_{max} è rappresentato dal semi-spessore di uno dei petali, avente quest'ultimo lo spessore di metà laminato, quindi:

$$y_{max} = \frac{t}{4} \quad (2.2)$$

J invece rappresenta l'inerzia flessionale di un petalo avente profondità unitaria:

$$J = \frac{\left(\frac{t}{2}\right)^3}{12} = \frac{t^3}{96} \quad (2.3)$$

Mentre il momento flettente è pari alla forza che preme P4 moltiplicata per la distanza $\frac{s_2}{2}$, ove s_2 è pari a $\frac{L_c}{\cos(a_2)}$.

Quindi considerando le precedenti equazioni si ha:

$$M_f = \frac{P_4 \times L_c}{2 \times \cos(a_2)} \quad (2.4)$$

Sostituendo nella prima equazione ed esplicitando secondo P4, forza premente si ottiene:

$$P_4 = \frac{\sigma_c \times t^2 \times \cos(a_2)}{12 \times b} \quad (2.5)$$

La forza di attrito S_4 è calcolabile come prodotto del coefficiente di attrito per il carico normale P_4 .

$$S_4 = P_4 \times \mu \quad (2.6)$$

La componente di forza (in condizioni di steady-state, chiamata (P_{ss}) che assorbe energia è pari alla somma delle due componenti verticali di P_4 e S_4 , moltiplicata per 2 dal momento che il problema è simmetrico. Tale forza va poi moltiplicata per il perimetro della sezione p :

$$P_{ss} = 2 \times p \times [P_4 \times \mu \times \cos(a_2) + P_4 \times \cos(a_2)] \quad (2.7)$$

$$P_{ss} = 2 \times (\mu \times \cos(a_2) + \sin(a_2)) \times \frac{\sigma_c \times t^2}{12 \times L_c} \times p \quad (2.8)$$

Un'ulteriore considerazione che è possibile definire è il fatto che le componenti di tensione, così come le caratteristiche geometriche (spessore e perimetro) variano lungo l'altezza e quindi saranno funzioni della coordinata z .

$$P_{ss}(z) = 2 \times (\mu \times \cos(a_2) + \sin(a_2)) \times \frac{\sigma_c(z) \times t(z)^2}{12 \times L_c(z)} \times p(z) \quad (2.9)$$

La lunghezza $L_c(z)$ solitamente si può assumere pari a $0.8t$ mentre a_2 è solitamente compreso nel seguente intervallo $[30^\circ - 40^\circ]$. Il coefficiente di attrito può essere assunto all'interno dell'intervallo $[0.55 - 0.65]$.

Il meccanismo di danneggiamento su cui ci si sofferma in questo elaborato è quello relativo al danneggiamento progressivo. Nei tubi realizzati in materiale composito la completa separazione attraverso il piano di frattura non avviene obbligatoriamente in corrispondenza della rottura. Questo aspetto risulta essere un problema in applicazioni ingegneristiche nelle quali è necessario avere un collasso del componente che sia il più controllato possibile per poter gestire l'assorbimento di elevate quantità di energia. Nel caso di tubi, al fine non avere un collasso strutturale incontrollato si sceglie di cianfrinare un'estremità in modo da indurre, lungo un'opportuna direzione di carico, la formazione e propagazione della cricca. Tanto più fragile è il materiale e tanto più questa tecnica può essere utilizzata. È possibile, infatti, osservare dal seguente grafico l'importanza della cianfrinatura sulla diversità delle curve di carico contro spostamento.

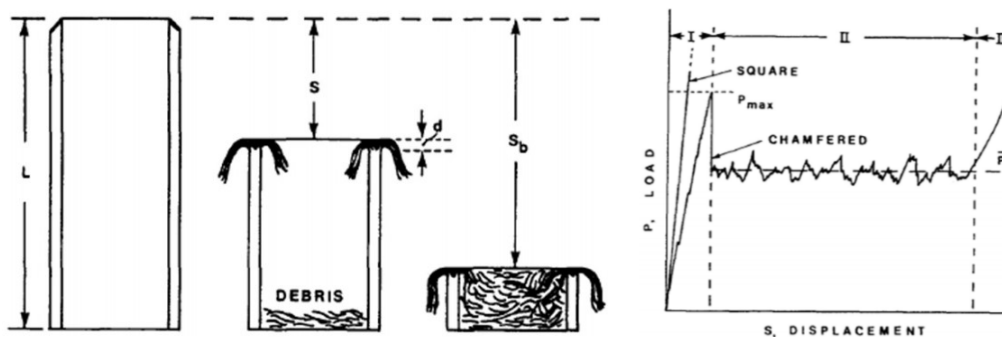


Figura 2.6 Influenza cianfrinatura rispetto al caso di un tubo a sezione quadrato non cianfrinato. [4]

La sequenza degli eventi dipende dall'angolo di cianfrinatura. Come è possibile notare, la pendenza delle due curve risulta essere differente: in particolare la pendenza della curva tensione deformazione del provino cianfrinato risulta essere meno pendente dell'altra curva lineare elastica ottenuta da provino quadrato non cianfrinato. Questo accade poiché nel primo caso si ha una frattura locale in corrispondenza dell'estremità superiore del tubo, in corrispondenza della zona cianfrinata, a partire dalla quale i detriti formati nella zona superiore potrebbero eventualmente bloccare il progressivo danneggiamento della parte interna del tubo, fino al conseguente compattamento. A seguito di quest'ultimo, il carico aumenta molto rapidamente.

Si possono verificare in tale occasione due meccanismi di danneggiamento:

1) **Splaying mode;**

Tale meccanismo può accadere, per esempio, nel caso di CFRP simmetrici orientati a 0° e 90° nel caso di tubi laminati con fibre unidirezionali. In tali casi le fibre si suddividono in una serie di fronde verso l'interno e l'esterno del tubo e la cricca, a partire dalla zona centrale della parete del tubo, va formando il cuneo di detriti, costituito da fibre rotte e resina, a partire dalla sommità del tubo durante il processo di danneggiamento.

Si rammenta che per un tubo, la direzione a 0° viene intesa quella in direzione assiale, mentre quella a 90° in direzione circonferenziale. Con riferimento a tale distinzione, le fibre possono flettere internamente o esternamente al tubo a seconda delle condizioni dello stato tensionale che subiscono: nel momento in cui le fibre assiali si ripiegano su sé stesse verso l'esterno, le fibre circonferenziali esterne sono sottoposte ad uno stato di trazione ed eventualmente raggiungono la frattura.

Allo stesso modo nel momento in cui le fibre sottoposte a carico assiale si ripiegano internamente, le fibre circonferenziali interne sono soggette ad uno stato di compressione e ciascun layer raggiunge il cedimento a seguito dell'instabilità di punta delle singole fibre oppure a seguito del taglio interlaminare.

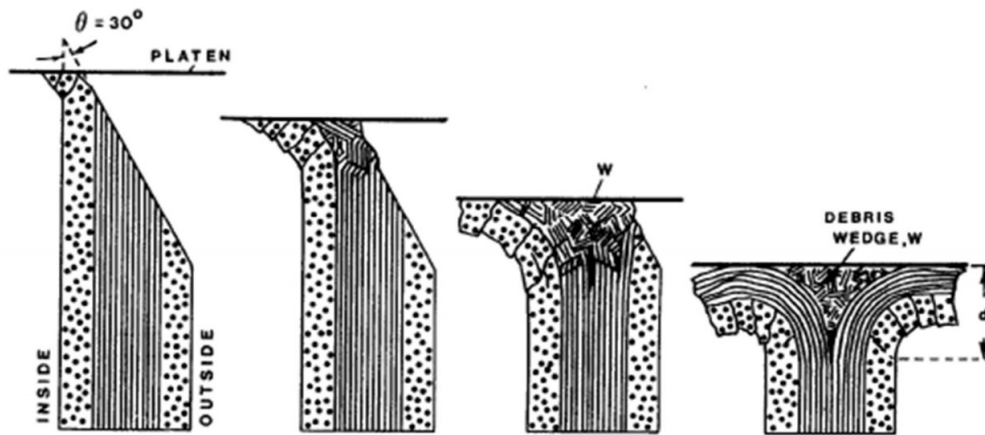


Figura 2.7 Meccanismo di cedimento per splaying mode [4].

Con riferimento al tubo in materiale composito si noti come il crush inizia nella zona maggiormente stressata, al termine della cianfrinatura, e questo porta ad una zona di crush stabile che progressivamente propaga. All'interno del capitolo 4 è stato discusso il layup della crashbox; in particolare le plies di T700 sono tutte orientate nella direzione X positiva. Questo corrisponde ad una distribuzione di fibre orientate a 0° per le quali, sotto carico assiale come quello della prova di crash, si vanno rompendo per imbarilimento (successivamente chiamato "buckling") e sollecitazioni di taglio inter-laminari normali alle fibre.

Dalla figura seguente è possibile risalire al meccanismo di danneggiamento progressivo che vede la propagazione di microfrazure incipienti dall'estremità libera cianfrinata che, accompagnate al movimento del piatto, generano degli stress di compressione parallele alle fibre che comprimono e piegano a loro volta le fibre. Il materiale fratturato si diffonde verso l'interno forzando anche il layer interno al collasso. Eventualmente lo spigolo del materiale crushato forza assialmente il materiale sia nella parte interna che esterna. Questo a sua volta provoca una microfrazure compressiva progressiva degli strati cerchiati interni e frattura da trazione degli strati cerchiati esterni che devono espandersi man mano che si genera l'allargamento.

2) Fragmentation mode;

In questo caso il progressivo danneggiamento coinvolge la formazione di frammenti nella zona di crush. Questi ultimi sono forzati verso l'interno e l'esterno del tubo prima di separarsi completamente dal muro del tubo. Di seguito viene riportata una generica sequenza di questa metodologia di failure.

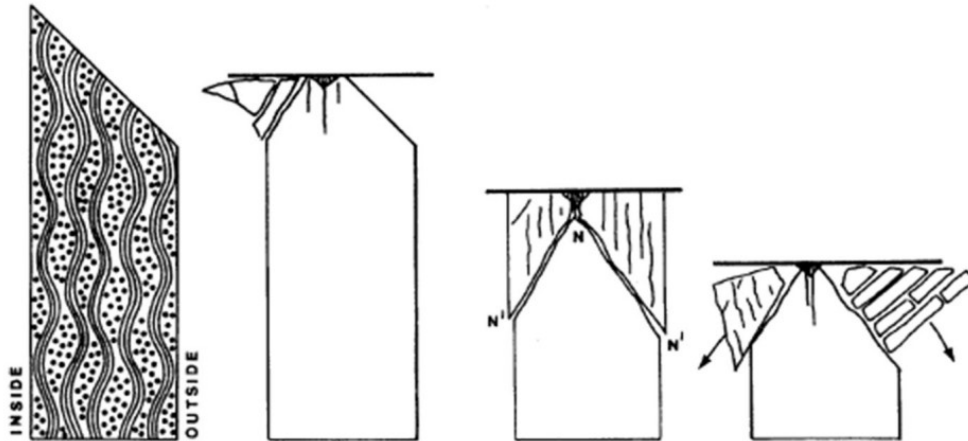


Figura 2.8 Meccanismo di cedimento per fragmentation mode [4].

Questo provino affronta un progressivo danneggiamento simile al precedente ma con un'azione di scorrimento e buckling dovuto allo stato di compressione sia per le fibre assiali che per quelle disposte in configurazione cerchiante. La frattura avviene anche nel muro del tubo parallelamente ai layers, in particolare nelle regioni ricche di resine tra le lamine del composito.

Si generano elevate tensioni di taglio a seguito del carico di compressione e questo comporta un danneggiamento a taglio lungo un piano a 30° rispetto all'asse del tubo.

È dunque chiaro che il meccanismo di cedimento è fortemente dipendente dal processo di cedimento a taglio. Ci sono diversi aspetti che concorrono alla determinazione della tipologia di differente frattura a livello microscopico; infatti, il carico di rottura può dipendere dalla configurazione del laminato, proprietà elastiche e tensioni di rottura della singola lamina. Queste ultime dipendono a loro volta dai costituenti del composito quali la matrice, la fibra e l'interfaccia fibra matrice per una certa temperatura di esercizio ed una determinata velocità di deformazione. Non per ultima, ricopre un ruolo fondamentale, la sequenza di laminazione; il layup, infatti, partecipa alla competizione tra i due meccanismi di danneggiamento precedentemente definiti.

CAPITOLO 3

Caratterizzazione sperimentale

La caratterizzazione sperimentale dei materiali adoperati nella presente trattazione è avvenuta all'interno del laboratorio di caratterizzazione sperimentale del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova. In particolare, tale caratterizzazione, è frutto dell'innesto di differenti lavori sia in ambito Formula SAE che in ambito di tesi di membri interni ed esterni al Team.

3 Caratterizzazione sperimentale CFRP: GG204 T2 IMP504 BS

Uno dei materiali che si è adottato nella presente trattazione è il GG204 T2 IMP504 BS, nel seguito T300, venduto dall'azienda Microtex s.r.l. Si tratta di un tessuto in fibra di carbonio pre-impregnato in resina epossidica. Ai fini della prova di caratterizzazione sperimentale ci si è attenuti alle normative ASTM D3039/D3039M [16] per le proprietà tensionali di trazione del composito, mentre per la determinazione delle proprietà tensionali in compressione da inserire all'interno della card del materiale, si è fatto riferimento alla normativa ASTM D3410/D3410M [17]. Infine, per quanto riguarda il comportamento a taglio, si fa riferimento alla ASTM D3518/D3518M [18].

3.1 Prova di trazione

La normativa precedentemente definita viene utilizzata per condurre indagini circa le proprietà tensionali nel piano del laminato, nel momento in cui esso è rinforzato con fibre ad alto modulo elastico (HM) ed è caratterizzato da un layup di laminazione simmetrico. Come riportato in [8] i provini utilizzati per la caratterizzazione sperimentale avevano dimensioni di 200x30x1.75 mm. Ad esse sono state incollate delle tabs per garantirne l'afferraggio in macchina con un tratto utile di 100 mm. La macchina di prova è stata utilizzata in controllo di spostamento (2mm/min) ed i relativi dati sono stati acquisiti con frequenza di campionamento di 25 Hz.

Dai grafici che successivamente vengono mostrati, è possibile ricavare il modulo elastico e la resistenza a trazione del materiale nelle due direzioni caratterizzate dalle fibre orientate a 0° e 90°.

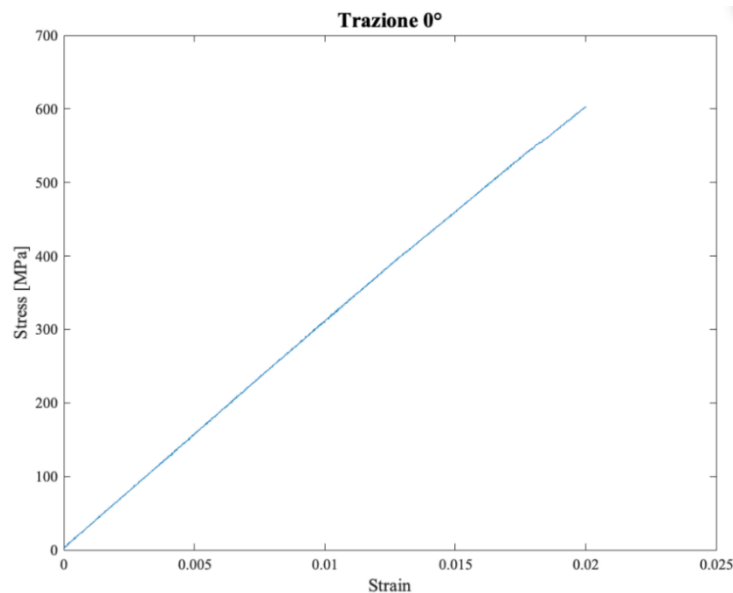


Figura 3.1 Grafico sperimentale ingegneristico tensione deformazione con fibre orientate a 0°.

La resistenza a trazione nella direzione parallela alle fibre orientate a 0° è pari a 0.603 GPa. Per brevità di trattazione si rimanda a [8] l'utilizzo delle formule classiche per la determinazione dell'Ultimate Tensile Strength (UTS), dello sforzo di tensione e delle corrispondenti deformazioni.

Per quanto riguarda invece il modulo elastico viene calcolato come rapporto tra la differenza di tensione e la differenza di deformazione e quindi si tratta della pendenza della curva tensione-deformazione.

$$E_1 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.1)$$

Il valore così ottenuto per il modulo elastico in direzione 1, con riferimento ad un intervallo di deformazioni tale da avere una buona linearità della curva, è 48.20 GPa.

Analoghe considerazioni si possono trarre per la direzione 2 ovvero quella con le fibre principalmente orientate a 90° .

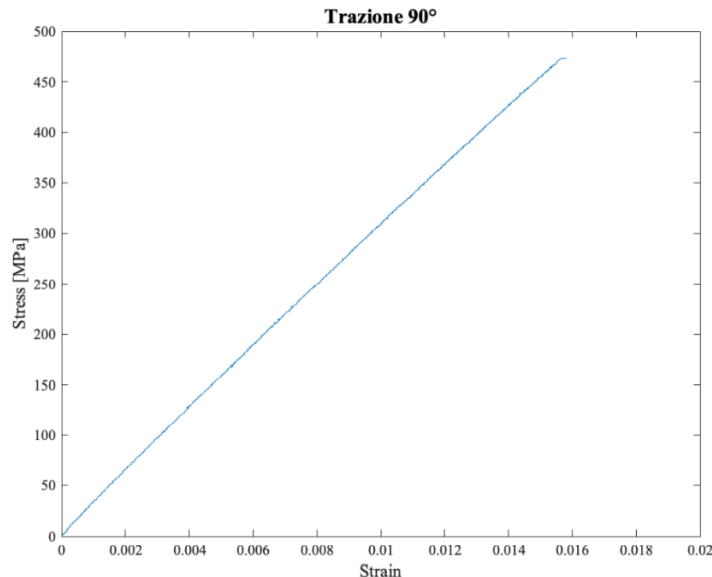


Figura 3.2 Grafico sperimentale ingegneristico tensione deformazione con fibre orientate a 90° .

La resistenza a trazione in questa direzione è 0.473 GPa con un modulo elastico in direzione 2 pari a 45.04 GPa.

3.1.1 Prova di taglio

La prova di taglio considera di sottoporre a trazione nella direzione X un laminato che abbia le fibre orientate nella direzione $\pm 45^\circ$. Quindi, per maggiore chiarezza, con tale layup si intende il posizionamento di strati di tessuto sovrapposti ed inclinati di 90 gradi gli uni rispetto agli altri. Questa prova però risulta essere maggiormente complessa in quanto è necessario risalire alle deformazioni angolari e quindi si è resa necessaria l'adozione di due estensimetri al fine di ricavare le due deformazioni nella direzione X e Y.

Anche qui, come in precedenza, si rimanda a [8] per la determinazione analitica delle proprietà meccaniche del composito. Nella presente trattazione invece si considera sufficiente riportare il grafico caratteristico con i valori utili all'impostazione del modello al fine di compilare i campi utili alla caratterizzazione completa del materiale.

È però importante sottolineare che si sono resi necessari due provini per la campagna sperimentale al fine di ottenere la resistenza a taglio ed il modulo elastico G_{12} . Questo perché, nel caso del modulo elastico non si è giunti a rottura, determinando così le deformazioni ε_x ed ε_y da cui si è risalito a G_{12} , mentre il secondo provino è stato portato fino alle condizioni di rottura, così da raccogliere il valore di tensione di rottura τ_{12} con riferimento alla deformazione in direzione x, ovvero ε_x unicamente misurata.

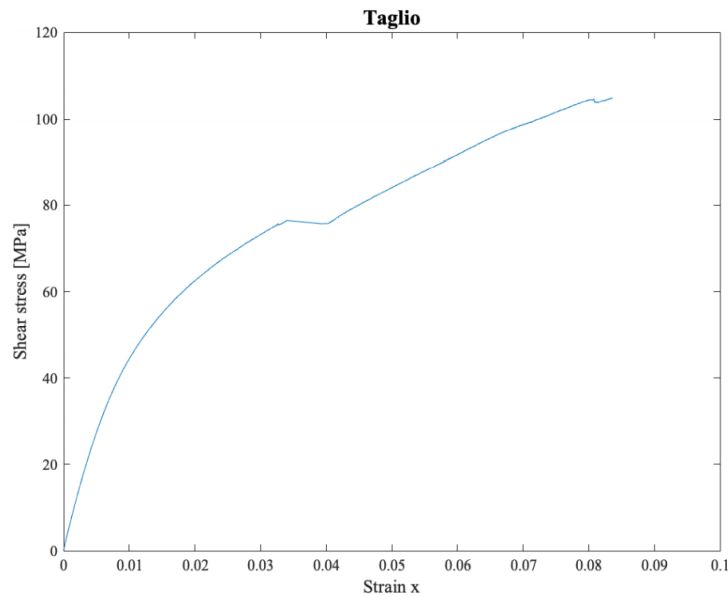


Figura 3.3 Grafico sperimentale ingegneristico tensione deformazione a taglio.

Come visibile dal grafico è possibile definire come valore di tensione ultima a taglio il valore di 0.105 GPa mentre il modulo elastico il valore di 3.76 GPa.

3.1.2 Prova di compressione

La normativa permette di calcolare e determinare le proprietà a compressione di compositi a matrice polimerica che vengono rinforzati con fibre HM nel piano della lamina, sia che esse siano continue che discontinue. Per tale prova sono stati testati diversi provini con variabili dimensioni in termini di spessore larghezza e lunghezza. La caratterizzazione completa è stata effettuata in un progetto di tesi, consultabile in [8], pertanto nella presente trattazione si considerano soltanto i risultati in relazione ai grafici di riferimento.

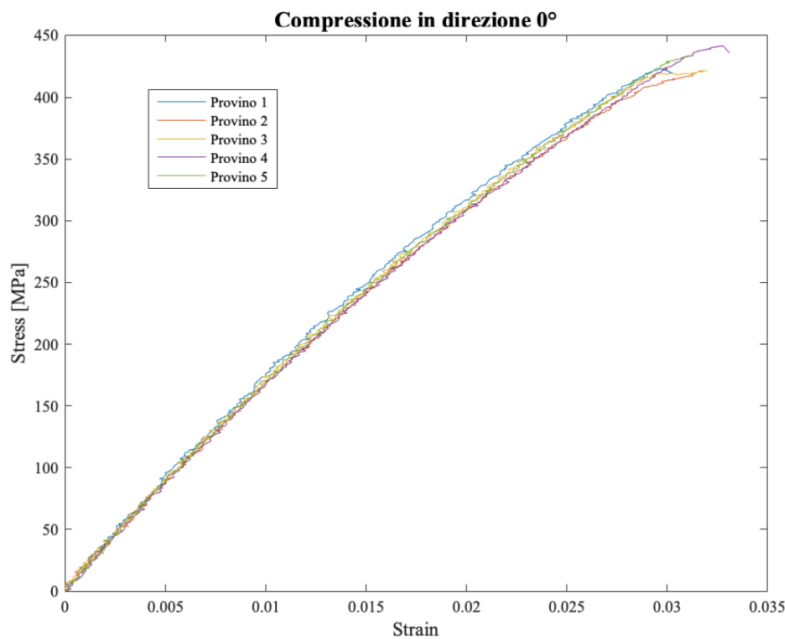


Figura 3.4 Curve ingegneristiche sforzo-deformazione: compressione in direzione 0°.

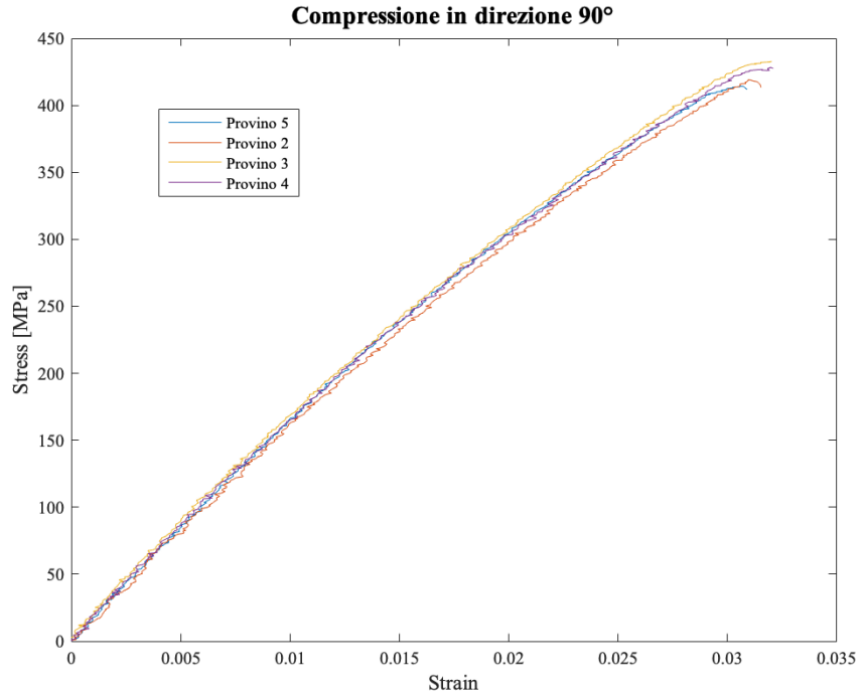


Figura 3.5 Curve ingegneristiche sforzo-deformazione: compressione in direzione 90°.

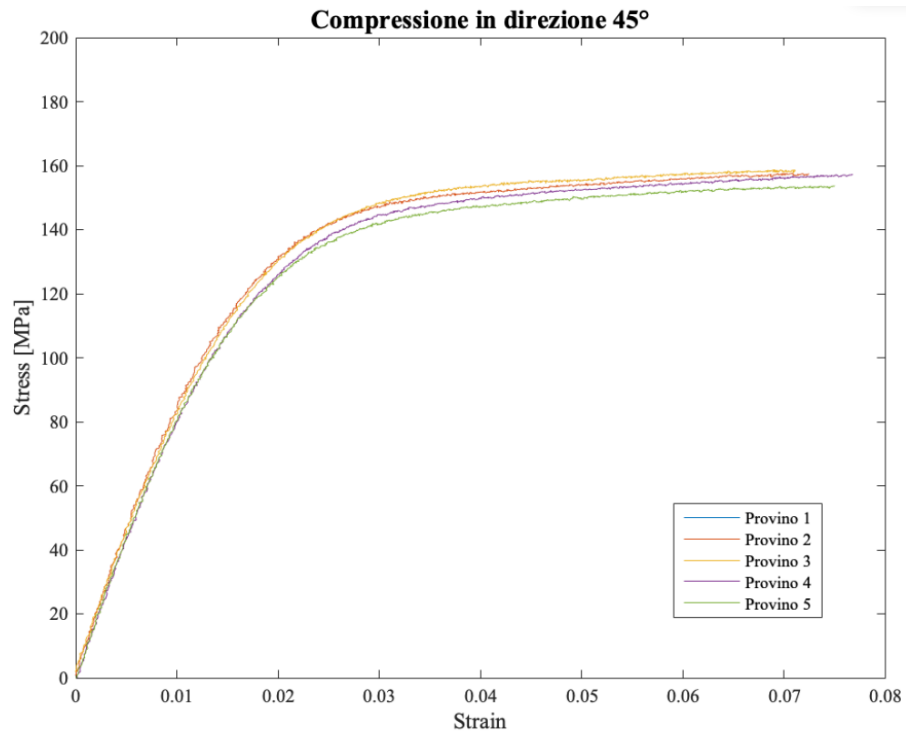


Figura 3.6 Curve ingegneristiche sforzo-deformazione: compressione in direzione 45°.

Nella direzione parallela alle fibre orientate a 0° la tensione di rottura è $\sigma_{R,0^\circ}^C = 0.428 \pm 0.00958$ GPa. In direzione parallela alle fibre disposte a 90° invece si avrà $\sigma_{R,90^\circ}^C = 0.4236 \pm 0.00845$ GPa. Successivamente si ottengono i moduli elastici nelle due direzioni 1 e 2: $E_1 = 41.885$ GPa e $E_2 = 41.950$ GPa.

3.2 Caratterizzazione sperimentale CFRP: GG200P_WS_100

La premessa da effettuare nel caso di caratterizzazione di materiali compositi, in particolare quella di materiali compositi di tipo unidirezionali, è quella relativa ai parametri che vengono utilizzati per caratterizzare un materiale composito e le considerazioni inerenti alla scelta tecnica che motiva il fatto che con la sola prova di trazione si possa caratterizzare completamente il materiale.

Partendo dal primo aspetto della caratterizzazione, i parametri meccanici di un materiale composito sono i seguenti:

- Modulo elastico sia longitudinale che trasversale;
- Il coefficiente di Poisson;
- Il modulo elastico tangenziale o di taglio;
- Le tensioni di rottura o resistenze statiche del composito, sia longitudinali che trasversali

Tali valori possono essere studiati a partire dal codice identificativo del composito che il produttore allega al momento della vendita. In tale documento sono presenti tutte le informazioni principali del composito in termini di proprietà della fibra, comprensiva di densità volumetrica, proprietà della matrice. Pertanto, utilizzando delle relazioni empiriche si risale alle frazioni volumetriche di fibra e matrice, a partire dalle quali si producono tutte le stime analitiche delle differenti proprietà e parametri.

Per la determinazione delle proprietà del materiale composito è necessario acquisire contemporaneamente le deformazioni longitudinali e trasversali del materiale durante la prova di trazione. Per raggiungere tale scopo, nella caratterizzazione condotta durante la stagione 2020-2021, si sono utilizzati due sensori che vanno sotto il nome di estensometri. Gli estensometri disponibili presso il laboratorio di costruzioni meccaniche del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova sono i seguenti:

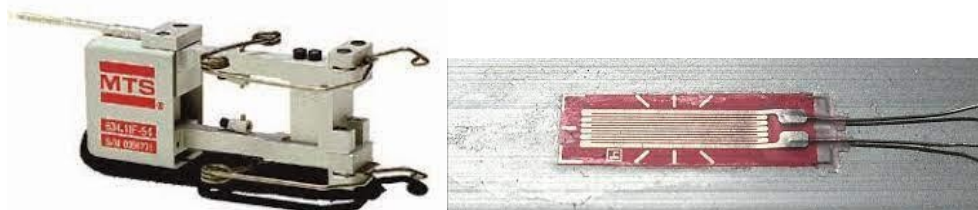


Figura 3.7 Estensometro utilizzato per la caratterizzazione sperimentale ed estensimetri adottati per la determinazione delle proprietà a taglio del provino.

In alternativa è possibile utilizzare gli estensimetri, necessari per ottenere il coefficiente di Poisson in quanto la lettura delle deformazioni nelle due direzioni principali deve avvenire contemporaneamente. Per la presente caratterizzazione, si è scelto di utilizzare l'estensometro i cui dati acquisiti sono sincronizzati con i dati provenienti dalla macchina come ad esempio tempo, deformazione media, spostamenti e forza.

Considerando quindi che i parametri linearmente indipendenti da determinare ai fini della caratterizzazione sperimentale sono 4 e con riferimento alla normativa ASTM D 3039 vengono riportati di seguito:

- E_L : è sufficiente un solo estensometro per la misura delle deformazioni longitudinali;
- E_T : servirà un solo estensometro per la misura delle deformazioni trasversali;
- E_{45} : servirà un solo estensometro per la misura delle deformazioni corrispondenti all'orientazione di 45° ;

- VLT: servirà un estensometro per la misura delle deformazioni longitudinali e un estensometro per la misura delle deformazioni trasversali. Entrambe le acquisizioni devono avvenire contemporaneamente.

3.2.1 Risultati sperimentali provini: direzione 0°

Con riferimento a quanto riportato anche in [9], si analizzano di seguito i dati sperimentali ottenuti a seguito della caratterizzazione del materiale eseguita in laboratorio. Si esegue tale analisi a partire però dall'ottenimento delle proprietà del materiale tramite un primo approccio analitico, fino a quando questo non rende necessario l'utilizzo dei dati sperimentali ottenuti in laboratorio.

In particolare, conoscendo dal datasheet del materiale il valore di E_f , della densità della fibra ρ_f ,


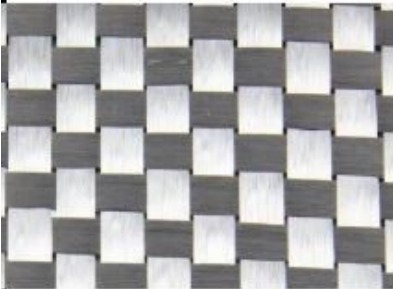
		TECHNICAL DATA SHEET GG 200 P WS 100		DOC NR:	TDS-F_1								
				REV :	00								
				DATE :	07/01/19								
				AUTHOR:	L.Gucci								
<table border="1"> <tr> <td>Article code:</td> <td>GG 200 P WS 100</td> </tr> <tr> <td>Pattern:</td> <td>Plain/ 8 mm Tow</td> </tr> <tr> <td>Finish:</td> <td>Loomstate</td> </tr> <tr> <td>Composition:</td> <td>100% Carbon fiber</td> </tr> </table>		Article code:	GG 200 P WS 100	Pattern:	Plain/ 8 mm Tow	Finish:	Loomstate	Composition:	100% Carbon fiber				
Article code:	GG 200 P WS 100												
Pattern:	Plain/ 8 mm Tow												
Finish:	Loomstate												
Composition:	100% Carbon fiber												
Technical Data		value	Standard										
Nominal weight (g/sqm):		200 ± 5%	ISO 3374										
Standard width (mm) ¹ :		1000 ± 1.5%	UNI EN 1773										
Fabric Thickness (mm):		0,22 ^{2*}	UNI EN ISO 5084										
¹ Measured between selvages													
Construction													
		Warp	Weft										
Material:	12K carbon HS		12K carbon HS										
Setting (thr/cm):	1,25 ± 4% [ISO 4602 (TA)]		1,25 ± 4% [ISO 4602 (TA)]										
Weight distribution (%):	50		50										
Fiber properties													
		Warp	Weft										
Nominal Yield ² :	800 tex		800 tex										
Fiber density ^{2*} :	n.g		n.g										
Twist ² :	n.g		n.g										
² Depending on order and yarn specification													
³ No measure, certified by supplier													
Additional Information													
Fabric Picture													
		Fiber specifics: 12K HS											
		Modulus	Tensile Strength										
		[Gpa]	[Mpa]										
		235	4900										
* indicative date													

Figura 3.8 Datasheet T700 direttamente dal produttore Microtex.

Per la caratterizzazione di tale materiale si sono realizzati diversi provini e si sono testati gli stessi per l'ottenimento delle proprietà meccaniche del composito in direzione 1 e in direzione 2 ossia rispettivamente a 0° e 90°.

Numero provino	Larghezza	Spessore	E max	E medio	Sigma R	sigma R (1.98)	G12	Epsilon R
TRAZIONE								
1 (E, 0°)	22.2	1.98	83.34	54.38				
2 (E, 0°)	22.9	2.25	84.59	55.19				
3 (E, 0°)	22.7	2.2	86.04	56.14				
4 (E,0°)	21.7	1.98	79.775	52.05	704	746.7		0.011663
5 (E,0°)	22.75	2.25	84.103	54.88	796	844.2		0.013258
6 (E,0°)	23.1	2.25		0	820	869.7		0.015173
7 (E,90°)	22.4	2.05		0	697	739.2		0.017137
8 (E,45°)	23	2.45		0	68.21		5591	
9 (E,45°)	23.2	2.25		0	74.93		4102	
10 (E,45°)	22.75	2.4		0	71.87		5108	
11 (E,45°)	22.8	2.3		0	73.22		5093	
12 (E,45°)	22.95	2.3						

Tabella 3-1 Provini realizzati per prova di trazione.

I provini che sono stati utilizzati sono diversi in termini di orientazione, larghezza e spessore e per tali provini si misurano dei valori di modulo elastico massimo e medio. La caratterizzazione, in trazione, avviene anche per una condizione di taglio per l'ottenimento del modulo elastico a taglio.

Per la caratterizzazione sperimentale, infatti, la normativa suggerisce di utilizzare almeno cinque provini per ciascuno dei differenti orientamenti delle fibre. Tale motivazione è dovuta al fatto che si vuole avere un buon campione statistico.

Le geometrie consentite in tal senso sono delle geometrie rettangolari dotate o meno di tabs alle estremità per permettere, in maniera efficace, l'applicazione del carico come consigliato dalla normativa ASTM D3039. Nel caso di test in direzione 1 le tabs sono utili per favorire l'innescò del cedimento nella direzione delle fibre, mentre per i test in direzione 2, le tabs vengono utilizzate per evitare il danneggiamento localizzato nell'afferraggio. I test in direzione 2 e cioè a 90° sono finalizzati a misurare la resistenza della matrice.

Le tabs devono garantire la rottura in corrispondenza della zona centrale rispetto ai due coltelli dell'estensometro, esattamente come è raffigurato nella Figura 3.9. di seguito.

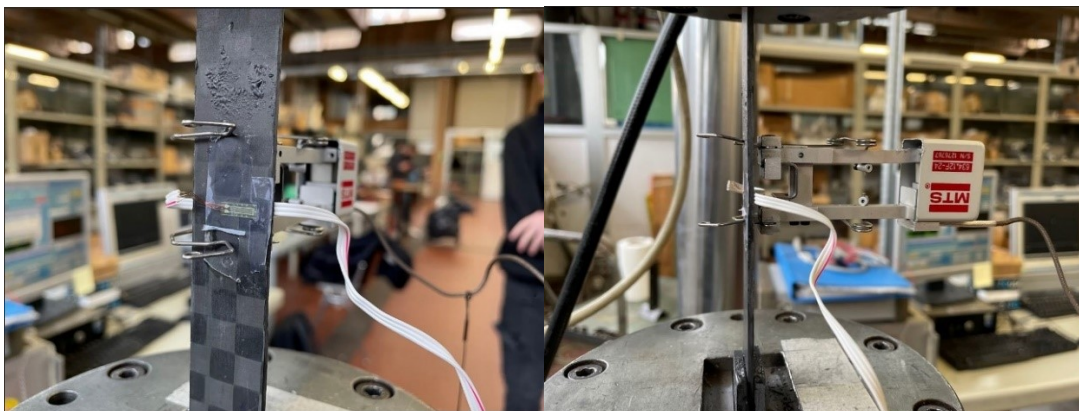


Figura 3.9 Provini fissati in macchina di prova per la caratterizzazione sperimentale durante la prova di trazione.

La procedura sperimentale prevede prima di conoscere la sezione trasversale di ogni provino che altro non è che l'altezza per lo spessore, misura delle stesse ripetuta per tre volte nella zona compresa tra i due coltelli, come definisce la normativa ASTM D3039.

La deformazione deve avvenire in modo tale da rientrare all'interno di una finestra temporale che va da 1 a 10 minuti. Nel caso di prove in controllo di deformazione, così come quelle condotte a velocità costante è importante allineare la movimentazione della traversa mobile con la direzione delle fibre in quanto, anche per angoli minimi rispetto alla direzione parallela a quelle delle fibre orientate in direzione a 0° , il comportamento del materiale varia notevolmente, in quanto varia lo stato tensionale presente.

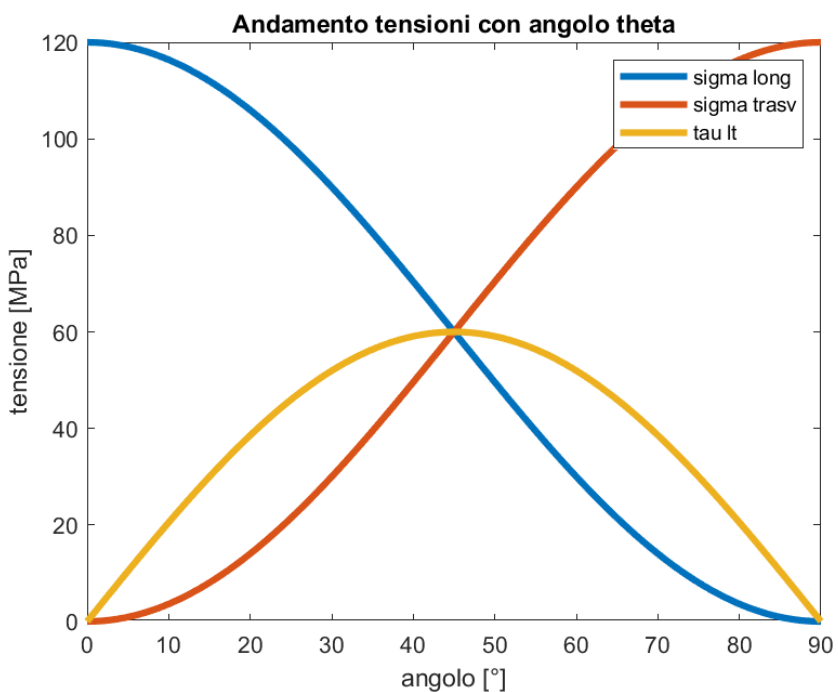


Figura 3.10 Andamento delle tensioni con angolo di off-axis rispetto alla direzione principale.

A seguito dei dati ottenuti dagli estensimetri, è possibile ottenere la curva tensione-deformazione ingegneristica, dalla quale è possibile risalire alle caratteristiche meccaniche del composito in trazione.

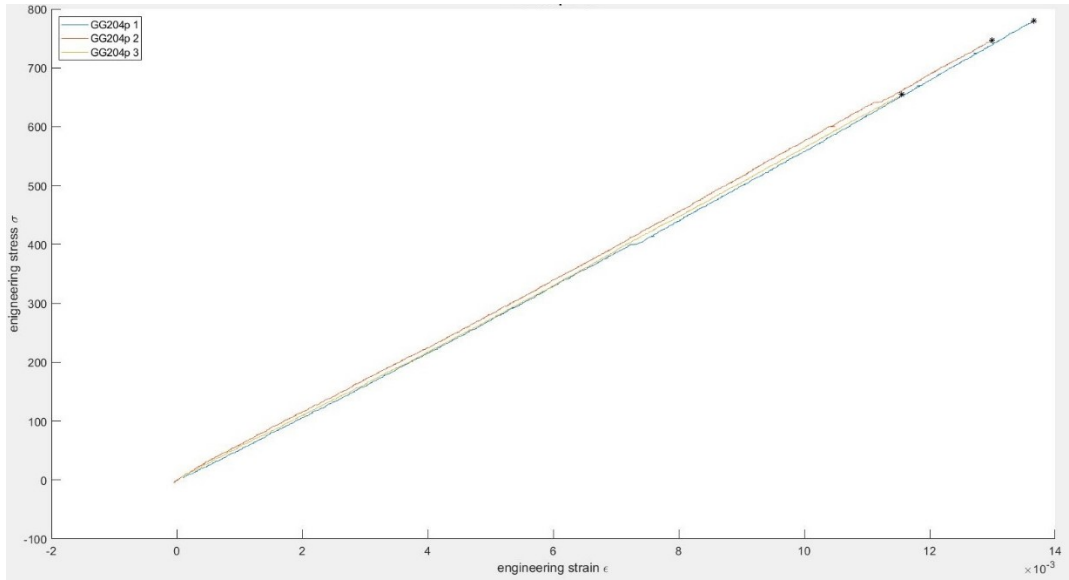


Figura 3.11 Curva tensione-deformazione ingegneristica per il materiale T700.

Analogamente accade per il caso in compressione con il seguente campione sperimentale di provini.

Numero provino	Larghezza	Spessore	Luce	sigma R (1.98)
COMPRESSIONE				
13	25.7	2.75	20.55	
14	23.9	2.7	23.55	
15	22.9	2.8	30.72	
16	23.1	2.75	25.8	
17	22.5	2.5	24.42	
18	23	1.93	31.4	277
19	23.94	2	31.4	325
20	23.63	2.01	29.09	360
21	23.97	2.38	31.8	439
22	21.95	2.11	27.07	390
23	24.2	2.43	32.35	
24	24.64	2.01	30.49	

Tabella 3-2 Provini realizzati per prova di compressione.

Rielaborando i dati ottenuti ed analizzandoli, si ottengono i valori caratteristici per il materiale che verranno inseriti all'interno del modello numerico per completare la card del materiale ai fini simulativi.

	MPa	GPa	%	-	MPa	GPa	%
	s11	E11	εf11	n12	σ22	E22	εf22
GG200P WS 100 - E3-150HN - 42%	820	55	1.43	0,056	820	55	1.43
	MPa	MPa	MPa	GPa	kg/m3	%	
	σ11c	σ22c	t12	G12	rho	Vf	
	439	439	72	3,85	1,5	48	

Tabella 3-3 Tabella rappresentativa delle proprietà meccaniche del materiale T700.

3.3 Caratterizzazione sperimentale: Honeycomb

Il nido d'ape che è stato utilizzato per realizzare le pareti sandwich dello sgabello finalizzato a simulare la monoscocca su cui l'impact viene montato, è realizzato in lega di alluminio, a celle esagonale, prodotto da IMATEC.

Per chiarezza esplicitiva si riportano le dimensioni di riferimento della struttura a nido d'ape utilizzata [8] ed il setup della prova sperimentale che viene seguito per la caratterizzazione sperimentale.

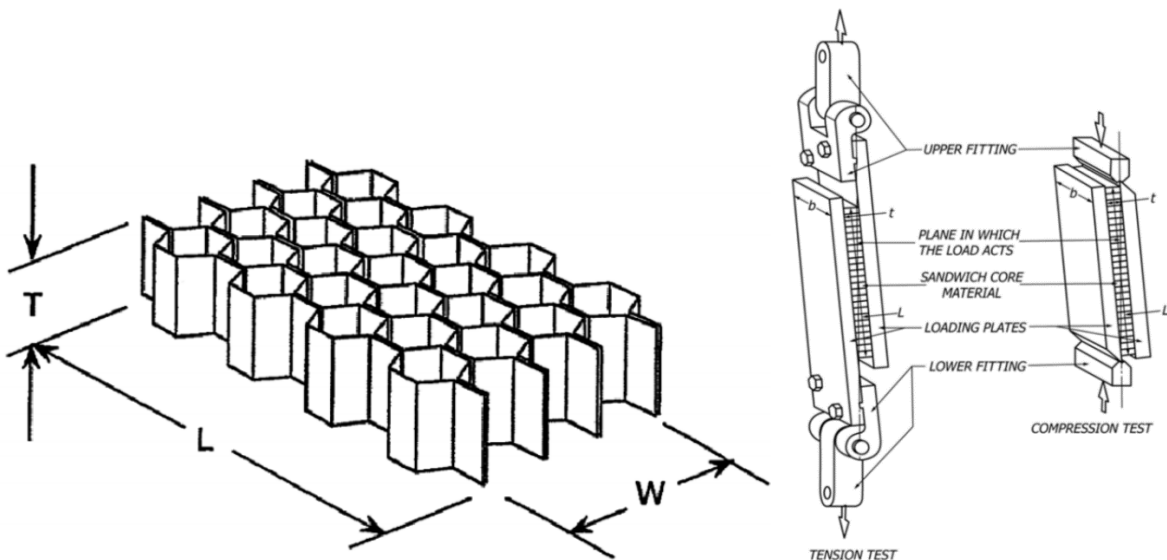


Figura 3.12 Direzioni di riferimento Honeycomb [8] e setup prova sperimentale.

Per questa caratterizzazione si fa riferimento a due normative al fine di ottenere le curve sforzo-deformazione: ASTM C273/C273M-18 [19] e ASTM D7336/D7336M-16 [20].

PROPRIETA'	VALORE [udm]
Densità	7.2e-08 [kg/m ³]
Dimensione cella esagonale	1/8 [']
Spessore T	15 [mm]
Resistenza a compressione in direzione T	9e-05 [GPa]
Resistenza a compressione in direzione L	6e-05 [GPa]
Resistenza a compressione in direzione W	/
E11	0.00093 [GPa]
E22	0.0006 [GPa]
E33	0.467 [GPa]
Coefficiente di Poisson (12)	0.33
Resistenza a taglio in direzione L	9e-05 [GPa]
Modulo a taglio in direzione L	0.00202 [GPa]
Resistenza a taglio in direzione T	6e-05 [GPa]
Modulo a taglio in direzione T	0.04416 [GPa]
Resistenza a taglio in direzione W	0.00084 [GPa]
Modulo a taglio in direzione W	0.05112 [GPa]

Tabella 3-4 Caratteristiche honeycomb IMATEC 4.5 pcf.

Alcuni dei valori sopra riportati sono stati ottenuti dal datasheet del produttore da cui è stato acquistato l'honeycomb. Gli altri valori come le tensioni di rottura piuttosto che i moduli elastici sono stati ottenuti da prove sperimentali. Di seguito vengono riportate le prove effettuate.

Come visibile nella figura 3.12 il setup della prova sperimentale è generato in maniera tale da fornire un'idea di come avrebbe dovuto essere condotta la prova di caratterizzazione del materiale a nido d'ape.

3.3.1 Prova di taglio: Caratteristiche meccaniche nel piano TL

Con riferimento a [8] si considerino le prove eseguite per la caratterizzazione a taglio in direzione L dell'honeycomb. La prova è stata eseguita con una velocità di 1 mm/min. La tensione ottenuta da tale caratterizzazione è identificativa del comportamento dell'honeycomb nel piano TL. Come è possibile visualizzare dalla seguente figura, l'honeycomb è stato incollato a due basi opportunamente sabbiato tramite l'utilizzo di un film di adesivo MTA® 240B. L'honeycomb viene orientato in direzione L e sottoposto a taglio.

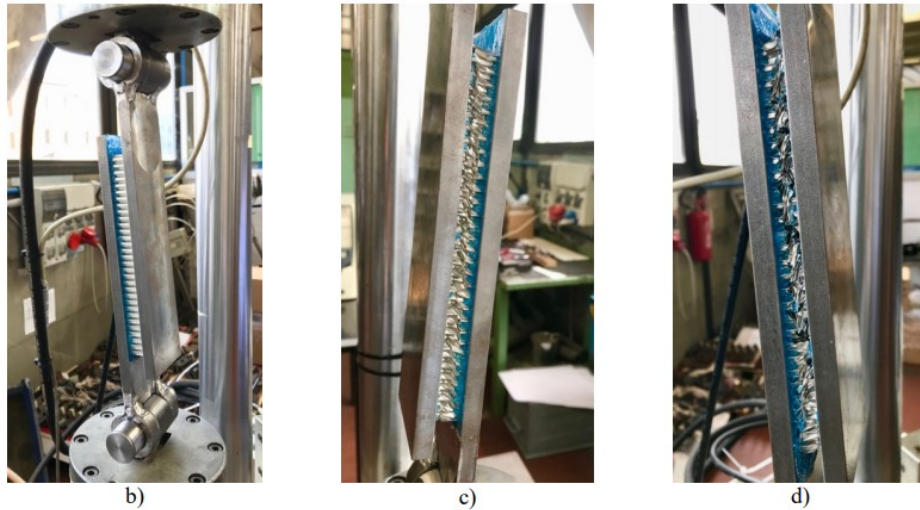


Figura 3.13 Istantanee delle diverse fasi della prova di caratterizzazione Honeycomb in direzione L. [8]

Come rappresentato in figura 4.15 si hanno diverse fasi durante la caratterizzazione dell'honeycomb: In b) si ha il provino allestito in condizioni di avvio prova. In c) invece si può notare la deformazione che già ha inizio all'interno dell'honeycomb ed in d) la deformazione del materiale negli istanti finali della prova. In figura 4.17 invece è possibile notare il provino post-mortem dove la rottura ha interessato quasi tutto il materiale costituente il core.



Figura 3.14 Provino Honeycomb post-mortem: termine della prova di caratterizzazione. [8]

Viene riportata di seguito la curva rappresentativa del test a taglio nel piano LT.

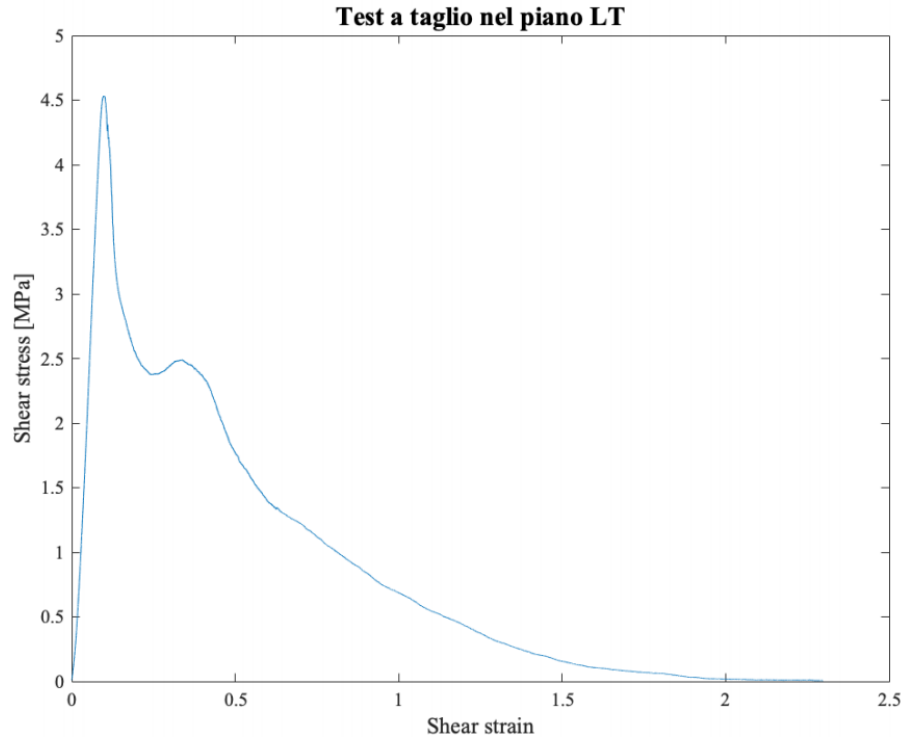


Figura 3.15 Curva sperimentale tensione deformazione a taglio. [8]

La macchina di prova fornisce in output la curva forza-spostamento che viene convertita in una curva tensione-deformazione utilizzando le seguenti formule analitiche per il calcolo delle tensioni e delle deformazioni rispettivamente.

$$\tau = \frac{F}{L \times b} \quad (3.2)$$

Dove appunto F è la forza che agisce sul provino, L la lunghezza del campione di materiale e b l'ampiezza. Di contro, la deformazione angolare ingegneristica (essendo le curve ottenute delle curve ingegneristiche) si ottiene con la seguente formula:

$$\gamma = \frac{u}{c} \quad (3.3)$$

Dove u è lo spostamento relativo dei piatti mentre c è lo spessore del nido d'ape.

Il valore di tensione di rottura a taglio nel piano LT che si ottengono dal grafico sperimentale, interessante per la presente trattazione, è il seguente:

$$\tau_{LT} = 0.00453 \text{ GPa} \quad (3.4)$$

È possibile calcolare anche il modulo elastico di taglio nel piano LT avvalendoci della formula che la normativa consiglia [79] ovvero:

$$G = \frac{\Delta F}{\Delta u} \times \frac{c}{L \times b} \quad (3.5)$$

Utilizzando tale formula si ottiene:

$$G_{LT} = 0.05112 \text{ GPa} \quad (3.6)$$

3.3.2 Prova di taglio: Caratteristiche meccaniche nel piano TW

Analogamente a quanto svolto per le proprietà meccaniche nel piano TL si è condotta la medesima trattazione al fine di determinare le proprietà dell'honeycomb in direzione W, per esattezza nel piano TW.

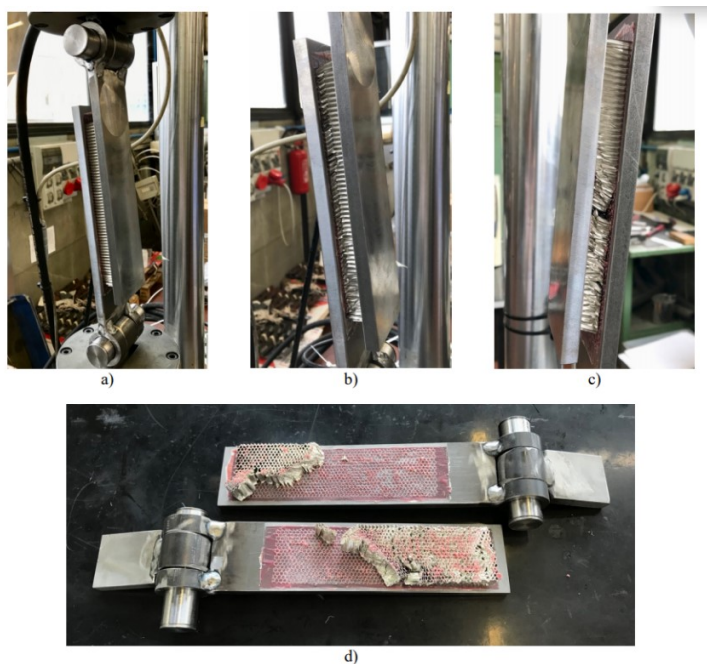


Figura 3.16 Istantanee delle diverse fasi della prova di caratterizzazione Honeycomb in direzione W. [8].

Si notano diverse fasi del test: nell'ordine in cui le figure sono rappresentate mostrano la prima fase di deformazione dell'honeycomb ad opera degli sforzi di taglio. Successivamente, si vede la prova abbondantemente avviata e che si verifica la rottura all'interfaccia tra honeycomb e adesivo ma si possono verificare come in questo caso, fratture tra le celle, create a causa dell'azione della trazione della macchina stessa

Il grafico di riferimento che viene considerato per il modello numerico è riportato nella figura seguente:

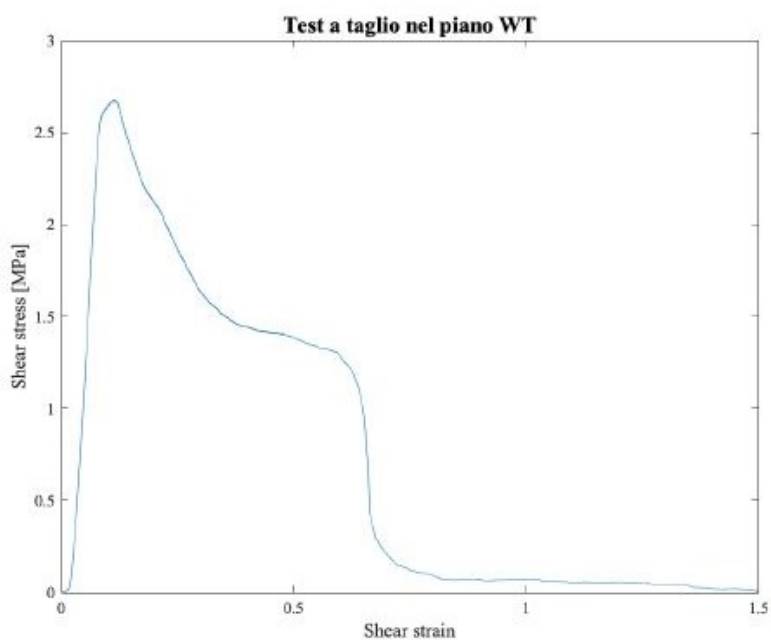


Figura 3.17 Grafico relativo alle tensioni e deformazioni angolari che si verificano all'interno della struttura a nido d'ape nel piano WT. [8]

La resistenza a taglio che il materiale dimostra è pari a 2.68 MPa nel piano WT. Il corrispondente valore di modulo elastico a taglio è pari a $G_{WT} = 44.16$ MPa.

3.3.3 Prova di taglio: Caratteristiche meccaniche nel piano LW

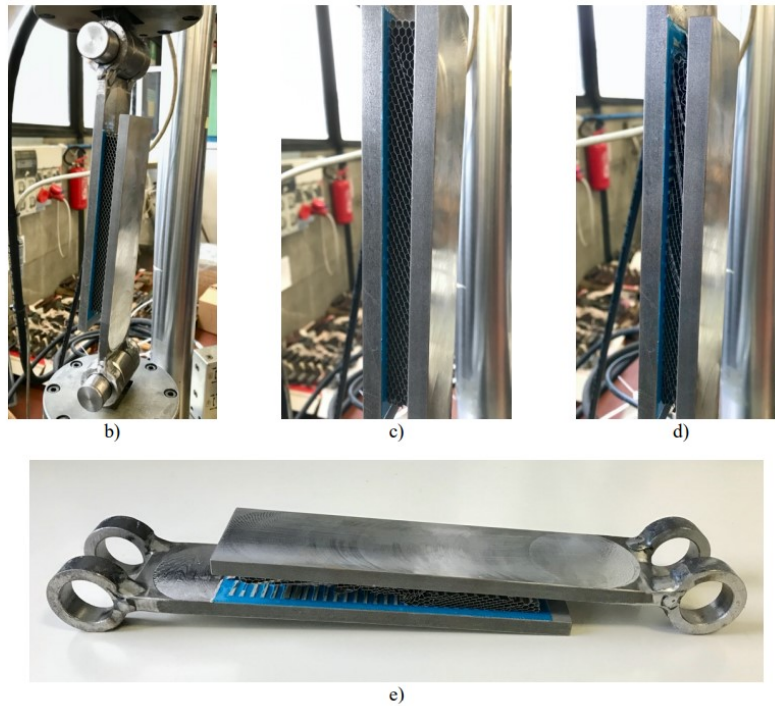


Figura 3.18 Istantanee delle diverse fasi della prova di caratterizzazione Honeycomb nel piano LW. [8]

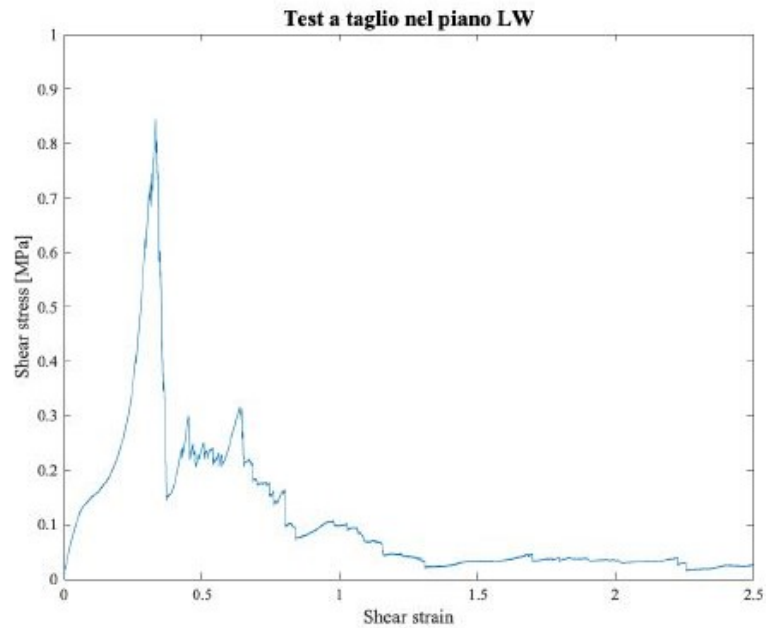


Figura 3.19 Grafico relativo alle tensioni e deformazioni angolari che si verificano all'interno della struttura a nido d'ape nel piano LW. [8]

Il valore del modulo elastico $G_{LW} = 2.02$ MPa.

3.3.4 Prova di compressione: Caratteristiche meccaniche in T, L e W

La normativa prevede di testare solo ed esclusivamente il materiale cellulare; quindi, non deve avere le superfici vincolate oppure deve essere sottoposto a tale prova l'intero pannello sandwich. Nel caso in esame si è scelto di sottoporre a compressione solamente il materiale cellulare. Per le specifiche delle prove si rimanda alla trattazione di [8] mentre in questo elaborato si parte dalla curva tensione deformazione per ricavarne le proprietà meccaniche di interesse.

Si rappresentano di seguito le tre diverse configurazioni, ove quella in direzione T offre la maggior resistenza del materiale cellulare. La sequenza mostrata è la seguente: compressione in direzione T,W,L.

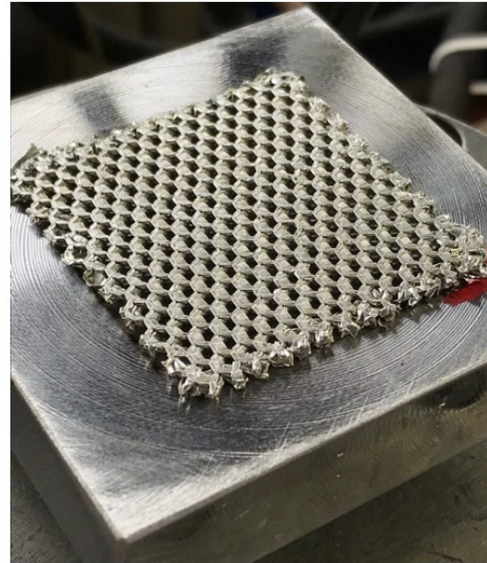
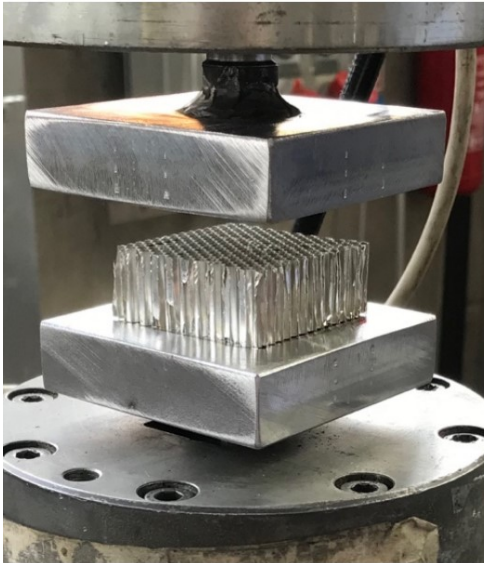


Figura 3.20 Honeycomb prima e dopo la compressione lungo la direzione T. [8]



Figura 3.21 Honeycomb prima e dopo la compressione lungo la direzione W. [8]

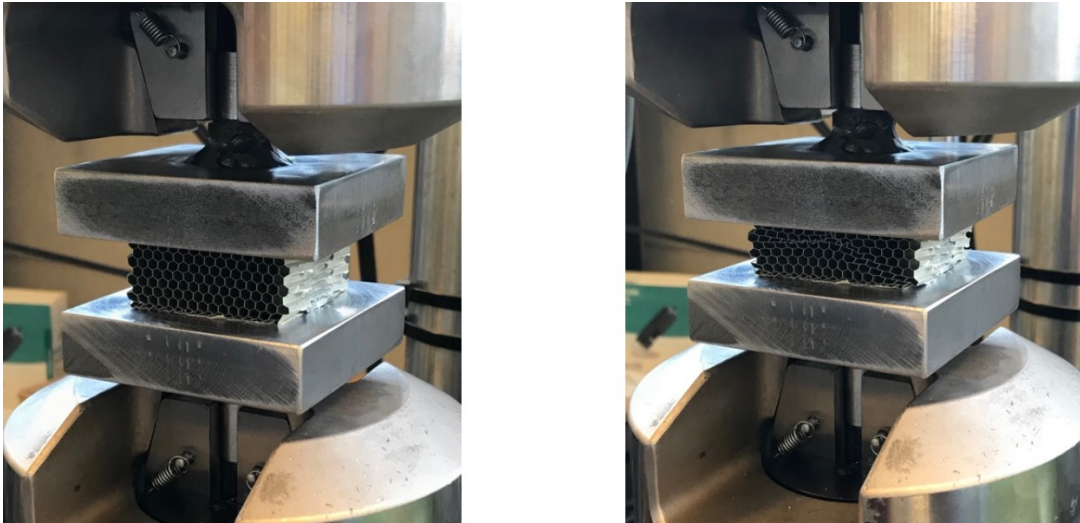


Figura 3.22 Honeycomb prima e dopo la compressione lungo la direzione L. [8]

Le macchine di prova utilizzate registrano la forza resistente insieme allo spostamento della traversa mobile che si riflette sulle piastre durante la compressione delle due piastre. La deformazione del provino si ottiene dal rapporto tra lo spostamento registrato e lo spessore del provino di honeycomb sottoposto al test.

Se invece si rapportano la forza contro la sezione resistente si ottiene il carico medio agente sulla sezione del provino.

Di seguito si riportano le curve di compressione nelle diverse direzioni ottenute dalle prove sperimentali eseguite.

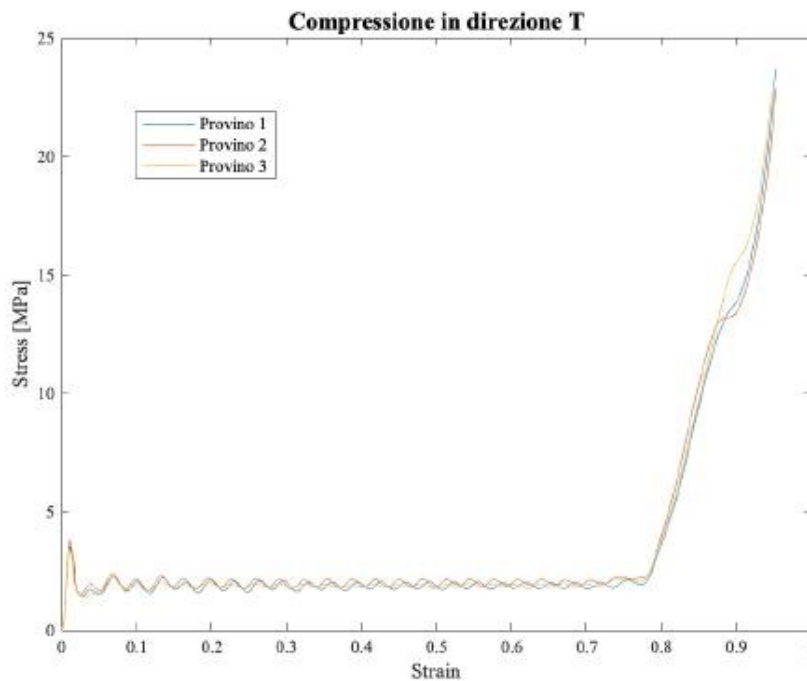


Figura 3.23 Curva sperimentale ottenuta dalla compressione in direzione T dell'honeycomb.

Nella compressione in direzione T, si ha un valore di picco iniziale dello sforzo che è pari a 3.56 MPa con una variabilità di circa 0.22 MPa rispetto a tale valore. Il superamento di questo valore genera fenomeni di imbarilimento (buckling) delle pareti delle celle. A seguito di questo valore si genera un plateau ove la deformazione predominante è quella plastica che genera la piegatura e lo stiramento delle pareti della materiale con struttura a nido d'ape.

Tale stabilizzazione e continua variabilità del carico è dovuta al fatto che il materiale va ripiegandosi su sé stesso e pertanto avrà un ripiegamento continuo fino a quando i lembi delle pareti compattate non si trovino in condizione di completa compattazione del materiale e quindi lavorano come un unico componente in alluminio con spessore pari allo spessore crashato del materiale. Chiaramente, in corrispondenza di tale valore, la tensione raggiunta non ha alcun significato fisico valido per essere inserito all'interno del modello in quanto si considera come momento di failure già quello al termine del plateau e cioè quello in corrispondenza del 75% della deformazione totale. L'esempio applicativo è riportato in figura 3.20.

Come riportato nel seguito, le curve che riguardo la compressione nella direzione L e nella direzione W non presentano dei picchi o delle fasi di stabilizzazione per un determinato livello di stress.

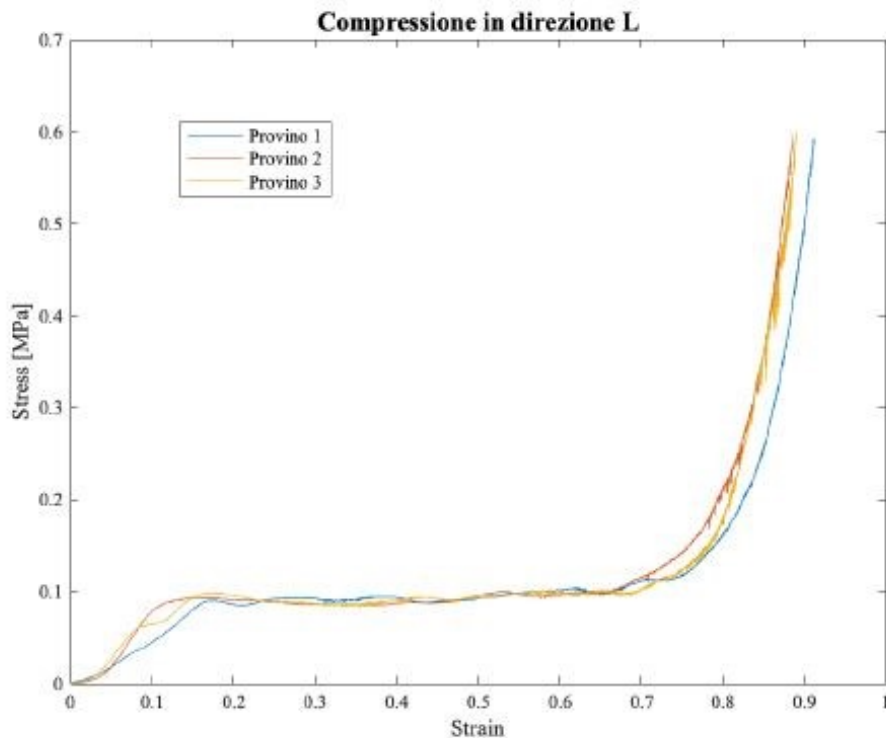


Figura 3.24 Curva sperimentale ottenuta dalla compressione in direzione L dell'honeycomb.

In tutte le curve si nota un comportamento a più fasi: in particolare nei primi momenti dell'applicazione del carico di compressione si ha una certa linearità, almeno iniziale, a simboleggiare il comportamento lineare elastico. Se in tale circostanza si annulla il carico le pareti delle celle avranno una deformazione reversibile. L'andamento della curva, in particolare per il tratto lineare elastico è funzione predominante dello spessore della parete del nido d'ape.

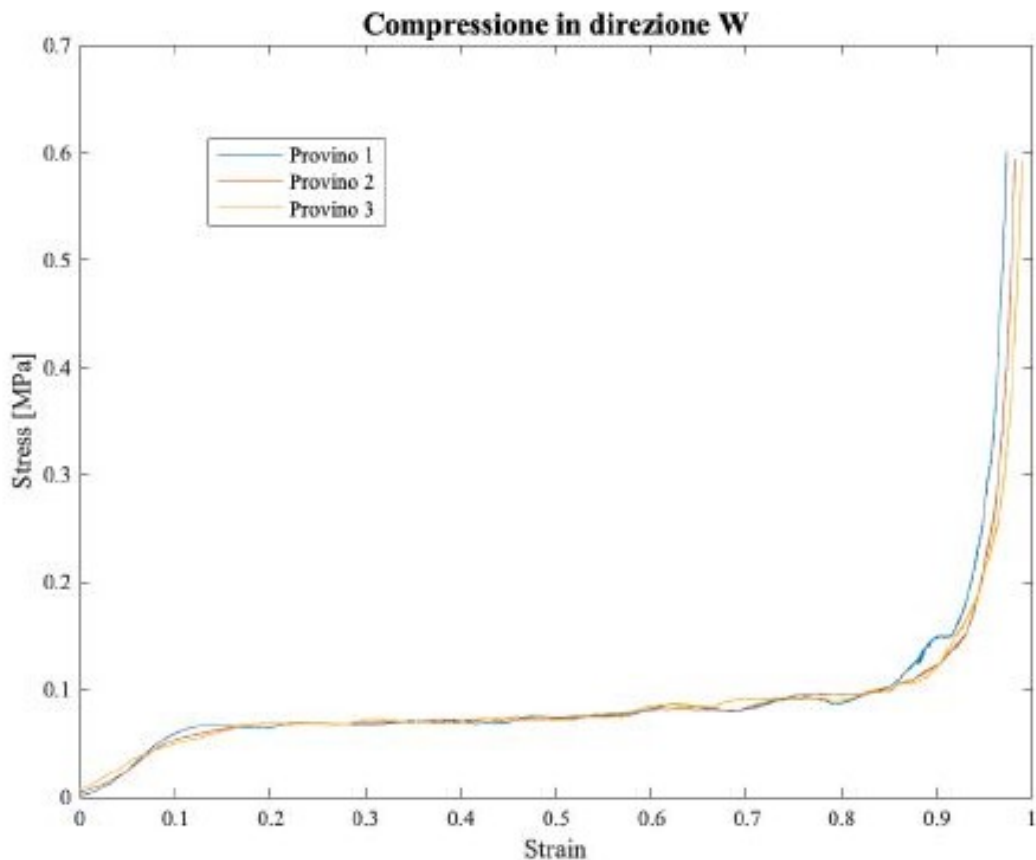


Figura 3.25 Curva sperimentale ottenuta dalla compressione in direzione W dell'honeycomb.

Con riferimento alle curve precedentemente ottenute si può osservare la diversità nella resistenza a compressione dell'honeycomb nel caso in cui questo venga caricato ortogonalmente all'asse delle celle (W,L) rispetto al caso in cui il carico sia parallelo all'asse delle celle stesse. Il plateau della deformazione plastica infatti avviene a valori di tensione che sono inferiori di circa cinque volte rispetto al caso di compressione in direzione T.

Globalmente e complessivamente per ognuna delle tre direzioni in cui si carica il materiale cellulare si può concludere che il suo comportamento è elastico perfettamente plastico fino alla compattazione.

Alla luce della curva ottenuta caratterizzando l'honeycomb in compressione in direzione T, si possono riportare delle considerazioni in merito alla scelta della tipologia di honeycomb da utilizzare ed in particolare ponendo attenzione ai parametri che guidano le scelte tecniche e progettuali nella scelta dello stesso.

Dal capitolo 1 si è compresa la necessità, ai fini progettuali di assorbire un'energia target di $U_{abs} = 7350$ J equivalenti ad una massa di 300 Kg che decelererà in modo costante a 20g da una velocità di 7 m/s.

L'assorbitore reale, a differenza di quello ideale in cui si può supporre che l'energia assorbita corrisponde esattamente a quella di impatto, è in grado di assorbire un'energia minore di quella di impatto. Infatti, l'energia di impatto deve essere decurtata della quota parte di energia elastica che nel caso in trattazione è energia di ritorno elastico rappresentata, in termini integrali, dall'energia elastica assorbita dall'Anti Intrusion Plaste (AIP). Infatti, si riporta di seguito una classica curva di energia assorbita nel tempo.

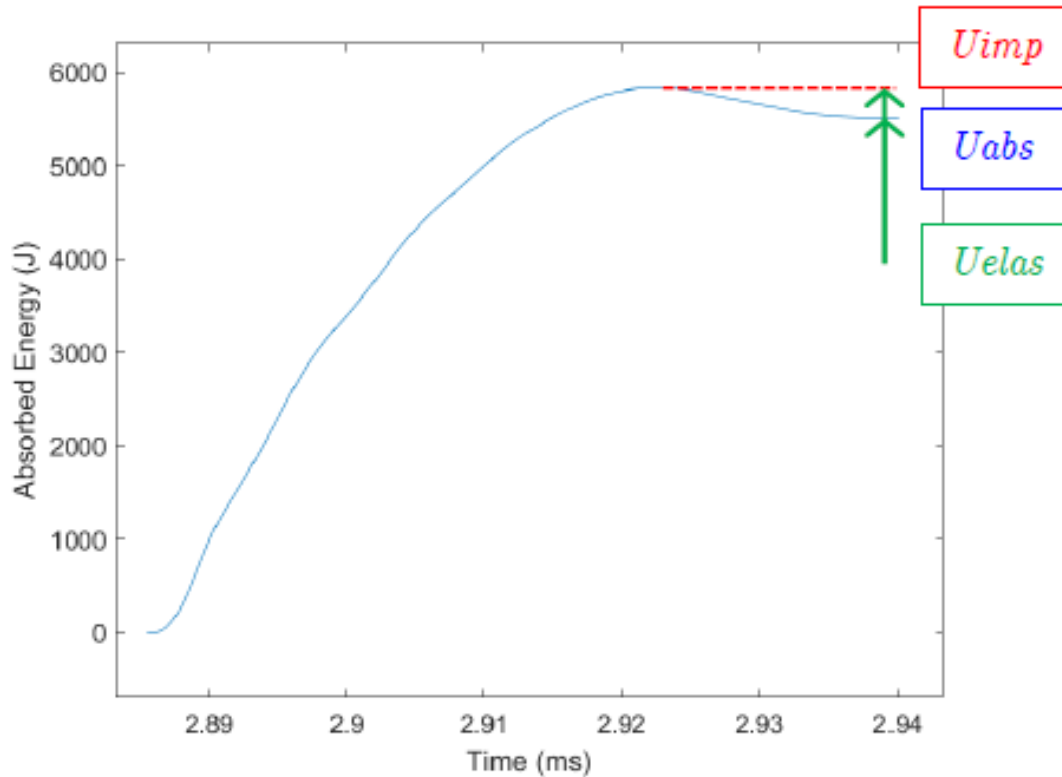


Figura 3.26 Curva energia tempo con chiarificazione delle differenti quote parti di energia assorbite.

Pertanto, se si considerano le richieste di regolamento, l'energia assorbita deve essere di 7350 J e quindi l'energia di impatto deve essere superiore al 7350 della quota parte di energia elastica che però in fase di progettazione non è conosciuta (U_{elas}).

Visto e considerato che l'energia elastica viene assorbita dall'AIP, per un anti intrusion plate di 4 mm di spessore l'energia elastica assorbita è pari a 350 J, pertanto, il contenuto energetico in termini di energia di impatto ammonta a 7700 J compressivamente. In tal caso la massa avrà una velocità finale verso l'alto, calcolabile con la seguente formula, fino a totale esaurimento dell'energia elastica.

$$\sqrt{\left(2 \times \frac{E_{elas}}{m}\right)} = 1.5 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

In merito alla capacità di assorbimento di un assorbitore realizzato in materiale Honeycomb, con una certa sezione resistente ($B \times W$), si può considera il grafico ottenuto dalla caratterizzazione sperimentale riportata in [8] ove si può notare che l'alluminio scelto per la struttura a nido d'ape ha un volume finale di compattamento pari a circa l' 80% del volume iniziale da cui si è partiti per la caratterizzazione. In corrispondenza di tale valore di deformazione si può calcolare, sempre dal grafico sperimentale, la tensione di compattamento (crush strenght) σ .

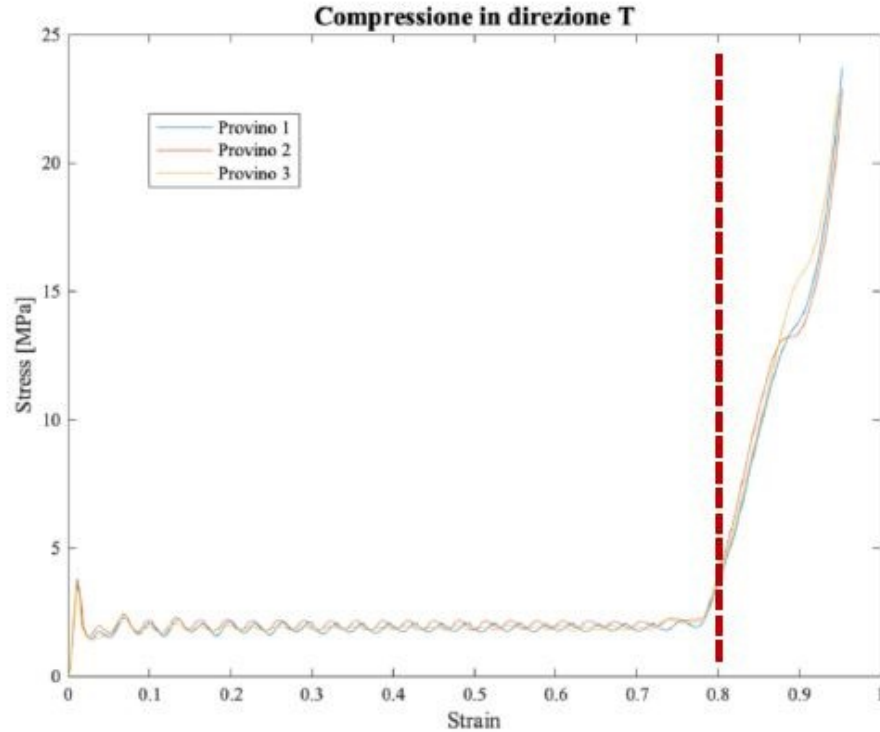


Figura 3.27 Curva tensione deformazione in direzione T dell'honeycomb Plascore stagione 2019-2020.

La forza in condizioni steady state che la crashbox oppone sarà pari al prodotto della tensione, in particolare quella di schiacciamento, per la sezione resistente.

$$F_{SS} = WB\sigma \quad (3.8)$$

Così facendo, una volta nota la forza si può ottenere la decelerazione dividendo la stessa per la massa.

$$a = \frac{F_{SS}}{m} \quad (3.9)$$

Considerando che la forza di steady state non varia nel tempo, la flessione dell'AIP raggiunge il suo valore massima prima che la crash box comincia ad assorbire energia; pertanto, l'energia che la crashbox accumula è esattamente U_{abs} .

Quindi, l'energia iniziale sarà assorbita su un'altezza h_1 :

$$h_1 = \frac{U_{abs}}{F_{SS}} \quad (3.10)$$

In questa altezza si deve però considerare anche il volume di compattazione che non è del 100% e pertanto si avrà una correzione a questa altezza di un fattore $1/V_f$.

$$h = \frac{h_1}{V_f} \quad (3.11)$$

L'altezza della crashbox che non è da considerare crashata ovvero che non ha subito uno schiacciamento (anche nota come "non crashed leght") è la differenza tra l'altezza totale H dell'assorbitore e l'altezza invece di crash precedentemente calcolata.

$$r = H - h \quad (3.12)$$

Per concludere la trattazione che porta alla scelta del materiale Honeycomb da utilizzare per l'assorbitore, si riportano i dati sperimentali dell'assorbitore realizzato in solo materiale Honeycomb della stagione 2019-2020, presentato nel capitolo 1 introduttivo. Tali dati corrispondono all'output dell'accelerometro e vengono integrati per ottenere la velocità. Tale velocità come si nota dai non è pari

ai 7 m/s della torre di caduta per motivi di altezza massima raggiungibile dalla massa stessa; pertanto, il non rispetto dell'energia massima prevista da regolamento è determinata da un'impotenza fisica della prova sperimentale stessa. Integrando l'accelerazione nel tempo si ottiene una velocità di 6.17 m/s. In tal caso l'energia assorbita è pari a 5833 J di cui 362 J di energia elastica.

L'honeycomb adottato nella caratterizzazione è il seguente, con le specifiche di riferimento fornite direttamente dal fornitore. La forza di compattamento è un dato reso noto dal fornitore ma è comparabile al valore determinato sperimentalmente in corrispondenza di una deformazione dell'80%.

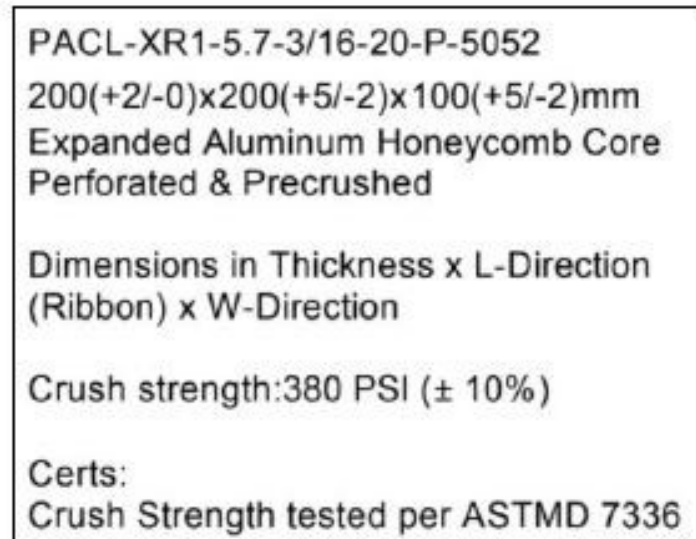


Figura 3.28 Datasheet dell'honeycomb utilizzato durante la caratterizzazione sperimentale della stagione 2019-2020 e che viene utilizzato nel modello numerico.

La crush strength è pari a 2.62 ± 0.26 MPa, determinando una forza di steady state come segue:

$$F_{ss} = WB\sigma = 200 \times 100 \times 2.62 = 52400N \quad (3.13)$$

In tal modo si ottiene una decelerazione media di:

$$a = \frac{52400 \pm 10\%}{306} = 17.46 G \quad (3.14)$$

Pertanto, l'energia che viene assorbita è pari a:

$$h_1 = \frac{5475}{52400 \pm 10\%} = 105 \pm 11 mm \quad (3.15)$$

Ricordando la correzione da apportare per assorbire effettivamente l'energia E si avrà una crushed length pari a:

$$h = \frac{h_1}{v_f} = 131 mm \quad (3.16)$$

Così facendo la lunghezza non deformata dell'assorbitore sarà pari a:

$$r = H - h = 200 - 131 = 69mm \quad (3.17)$$

Tali valori analitici trovano riscontro sperimentale all'interno della seguente trattazione eseguita durante la stagione 2019-2020 e i cui dati sperimentali sono riportati in Fig.3.12

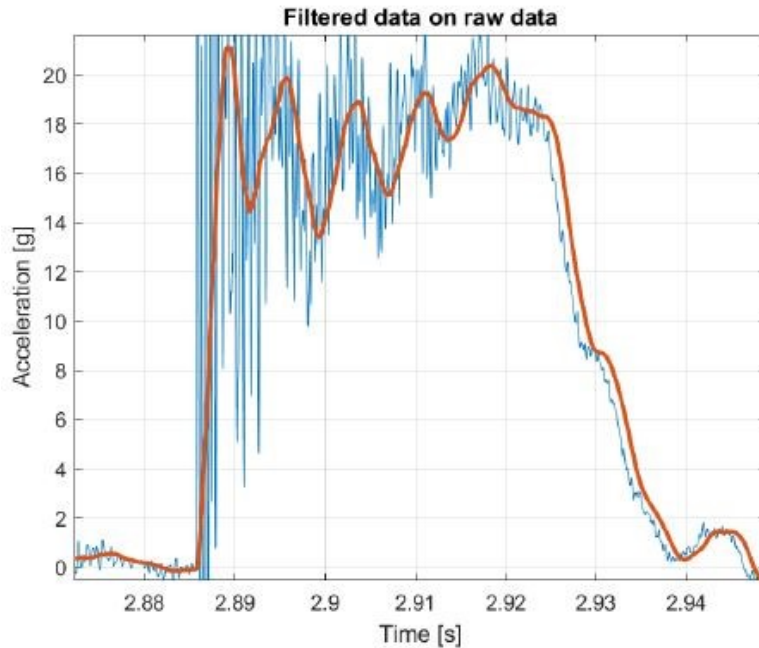


Figura 3.29 Dati sperimentali assorbitore realizzato in Honeycomb di tipo FSAE per la stagione 2019-2020.

Sarebbe opportuno, ma molto complesso, individuare l'istante temporale in cui ha fine l'assorbimento elastico e inizia l'assorbimento plastico. Piuttosto, è più semplice individuare il momento in cui comincia il rilascio elastico ossia in corrispondenza dell'istante temporale t_2 . Visto che la flessione del piatto, essendo comunque energia elastica che viene assorbita, risulta essere istantanea si può calcolare senza incombere in errore considerevole, l'accelerazione media come la media integrale dell'accelerazione nel tempo $a(t)$ tra l'istante iniziale e l'istante in cui appunto inizia il rilascio elastico.

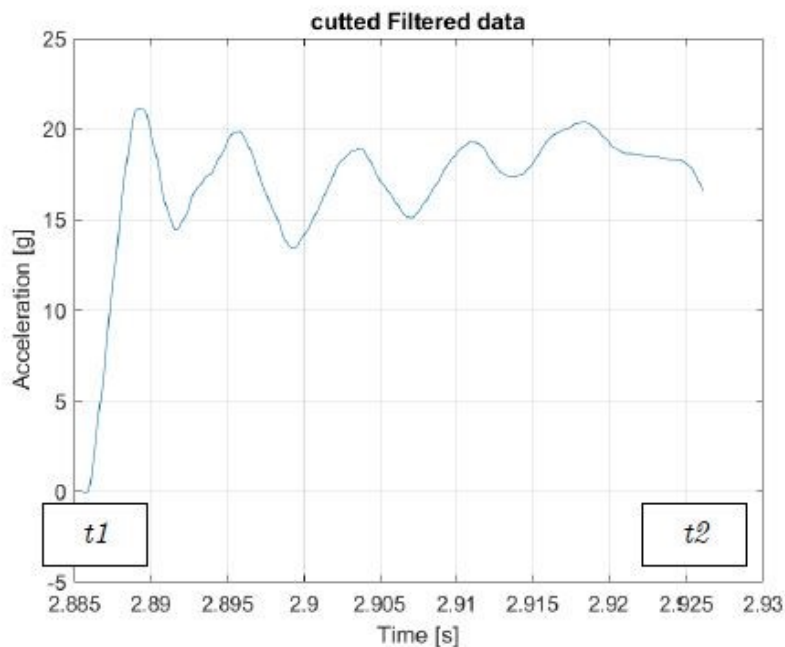


Figura 3.30 Curva accelerazione - tempo filtrata, con istanti temporali di campionamento.

Dai dati sperimentali così ottenuti ed integrando due volte l'accelerazione nel tempo si ottiene lo spostamento complessivo della traversa mobile che corrisponde a $h_1 = 109$ mm e considerando la correzione si ha uno schiacciamento complessivo di 66 mm contro i 69 mm del modello analitico.

Tale correlazione di tipo numerico-sperimentale può essere considerata valida per la scelta dell'honeycomb da utilizzare. Tale modello può essere utilizzato quale che sia il tipo di Honeycomb, basti conoscere le proprietà dal datasheet del fornitore e caratterizzare lo stesso sperimentalmente.

Si è ritenuto necessario definire le proprietà dell'honeycomb con tale grado di accuratezza in quanto non è stata considerata, nel presente elaborato, una caratterizzazione numerica del materiale honeycomb ma soltanto dei materiali compositi utilizzati, in particolare il T700 e T300 che interessano AIP e IA che sono i componenti interessati dalla quasi totalità dell'energia scambiata.

CAPITOLO 4

Modellazione numerica

L'obiettivo di questo capitolo è quello di fornire in maniera chiara le scelte effettuate per la modellazione numerica dell'assorbitore. In particolare, si andranno ad affrontare nel dettaglio i problemi riscontrati nella definizione dei contatti tra le diverse lamine del composito, le proprietà utilizzate e le condizioni al contorno imposte, nonché l'operazione di discretizzazione del componente stesso. Tale capitolo è strutturato in modo da ripercorrere i passaggi seguiti al fine di modellare l'assorbitore e riproporre numericamente il test sperimentale. Di seguito si riporta una traccia secondo cui è stata pensata tale sezione:

- Definizione e discretizzazione della geometria: in tale paragrafo si vuole porre l'attenzione sull'operazione di discretizzazione, tramite elementi shell a quattro nodi, della geometria e precedente sua semplificazione;
- Definizione di carichi e vincoli da inserire all'interno del modello: in tale paragrafo si vogliono elencare e spiegare i vincoli scelti da attribuire non solo alla massa in caduta libera ma anche alla struttura di supporto sottostante.
- Definizione del materiale: in questo paragrafo si vuole prima spiegare come RADIOSS prevede che vengano definiti i parametri da inserire nella card del materiale e successivamente vengono riportati i valori che sono stati inseriti al fine di garantire una buona corrispondenza biunivoca tra i dati numerici e sperimentali. Quest'ultimo aspetto è consultabile principalmente al paragrafo 4.4.4.
- Definizione delle proprietà: in questo paragrafo si definiscono le proprietà utilizzate al fine di definire sia un laminato e sia una struttura a pannello sandwich. L'obiettivo è appunto quello di fornire in maniera chiara i passaggi da seguire per arrivare a riprodurre il laminato reale in ambiente CAE.
- Definizione dei contatti: in questa sezione l'obiettivo è quello di andare a definire le tipologie di contatti che vengono utilizzati in questo elaborato e solo successivamente fornire i valori pratici da inserire all'interno della contact card.
- Definizione di tutti i parametri di output: in questa parte del capitolo si mostrano i passi da seguire per avere la garanzia di poter analizzare in output tutti i parametri necessari alla validazione del modello.
- Implementazioni future e risultati raggiunti: a conclusione di tali sezioni viene riportato un breve paragrafo che fornisce approfondimenti su aspetti che non sono stati trattati nel presente elaborato ma che possono essere inseriti qualora si volesse aggiungere complicazione e accuratezza a questo modello. Vengono inoltre argomentate le difficoltà incontrate in fase di modellazione.

4 Introduzione

Per l'analisi numerica si è scelto di adottare RADIOSS, software commerciale della suite Altair HyperWorks. Tale software consiste in un solutore ad elementi finiti specializzato nelle simulazioni esplicite di spostamenti grandi e non lineari come l'analisi di incidenti e/o impatti nell'industria automotive.

Nel presente lavoro di tesi si andrà ad approfondire l'utilizzo di tale software proprio nel calcolo esplicito del fenomeno di crash dell'impact attenuator, nonché assorbitore d'urto, della vettura SGe-06, prototipo FSAE elettrico della stagione 2022-2023.

La prima accortezza da seguire, prima di procedere nella modellazione, è quella di rendere omologhe le unità di misura:

Grandezza	Unità di misura
Lunghezza	Mm
Massa	Kg
Tempo	Ms
Forza	kN
Pressione	GPa
Energia	MJ

Tabella 4-1 Lista di unità di misura utilizzato all'interno dell'ambiente simulativo.

La condizione che si vuole riprodurre è quella prevista per la prova sperimentale, ossia l'assorbitore d'urto viene montato su una base che riproduce, in termini di rigidità, la monoscocca della vettura. Pertanto, se tale supporto subirà delle deformazioni plastiche allora vorrà dire che anche la monoscocca della vettura, in caso di crash, subirà delle deformazioni di tipo plastico. Queste ultime chiaramente sono da scongiurare pena l'invalidità della prova, o meglio la non riuscita progettuale.

4.1 Definizione e discretizzazione della geometria

Il modello è costituito da diversi componenti che sono elencati di seguito e visualizzabili in figura 4.1. Nel seguito dell'elaborato verranno chiamati con i nomi sintetici per brevità di trattazione:

- AIP: Anti-Intrusion Plate;
- FBH: Front Bulkhead;
- FBHS: Front Bulkhead Support;
 - Zona pedali;
 - FHB: Front Hoop Bracing;
 - FHBS: Front Hoop Bracing Support;
- AI: Anti-Intrusion.

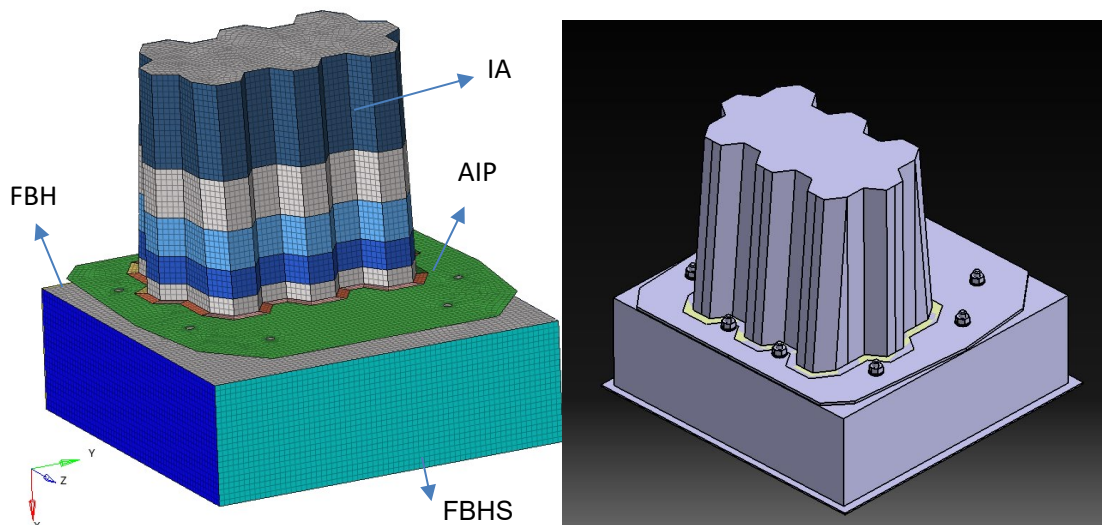


Figura 4.1 Visualizzazione modello numerico per l'IA relativo alla stagione 2022-2023.

Prima di procedere nella discussione della tipologia di mesh utilizzata è bene definire il modo in cui avviene il processo manuale di laminazione. In particolare, è tassativo andare a identificare la superficie

mediana (“midsurface”) a partire dalla quale considerare l’ordine di impilamento di ciascuna singola pelle.

Infatti, se le pelli vengono laminate a partire dallo stampo verso l’interno dello stesso e quindi verso il controstampo, è bene considerare come superficie di riferimento (ossia quella a partire dalla quale si iniziano a stendere le pelli) quella esterna dell’assorbitore. Nel caso del supporto sottostante, invece, il quale è una struttura di tipo pannello sandwich, la superficie che va considerata come base della laminazione simmetrica è proprio quella mediana.

Per poter estrarre dal componente la superficie mediana è necessario seguire la seguente procedura:

Geom → Midsurface → Surface → Displayed (or by component) → Extract

Essendo la geometria relativamente semplice, l’estrazione della superficie mediana è di facile riuscita. In caso contrario si possono utilizzare i diversi parametri di estrazione che si trovano nello stesso pannello di cui sopra.

Riguardo all’operazione di stesura della mesh sull’assorbitore è bene fare alcune precisazioni in merito alla tipologia di mesh e relativa suddivisione. Dopo aver valutato l’influenza, anche in relazione al time-step e all’onere computazionale della simulazione, della dimensione della mesh si è scelto di adottare come dimensione media degli elementi 5mm, con assenza completa di elementi triangolari che rendono la simulazione instabile. Si è infatti riscontrato un incremento di massa con una tipologia di mesh di tipo mixed, ossia caratterizzata da elementi triangolari e quadrati.

L’obiettivo dell’operazione di meshatura prevede di semplificare la geometria facendo in modo che tutte le superficie siano tali da evitare la presenza obbligatoria di elementi triangolari. Come riportato nella sezione 4.4.2 le pelli sono stese in modo da aumentare la rigidità dell’assorbitore procedendo verso il supporto alla base. Per poter garantire che, anche dal punto di vista numerico, venga considerato questo “gradiente” di rigidità procedendo verso lo sgabello è necessario definire diversi set di elementi ai quali attribuire poi la proprietà ed il materiale.

Il set può essere sia di elementi che di nodi. Siccome tali set verranno utilizzati anche nel contatto, se ne creano due per ciascun componente o per ciascuna sequenza di laminazione: uno per i nodi ed uno per gli elementi.

Per creare un set di elementi si può seguire il seguente percorso.

Pannello → create set → Surf_Ext → Component

Pannello → create set → GRNOD → Component

Con i due comandi precedenti si costruiscono i seguenti set di nodi ed elementi. Tali set devono essere richiamati selezionando, attraverso l’apposita finestra a tendina all’interno della proprietà, l’ID del set di riferimento ed associando loro un materiale.

Name	Value	Name	Value
Solver Keyword	/SURF/PART/EXT/	Solver Keyword	/GRNOD/NODE/
ID	24	ID	22
Name	SURF_EXT_AIP	Name	NODI_AIP
Include	[Master Model]	Include	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>	Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
User Comments	Do Not Export	User Comments	Do Not Export
Card Image	SURF_EXT	Card Image	GRNOD
Set type	non-ordered	Set type	non-ordered
Entity IDs	1 Components	Entity IDs	4999 Nodes
No of rows	1	Do_Not_Export_Set	<input type="checkbox"/>
	38	No of rows	50
		Data	

Figura 4.2 Set di elementi e nodi rispettivamente creati ai fini dei contatti e della definizione dei laminati.

Nel modello che si sta trattando però si è scelto di suddividere gli elementi inserendoli all'interno di componenti che vengono chiamati in maniera differente in modo da identificare il numero di plies che sono inserite per ciascuna sezione dell'assorbitore. Per poter gestire questa suddivisione si possono creare i diversi componenti e per distribuire gli elementi nei diversi componenti si seguono, dopo aver selezionato gli elementi da trasferire, i seguenti comandi:

Tools → Organize → Des. Component → Name_Component

È importante sottolineare che ciascun componente per essere letto dal software come tale, deve essere associato ad un materiale e ad una proprietà. Pertanto, dopo aver definito la proprietà ed il materiale (cfr. 4.4 e 4.5), bisogna associarle al componente. Il modo più semplice è quello di entrare all'interno dell'identificativo del componente, cliccando su di esso dal menù del modello, ed inserendo nella card del componente la proprietà e il materiale che vengono suggeriti in fase di compilazione. Di seguito viene riportata la card di un componente correttamente definita.













Name	Value	Name	Value
Solver Keyword	/PART/	ID	57
ID	58	Name	RigidBody57
Name	Massa_Caduta_Libera	Color	
Color		FE style	
FE style		Geometry style	
Geometry style		Include	[Master Model]
Include	[Master Model]	Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>	User Comments	Do Not Export
User Comments	Do Not Export	Card Image	Part
Card Image	Part	Prop_Id	(22) Massa_In_Caduta
Prop_Id	(22) Massa_In_Caduta	Mat_Id	(7) Acciaio_Fe420_Lineare
Mat_Id	(7) Acciaio_Fe420_Lineare	Rbody	
Rbody		THICK	
THICK		SPH_RESERVE_opt	
SPH_RESERVE_opt		Mat_Id	<Unspecified>

Figura 4.3 Definizione della part card per ciascun componente e definizione della card relativa al rigido.

A conferma di quanto precedente svolto è possibile controllare la corretta assegnazione di proprietà e materiale a ciascun componente andando a visualizzare l'ambiente di lavoro attraverso la differenziazione per proprietà o per materiale come visualizzato in fig.4.1, a sinistra. Per poter accedere a tale visualizzazione è necessario, dalla toolbar generalmente posizionata nella parte bassa del workspace, illuminare la selezione "By properties".

La massa in caduta libera è stata modellata con elementi shell ai quali è stato attribuito come materiale acciaio e come spessore del singolo elemento shell uno spessore di 10 mm. Per riprodurre la dinamica dell'urto si è reputato sufficiente attribuire al rigido, collegato a tutti i nodi degli elementi dell'impattore, una massa equivalente a quella di 306 Kg di cui si dispone in torre di caduta. Un aspetto da sottolineare è il fatto che la massa attribuita al rigido è pari a 295 Kg per tener conto anche della massa degli elementi shell di cui è costituito l'impattore.

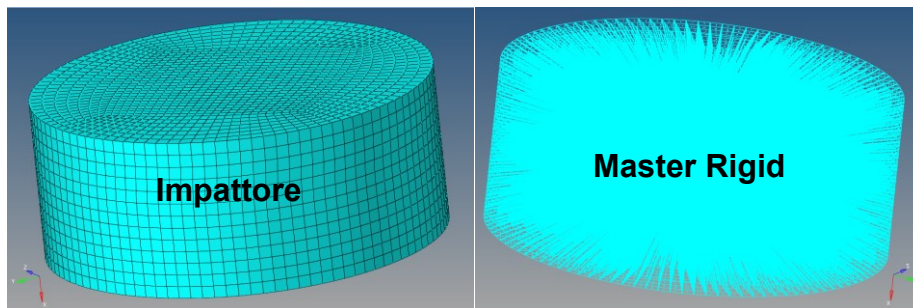


Figura 4.4 Modellazione numerica della massa battente in caduta libera. Rigido collegato ad elementi shell.

Si è scelto di non collegare il rigido direttamente a tutti i nodi dell'impatto ma solamente a quelli della superficie esterna e della faccia superiore in quanto si è voluto lasciare liberi i nodi che vanno in diretto contatto con l'assorbitore a seguito dell'impulso dinamico dell'impatto stesso. La scelta è dovuta al fatto che, essendo la simulazione impulsiva, si volevano evitare effetti dinamici dovuti all'impatto tra la massa battente e l'assorbitore stesso i quali hanno valori di rigidezza nodali completamente differenti e potrebbero generare instabilità di tipo numerico. In figura 4.2, nella parte destra, è possibile notare tale modellazione del rigido. Per quanto riguarda l'attribuzione della massa al rigido si deve procedere prima creando il rigido seguendo la seguente successione di comandi:

1D → Create Rigids

Solo successivamente si accede dal menù in alto, tramite il comando "tools", alla RBODY Manager a partire dalla quale, seguendo i comandi sotto riportati si può attribuire al rigido la massa voluta:

Card edits → Rbody Properties → Mass → 295.

Un'osservazione da fare consiste nel rimando a quanto fatto per ciascun componente precedentemente definito. Ovvero, come visibile in fig. 4.3. nella parte destra, la card da associare al componente "rigid" deve essere impostata non su part bensì su "none" in modo tale da comunicare al software che il componente che contiene il master collegato a tutti i nodi slave del rigido altro non è che un elemento di collegamento e non un componente che necessita la definizione di una proprietà o del materiale.

4.2 Definizione di vincoli e carichi

A tale rigido inoltre sono stati attribuiti anche alcune condizioni al contorno quali la velocità iniziale e la gravità oltre al vincolo di solo scorrimento in direzione X.

Si è scelto di immaginare l'impatto immediatamente a contatto con la superficie superiore della crashbox sin dall'istante iniziale. Al fine di rendere verosimile la simulazione è necessario attribuire alla massa in caduta una velocità iniziale pari alla velocità di impatto. Per considerare in maniera corretta questa velocità di impatto sono stati considerati i dati derivanti dall'accelerometro montato sulla massa battente in torre di caduta e si è fatta una media dei valori di accelerazione registrati dallo stesso nel periodo di tempo intercorso tra le due rilevazioni di -1g. Per rendere maggiormente chiaro il concetto si faccia riferimento alla figura seguente.

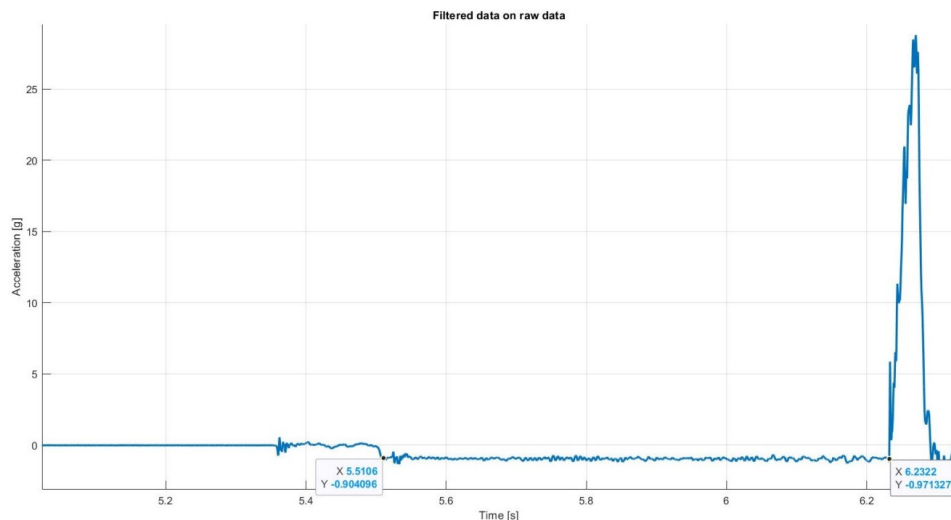


Figura 4.5 Grafico dell'accelerazione sperimentale in funzione del tempo espresso in (s). Tali dati derivano dall'accelerometro montato sopra la massa battente in torre di caduta.

Nella figura è possibile osservare i due istanti temporali che sono stati presi come estremi dell'intervallo per la stima dell'accelerazione media. Tale accelerazione media, moltiplicata per l'intervallo di tempo,

fornisce la velocità con cui la massa battente impatta la crashbox. Chiaramente, per un pre-dimensionamento oppure per una versione di debug del modello si può utilizzare anche la velocità derivante dalla formula del moto uniformemente accelerato con un errore assolutamente trascurabile.

In RADIOSS, per inserire tale valore di velocità iniziale si utilizza la funzione INIVEL, selezionabile tra le diverse card in dotazione nella libreria di Altair. È possibile inserire tale funzione seguendo il seguente percorso:

Tools → Create Cards → Boundary Conditions → INIVEL

Una volta seguito tale percorso file, soprattutto con versioni Altair successive all'anno 2018, è necessario selezionare il load collector con il tasto destro e cliccare sulla voce "references" dalla quale si aprirà il seguente menù, che per la presente trattazione, è stato compilato come di seguito.

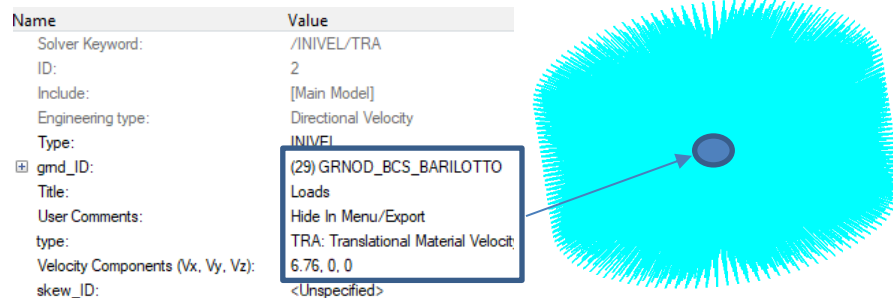


Figura 4.6 Impostazione nel modello numerico della velocità di impatto del nodo del master associato alla massa in caduta libera.

È bene sottolineare che la voce gmd_ID sta ad indicare il set di nodi, precedentemente definito, ai quali si vuole applicare questa velocità iniziale di 6.76 mm/ms. In particolare, come è possibile notare dalla figura di destra, è stato definito un rigido il cui master è collegato a tutti i nodi slave dell'impattore. In tal modo il set richiamato precedentemente non è altro che il master dell'impattore stesso con i suoi nodi slaves di riferimento.

Tale metodo permette di riprodurre il fenomeno fisico in maniera attendibile purché si disponga della velocità di impatto. Quest'ultima però non deve essere confusa con la velocità di caduta della massa calcolabile con la formula del moto uniformemente accelerato. La differenza in termini quantitativi è trascurabile ma il significato fisico ai fini numerici è diverso.

Inoltre, tale metodo è stato preferito ad un metodo analogo in cui però si immaginavano i ruoli di impattore e crashbox invertiti; in particolare il software RADIOSS permette di impostare anche una IMPVEL, ossia una velocità imposta con un certo andamento oppure con un certo valore costante, secondo cui il componente impatta su di una superficie (in questo caso il masso di acciaio che precedentemente è stato considerato in caduta libera) dotato di una certa rigidità ben definita (in questo caso assumibile infinita se comparata a quella dell'assorbitore). In tal caso però si rende necessario l'inserimento di una "damping card" (/DYREL) la quale permette un rilassamento dinamico delle onde d'urto che si generano a seguito dell'impatto. Tali considerazioni esulano dallo scopo di tale elaborato e pertanto si rimanda a [8] per ulteriori informazioni.

Tra i vincoli attribuibili a tale rigido vi sono anche i vincoli legati alla gravità e quelli legati alla direzione di movimentazione dello stesso che, conformemente a quanto accade in torre di caduta, le guide del carrello scorrevole obbligano la massa a muoversi in direzione X. Pertanto, per perseguire tale scopo, si utilizza un vincolo di tipo carrello applicato in corrispondenza del master del rigido precedentemente definito.

Di seguito viene riportato l'insieme di vincoli che sono attribuiti al master del rigido ovvero al nodo master collegato a tutti i nodi slaves presenti sulla superficie esterna e faccia superiore dell'assorbitore.

Name	Value
Solver Keyword:	/GRAV
ID:	3
Include:	[Main Model]
Engineering type:	Directional Acceleration
Type:	GRAV
gmd_ID:	(31) GRNOD_GRAVITY
Title:	Loads
User Comments:	Hide In Menu/Export
fct_ID(T):	(2) Gravity
Dir:	X
skew_ID:	<Unspecified>
sens_ID:	<Unspecified>
Ascale(X):	1000.0
Fscale(Y):	0.00981
Metadata	

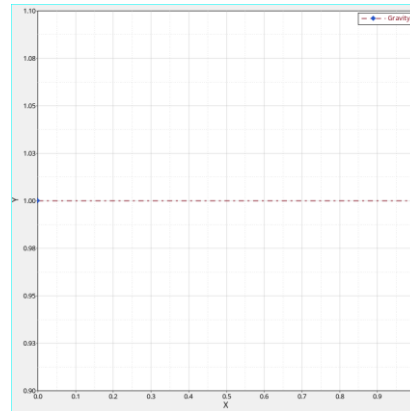


Figura 4.7 Inserimento nel modello numerico della funzione gravità.

Come visibile dalla figura precedente, per definire la gravità, si è resa necessaria la definizione di una curva apposita ed inserita all'interno della card stessa esattamente come fosse una funzione.

I comandi da digitare per tale scopo sono i seguenti:

Tools → Create Cards → Boundary Conditions → GRAV.

Infine, per definire il vincolo alla base, si è scelto di inserire degli appoggi lungo tutto il perimetro di base dello sgabello. In realtà questo modo di modellare il vincolo non è propriamente corretto in quanto lo sgabello è incollato su di una piastra metallica che permette la distribuzione del carico non solo sullo spigolo dello sgabello bensì sulla piastra stessa e di riflesso sulla base della torre. In prima approssimazione, si è modellata in tal modo la dinamica del crash ma per sviluppi futuri si può considerare di modellare in maniera differente, magari inserendo anche l'applicativo strutturale, l'assorbitore d'urto e la piastra di supporto.

Per definire tale vincolo si può seguire il seguente percorso file. Tale percorso è utilizzabile per tutti i diversi vincoli che sono stati definiti.

Tools → Create Cards → Boundary Conditions → BCS → DY=DZ=0

4.3 Definizione del materiale

Il comportamento elasto-plastico degli elementi shell presenti nel modello sarà utilizzato al fine di descrivere un materiale che presenta diversi layer del composito con almeno un layer con caratteristiche ortotrope. Al fine di perseguire tale scopo si sceglie di utilizzare come materiale la card COMP SH_25 con caratteristiche ortotrope di elasticità, due modelli di plasticità e un criterio di cedimento basato sul comportamento fragile del materiale una volta raggiunta la tensione di rottura, proprietà del materiale.

Prima di riportare la card del materiale completa, di seguito vengono spiegati i parametri che verranno successivamente utilizzati per definire completamente il materiale.

4.3.1 Comportamento tensionale

Il comportamento del materiale comincia con una fase elastica per poi raggiungere la tensione di snervamento dove il materiale può raggiungere un comportamento elasto-plastico che viene valutato con il criterio di Tsai-Wu. Il massimo valore del coefficiente di danneggiamento che nel seguito viene considerato, permette di separare la fase elastica da quella elasto-plastica.

Di seguito si riportano le formule che vengono considerate per la modellazione numerica del materiale composito e che sono consultabili in [7].

$$\sigma_{11} = E_{11}(1 - d_1)\epsilon_{11} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{22} = E_{22}(1 - d_2)\epsilon_{22} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{12} = G_{12}(1 - d_1)(1 - d_2)\gamma_{12} \quad (4.3)$$

Dove d_1 e d_2 sono i fattori di danno tensionali.

- ϵ_{t1} deformazione di rottura in direzione 1 per la tensione;
- ϵ_{m1} massima deformazione in direzione 1;
- ϵ_{t2} deformazione di rottura in direzione 2 per la tensione;
- ϵ_{m2} massima deformazione in direzione 2;
- d_{max} massimo danneggiamento (rigidezza rimanente dopo il fallimento).

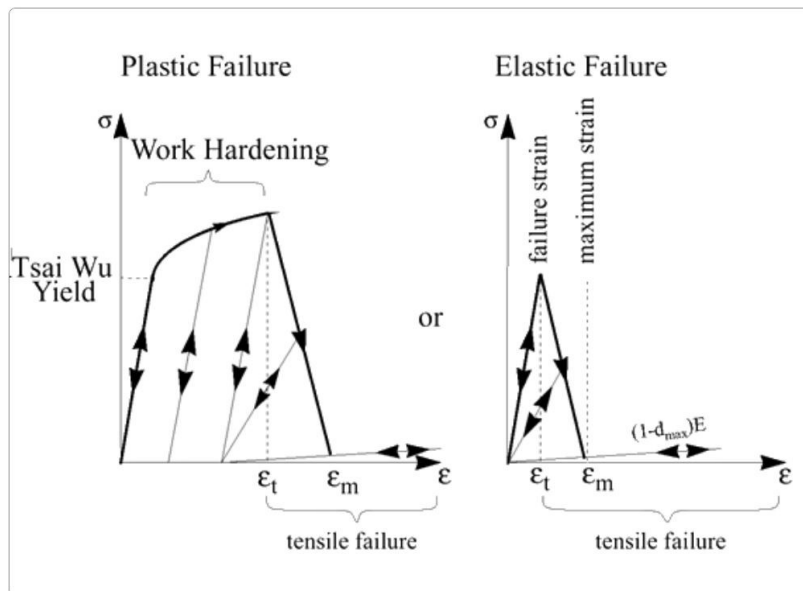


Figura 4.8 Curva elasto-plastica prevista per il modello di Tsai-Wu. Paragone con grafico puramente elastico.

4.3.2 Comportamento a taglio: Delaminazione

Analogamente per la delaminazione, dove è per lo più interessato il comportamento a taglio si considera un terzo coefficiente di danneggiamento che deve essere opportunamente settato. Le equazioni riguardanti la delaminazione sono:

$$\sigma_{31} = G_{31}(1 - d_3)\gamma_{31} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{23} = G_{23}(1 - d_3)\gamma_{23} \quad (4.5)$$

Ai fini della modellazione numerica tale parametro di danno non è stato definito con un valore esatto bensì è stato definito un valore massimo che tale parametro può assumere, oltre il quale il cedimento è da intendersi raggiunto indipendentemente dal valore della tensione massima inserita in fase di caratterizzazione numerica.

4.3.3 Comportamento plastico

Il comportamento plastico del materiale è basato sul criterio di Tsai-Wu ed è sintetizzato tramite una funzione della tensione. In particolare, con riferimento a [7] si ha che $F(\sigma)$ può assumere i seguenti valori:

- $F(\sigma) < 1$: comportamento elastico;
- $F(\sigma) = 1$ condizione in cui si raggiunge l'ammissibile plastico;
- $F(\sigma) > 1$ condizione in cui si supera l'ammissibile statico e quindi si considera tale situazione non ammissibile.

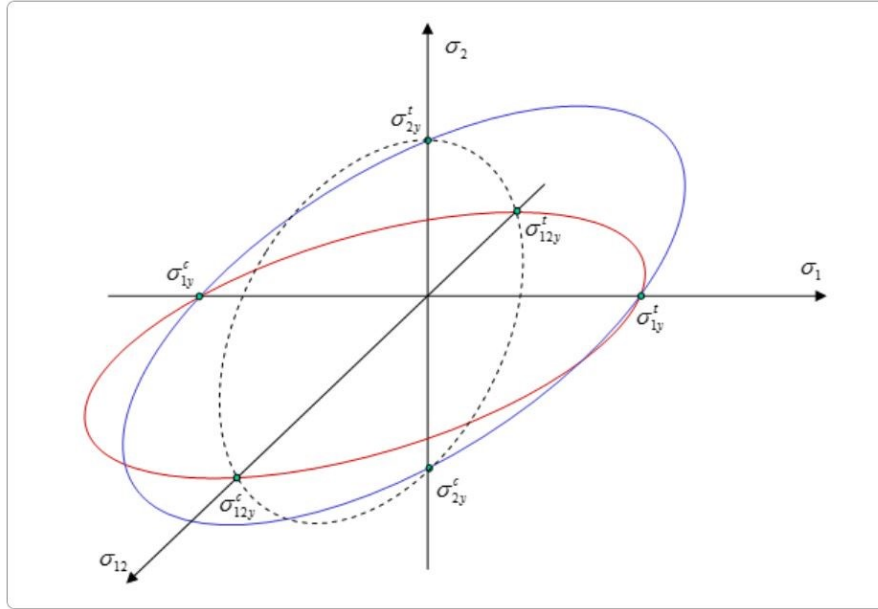


Figura 4.9 Comportamento plastico secondo il criterio di Tsai-Wu.

Il comportamento a rottura è regolato da due parametri principalmente:

1. Lavoro plastico: W_p^{\max}
2. Massimo valore della funzione di snervamento $F(\sigma)$.

Se una delle due condizione viene raggiunta il materiale va considerato danneggiato irreversibilmente. Di seguito si rappresenta l'evoluzione della superficie limite oltre la quale si ha rottura, al variare dell'incrudimento del materiale.

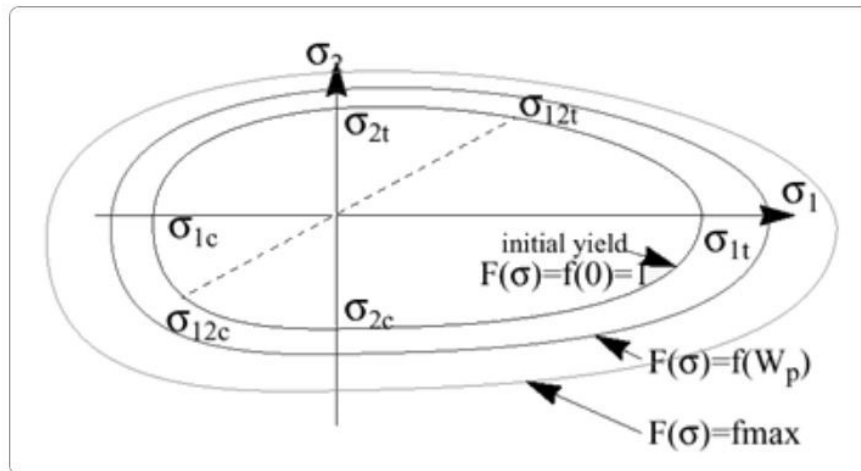


Figura 4.10 Evoluzione delle condizioni a rottura al variare dello snervamento del materiale.

Il modello permette la simulazione del comportamento fragile del materiale a seguito della generazione delle cricche. Nel caso di un materiale con un solo layer nel momento in cui il lavoro plastico raggiunge il suo massimo valore allora l'elemento deve essere considerato rotto e quindi si è raggiunta la condizione di failure dell'elemento con conseguente eliminazione dello stesso. Nel caso di componenti in materiale composito realizzati con diversi layers, diverse condizioni di failure possono verificarsi. Per le differenti tipologie di failure si rimanda a [7] mentre, per la presente trattazione, si riportano soltanto le

due casistiche maggiormente utilizzate e che si è scelto di implementare nella simulazione numerica in trattazione.

- Se $W_p > W_p^{\max}$ oppure ugualmente in termini tensionali, in direzione 2 per tutti i layers;
- Se $W_p > W_p^{\max}$ oppure ugualmente in termini tensionali in direzione 1 e 2 per ciascun layer.

La scelta di una di queste modalità viene effettuata con il parametro I_{off} .

4.4 Caratterizzazione numerica del materiale

Con riferimento alle prove di caratterizzazione sperimentale si è scelto di eseguire una caratterizzazione numerica che replicasse, nella maniera più accurata possibile, le prove di trazione e compressione eseguite in laboratorio. La metodologia che si è scelta al fine di raggiungere tale obiettivo è la seguente: si è modellato, assumendo lo spessore del provino trascurabile rispetto alle altre due dimensioni, un elemento shell di dimensione 2x2 settando i valori numerici della card del materiale in modo tale che replicassero una curva di tensione-deformazione, sia in compressione che in trazione, simile a quella ottenuta sperimentalmente.

La caratterizzazione sperimentale mono-elemento si basa su quanto raffigurato in figura 4.9. con riferimento a [11].

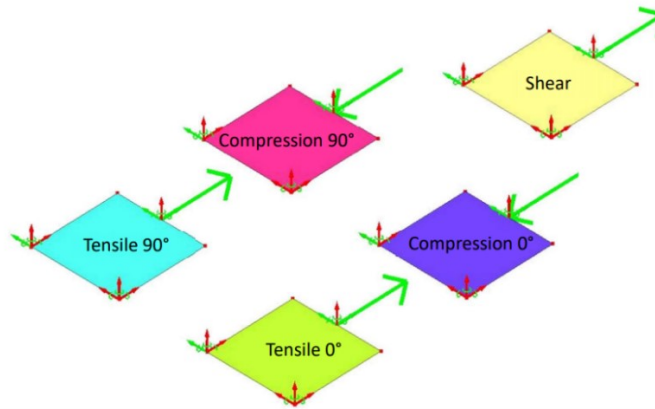


Figura 4.11 Caratterizzazione numerica del materiale: compressione, trazione e taglio di un elemento 2x2 [11].

La velocità con cui l'elemento viene trazonato o compresso viene imposta sull'elemento attraverso una funzione costante e pari al valore con cui si fa muovere la traversa mobile nelle prove di laboratorio. In tal senso, si definisce un vincolo dinamico come è stato fatto per il rigido della massa battente. Infatti, viene inserita, ortogonalmente ad un edge dell'elemento 2x2, una direzione di movimentazione lungo la quale far muovere l'edge e quindi porre in trazione l'elemento. I passaggi da seguire sono i medesimi del master del rigido della massa battente con la differenza però che il vincolo dinamico viene attribuito ad un edge anziché ad un nodo.

Dal momento che nella prova sperimentale la velocità di movimentazione della traversa mobile era di 2 mm/min, in ambiente CAE è stata impostata una velocità in direzione 1, negativa o positiva a seconda che si tratti della caratterizzazione a trazione oppure a compressione, del sistema di riferimento globale e non di quello locale del singolo elemento.

Per definire una condizione di taglio, si sono definiti dei vincoli atti a determinare tale comportamento di shear lungo l'elemento. Pertanto, si è fatto in modo di applicare la velocità di movimentazione delle traversa mobile sempre lungo un edge, ma si è bloccata la traslazione di uno degli edge ortogonali a tale direzione.

Come dimensione della mesh si è adottato un sizing pari a 2 mm e per ciascuno degli elementi, shell a quattro nodi (QUAD_EL), raffigurato in figura 4.9. si possono notare i gradi di vincolo bloccati in rosso ed invece quelli lasciati liberi in verde.

Per quanto riguarda la riproduzione della prova di trazione si è utilizzata una singola ply di materiale composito mentre per il caso a +45° (analogamente per -45°) si sono adottate due plies in un layup bilanciato.

Tralasciando tutti i parametri che sono di facile intuizione e che, una volta eseguita la caratterizzazione sperimentale, sono di semplice definizione ci si vuole soffermare su alcuni parametri che invece devono essere settati opportunamente per avere una buona correlazione numerico-sperimentale.

Uno degli aspetti importanti da caratterizzare all'interno della card del materiale e che identifica il comportamento strutturale dello stesso è la deformazione che comanda la rottura dell'elemento e la conseguente eliminazione. In particolare, vengono anche definiti in accordo al valore di deformazione anche il criterio di danneggiamento e di fallimento.

Come riportato all'interno della guida di RADIOSS [7] le deformazioni che vengono inserite all'interno della card del materiale e che sanciscono il suo stato deformativo critico sono le seguenti:

Proprietà	Descrizione	T700	T300
ϵ_{t1}	Deformazione a rottura nella direzione di materiale 1 a partire dalla quale diminuisce la tensione.	0.0161	0.0110
ϵ_{m1}	Massimo valore di deformazione a trazione in direzione 1 a partire dalla quale la tensione nell'elemento viene settata ad un valore dipendente dal d_{max} .	0.0165	0.0111
ϵ_{t2}	Deformazione a rottura nella direzione di materiale 2 a partire dalla quale diminuisce la tensione.	0.0143	0.0107
ϵ_{m2}	Massimo valore di deformazione a trazione in direzione 2 a partire dalla quale la tensione nell'elemento viene settata ad un valore dipendente dal d_{max} .	0.0148	0.0108

Tabella 4-2 In questa tabella si riportano i valori di deformazione per il T700 e T300 che vengono utilizzati nel presente modello numerico.

A seguito della caratterizzazione numerica si sono andati compilando i diversi campi della card del materiale composito che per la seguente trattazione è il /MAT/LAW25 (COMPSH).

La card del materiale che si è scelta di utilizzare è la /MAT/LAW25 (COMPSH). Essa prevede due differenti formulazioni. La prima è quella di Tsai-Wu e la seconda è invece quella di CRASURV. Per quanto riguarda la prima formulazione che è quella utilizzata in fase preliminare, non richiede l'inserimento delle tensioni di rottura e dell'energia assorbita dal materiale, nonché integrale della curva tensione deformazione, output della prova di trazione o compressione sperimentale.

La formulazione di Tsai-Wu (lform=0) prevede che il materiale è assunto essere elastico ed ortotropo prima che il criterio venga raggiunto. Il materiale diventa non lineare dopo questo punto. Il limite del criterio di Tsai-Wu può essere settato basandosi sul lavoro plastico e sulla velocità di deformazione per modellare l'incrudimento del materiale.

Tale criterio permette la simulazione di un comportamento a rottura duttile di componenti ortotropi. I comportamenti plastici e a rottura sono differenti in trazione e compressione. Di seguito sono presentati i grafici del criterio di CRASURV in relazione all'incrudimento ed addolcimento del materiale.

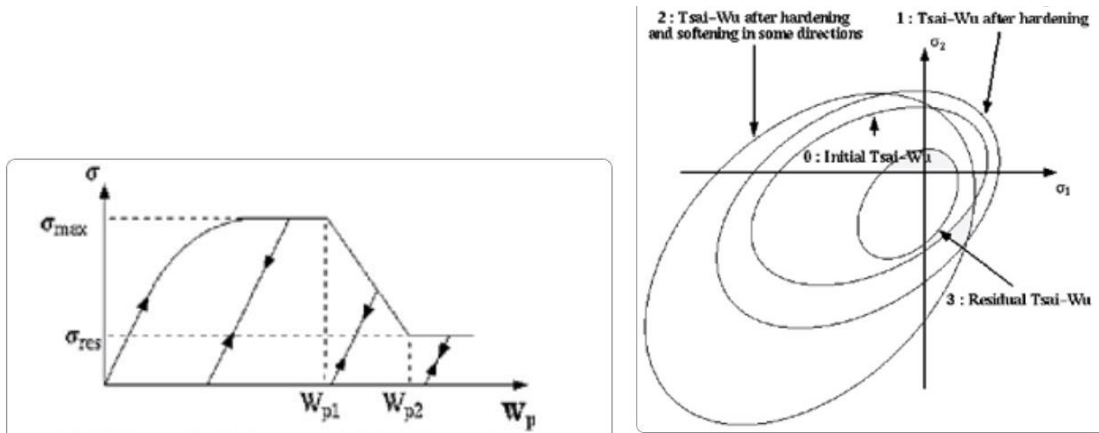


Figura 4.12 Grafico di CRASURV al variare dell'incrudimento del materiale.

Per iniziare a definire correttamente il criterio di Crasurv si sceglie di partire dalla formulazione "plastica" di tale criterio ove il numero di parametri risulta essere inferiore e quindi maggiormente gestibile in termini di variabilità. Pertanto, si sceglie di settare il parametro $l_{form} = 0$.

In tal caso, il criterio di Tsai-Wu è funzione del lavoro plastico e della velocità di deformazione e permette la simulazione della rottura fragile dovuta alla formazione di una cricca. Permette inoltre di considerare, in maniera differente, il comportamento plastico e a rottura in trazione, compressione e taglio. Di seguito viene riportata una curva tensione-deformazione in relazione alle grandezze che poi saranno presenti all'interno della card del materiale e che andranno opportunamente calibrate.

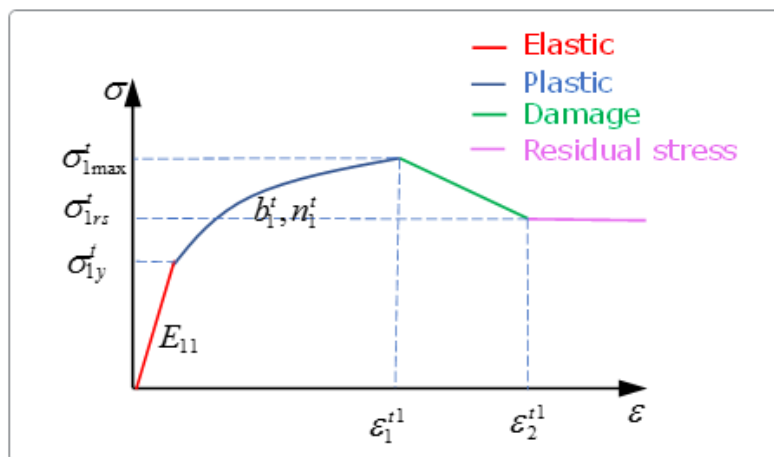


Figura 4.13 Grafico di tensione in direzione 1 [7] e definizione delle grandezze di deformazione nelle diverse direzioni.

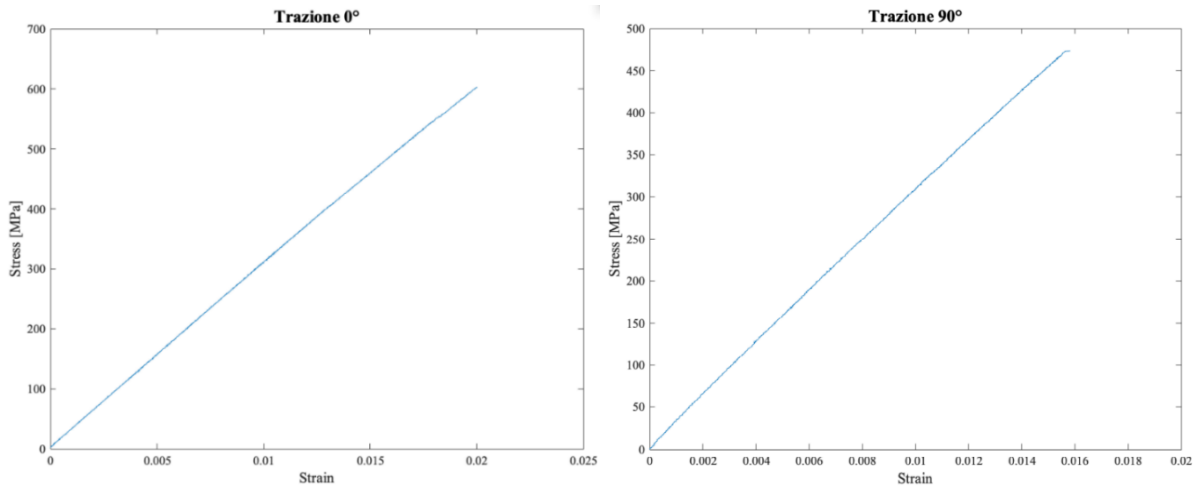


Figura 4.14 Grafici sperimentali ottenuti dalla caratterizzazione del T700 ottenuta in laboratorio.

Le curve sperimentali di Fig.4.11. sembrano non avere una relazione diretta con quella rappresentata in Fig.4.10, almeno in termini di andamento. Tale critica è corretta in quanto le curve ottenute in laboratorio per il T700 non sono state effettuate in condizioni di rottura ma sono limitate alla condizione di lavoro in campo elasto-plastico. Siccome però si inizia a caratterizzare il materiale nel campo elasto-plastico con la formulazione di Tsai-Wu, tali curve sono valide entro il campo elasto-plastico e pertanto sono state utilizzate in tal senso per trovare i seguenti valori numerici di ciascuna proprietà meccanica del materiale.

Quanto spiegato ed eseguito per il T700 è valido per tutti gli altri materiali utilizzati, come il T300, M46J e IMS, nonché l'Honeycomb. I grafici sperimentali di tutti questi materiali sono consultabili nel capitolo 3 del presente elaborato oppure in [8] in maniera più discorsiva.

Di seguito vengono riportati i dati inseriti per il materiale T700 in condizioni di plasticità, ossia senza inserire i valori relativi alla rottura. Si presti anche attenzione allo spessore della ply utilizzata: a parità di materiale, se lo spessore della ply utilizzata è diversa da quella adottata nella presente trattazione è bene controllare criticamente ogni singolo valore delle seguenti tabelle ed eventualmente aggiornarlo.

M25_COMP SH		
GG200P_WS_100_T700_t=0.22		
Rho_Initial [kg/m³]	<i>Densità del materiale</i>	<i>1.52e-06</i>
E11 [GPa]	<i>Modulo elastico in direzione 1</i>	<i>55.0</i>
E22 [GPa]	<i>Modulo elastico in direzione 2</i>	<i>55.0</i>
NU12	<i>Coefficiente di Poisson in direzione 12</i>	<i>0.056</i>
E33 [GPa]	<i>Modulo elastico in direzione ortogonale al piano 1-2</i>	<i>0.0</i>
G12 [GPa]	<i>Modulo elastico a taglio in direzione 1-2</i>	<i>4.27</i>
G23 [GPa]	<i>Modulo elastico a taglio in direzione 2-3</i>	<i>3.0</i>

G31 [GPa]	<i>Modulo elastico a taglio in direzione 1-3</i>	3.0
SIG1_yt [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 1 in trazione</i>	0.747
SIG2_yt [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 2 in trazione</i>	0.498
SIG1_yc [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 1 in compressione</i>	0.427
SIG2_yc [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 2 in compressione</i>	0.251
SIG12_yc [GPa]	<i>Tensione di snervamento in compressione in direzione 1-2</i>	0.128
SIG12_yt [GPa]	<i>Tensione di snervamento in trazione in direzione 1-2</i>	0.128

Tabella 4-3 Tabella delle proprietà relativa al materiale commercialmente noto come T700.

M25_COMP SH		
GG204_T2_IMP504BS_t=0.23_T300		
Rho_Initial [kg/m³]	<i>Densità del materiale</i>	1.52e-06
E11 [GPa]	<i>Modulo elastico in direzione 1</i>	51.06
E22 [GPa]	<i>Modulo elastico in direzione 2</i>	51.3
NU12	<i>Coefficiente di Poisson in direzione 12</i>	0.04
E33 [GPa]	<i>Modulo elastico in direzione ortogonale al piano 1-2</i>	0.0
G12 [GPa]	<i>Modulo elastico a taglio in direzione 1-2</i>	3.0
G23 [GPa]	<i>Modulo elastico a taglio in direzione 2-3</i>	3.0
G31 [GPa]	<i>Modulo elastico a taglio in direzione 1-3</i>	3.0
SIG1_yt [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 1 in trazione</i>	0.575
SIG2_yt [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 2 in trazione</i>	0.53
SIG1_yc [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 1 in compressione</i>	0.269
SIG2_yc [GPa]	<i>Tensione di snervamento in direzione 2 in compressione</i>	0.199
SIG12_yc [GPa]	<i>Tensione di snervamento in compressione in direzione 1-2</i>	0.09
SIG12_yt [GPa]	<i>Tensione di snervamento in trazione in direzione 1-2</i>	0.09

Tabella 4-4 Tabella delle proprietà relativa al materiale commercialmente noto come T300.

In appendice [A] vengono riportate le card di tutti gli altri materiali che vengono utilizzati nel presente modello numerico. In particolare, si possono trovare le card, correlate sperimentalmente, dei seguenti materiali dei quali non si conoscono le proprietà a rottura:

- CFRP: M46J;
- CFRP UD: IMS_t=0.1.

Con questi valori che sono riportati nelle due tabelle precedenti, si può iniziare la fase di debug del modello per quelli che sono i primi problemi che si possono palesare in termini di contatti, materiale, proprietà o numerici. Per poter iniziare a fare indagini di tipo quantitativo è necessario invece andare ad aggiungere a quelle che sono le caratteristiche meccaniche fino al campo plastico anche quelle a rottura.

M25_COMP SH			
Proprietà	Definizione	GG204_T2_IMP504BS_ t=0.23_T300	GG200P_WS_100_ t=0.22_T700
ϵ_{t1}	Deformazione a rottura nella direzione di materiale 1 a partire dalla quale diminuisce la tensione.	0.016	0.0109
ϵ_{m1}	Massimo valore di deformazione a trazione in direzione 1 a partire dalla quale la tensione nell'elemento viene settata ad un valore dipendente dal d_{max} .	0.0165	0.0111
ϵ_{t2}	Deformazione a rottura nella direzione di materiale 2 a partire dalla quale diminuisce la tensione.	0.0143	0.0107
ϵ_{m2}	Massimo valore di deformazione a trazione in direzione 2 a partire dalla quale la tensione nell'elemento viene settata ad un valore dipendente dal d_{max} .	0.0148	0.0108
d_{max}	Valore massimo del danneggiamento, necessariamente <1.	0.999	0.999
$W_{p_{max}}$ [MJ]	Valore massimo del lavoro plastico per unità di volume per ciascun elemento shell	0.0	0.0
$W_{p_{Ref}}$ [MJ]	Lavoro plastico di riferimento per unità di volume *	1.0	1.0
I_{off}	Per ciascun layer di elemento questo flag controlla l'eliminazione o il mantenimento dell'elemento shell a seconda del modo di rottura che si manifesta.	6	6

I_{cc}	Parametro atto a pesare l'influenza della velocità di deformazioni sulle grandezze tensionali e sul massimo valore di lavoro plastico	<i>1</i>	<i>1</i>
b_{1t}	Parametro di incrudimento plastico in direzione 1 che di default è nullo	<i>24.05</i>	<i>5.42</i>
b_{2t}	Parametro di incrudimento plastico in direzione 2 che di default è nullo	<i>21.99</i>	<i>50.42</i>
-b_{1c}	Parametro di incrudimento plastico in direzione 1, per il caso di compressione, che di default è nullo	<i>4.42</i>	<i>12.42</i>
b_{2c}	Parametro di incrudimento plastico in direzione 2, per il caso di compressione, che di default è nullo	<i>4.49</i>	<i>15.99</i>
b_{12t}	Parametro di incrudimento plastico in direzione 1-2, per il caso di trazione, che di default è nullo	<i>15.0</i>	<i>7.1</i>
EPS1_t1	Valore della deformazione tale da dare inizio alla fase di addolcimento in trazione per la direzione 1	<i>0.011</i>	<i>0.016</i>
EPS2_t1	Valore della deformazione tale da dare inizio alla fase di addolcimento in trazione per la direzione 2	<i>0.011</i>	<i>0.163</i>
EPS1_t2	Valore della massima deformazione tale da dare inizio alla fase di addolcimento in trazione per la direzione 1	<i>0.0107</i>	<i>0.0143</i>
EPS2_t2	Valore della deformazione massima tale da dare inizio alla fase di addolcimento in trazione per la direzione 2	<i>0.0108</i>	<i>0.0145</i>
EPS1_c1	Valore della deformazione tale da dare inizio alla fase di addolcimento in compressione per la direzione 1	<i>0.014</i>	<i>0.0116</i>
EPS2_c1	Valore della deformazione tale da dare inizio alla fase di addolcimento in compressione per la direzione 2	<i>0.01428</i>	<i>0.0117</i>
EPS1_c2	Valore della massima deformazione tale da dare inizio alla fase di addolcimento in compressione per la direzione 1	<i>0.01225</i>	<i>0.0104</i>

EPS2_c2	Valore della deformazione massima tale da dare inizio alla fase di addolcimento in compressione per la direzione 2	<i>0.123</i>	<i>0.0105</i>
W1p_{max_t} [MJ]	Valore massimo del lavoro plastico per unità di volume per ciascun elemento shell in direzione 1 per il caso di trazione	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
W1p_{max_c} [MJ]	Valore massimo del lavoro plastico per unità di volume per ciascun elemento shell in direzione 1 per il caso di compressione	<i>0.0028</i>	<i>0.00152</i>
W2p_{max_t} [MJ]	Valore massimo del lavoro plastico per unità di volume per ciascun elemento shell in direzione 2 per il caso di trazione	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
W2p_{max_c} [MJ]	Valore massimo del lavoro plastico per unità di volume per ciascun elemento shell in direzione 1 per il caso di compressione	<i>0.00135</i>	<i>0.00145</i>
W12p_{max} [MJ]	Valore massimo del lavoro plastico per unità di volume per ciascun elemento shell	<i>0.00481</i>	<i>0.00494</i>

Tabella 4-5 Tabella che fornisce i valori da inserire all'interno del modello per caratterizzare numericamente i materiali quali T700 e T300.

*Tale valore è da variare nel caso in cui si cambino unità di misura utilizzate: se le unità di misura sono quelle riportate in apertura di capitolo allora il valore da inserire per tale parametro è 1. Viceversa, è necessario inserire il valore 0.

Si osservi che la caratterizzazione effettuata, in particolare a riguardo del lavoro plastico massimo oltre il quale si ha cedimento, è maggiormente accurata per il caso di compressione. Questo è in linea ed è dunque giustificato da quanto riportato nel capitolo 2 sulla modalità di danneggiamento dei materiali compositi, in particolare tubi, ai quali questo modello si ispira.

4.5 Definizione delle proprietà: /PROP/TYPE11 (SH_SANDW)

Per questa trattazione si è scelto di utilizzare una delle proprietà disponibili dalla biblioteca del software RADIOSS: /PROP/TYPE11_(SH_SANDW). Questa proprietà è utilizzata per definire delle strutture composite di tipo sandwich modellate con elementi shell. È possibile definire un composito sandwich con diversi layers e ciascun layer può essere caratterizzato da differenti materiale, spessore, posizione del layer nello spessore della parete e direzione di laminazione.

Si osservi che nella definizione del composito è necessario identificare anche le normali degli elementi shell che individuano la faccia della lamina, a partire dalla quale si sviluppa il laminato. In particolare, la superficie visualizzata è proprio quella a partire dalla quale si iniziano ad impilare le pelli di materiale composito. Pertanto, impostando lo spessore della singola ply e definendo la midsurface di ciascuna lamina si costruisce la sequenza di impilaggio del composito. Nel seguito si mostrano le modalità attraverso cui Radioss coglie lo spessore della lamina con riferimento alla somma dello spessore delle singole plies.

Inoltre, non è sufficiente soltanto esprimere la direzione di laminazione ortogonale alla faccia, bensì è necessario definire la direzione secondo cui le lamine vengono stese ossia la direzione principale del composito secondo cui le fibre sono maggiormente orientate (nel caso in discussione la direzione X).

Di seguito vengono riportate le direzioni di laminazione e la definizione della direzione di impilaggio delle singole plies che non può che essere ortogonale a quella di stesura della lamina.

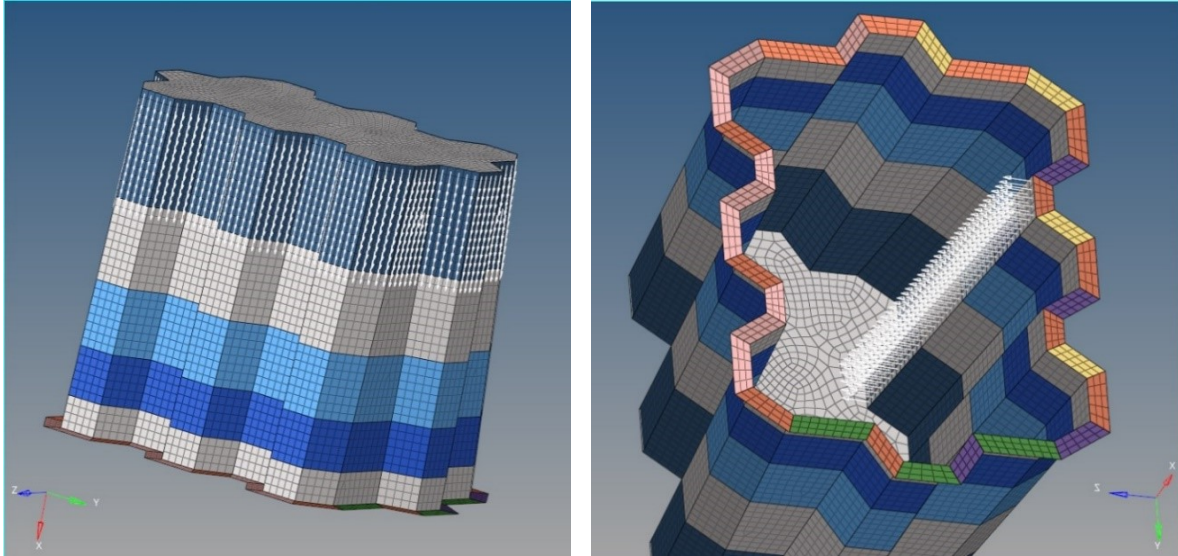


Figura 4.15 Da sinistra verso destra la direzione di laminazione delle fibre e le normali alle plies distese.

Per identificare quanto appena esposto è necessario definire un set di elementi a cui vengano attribuite le proprietà. Immaginando di aver già effettuato la scelta degli elementi da inserire in ciascun set di nodi ed elementi a cui associare la proprietà, si prosegue con l'attribuzione di quest'ultima al set.

Con riferimento a quanto riportato nella guida di Altair RADIOSS si deve definire, rispetto al sistema di riferimento globale, l'orientazione di ciascuna singola lamina nel piano.

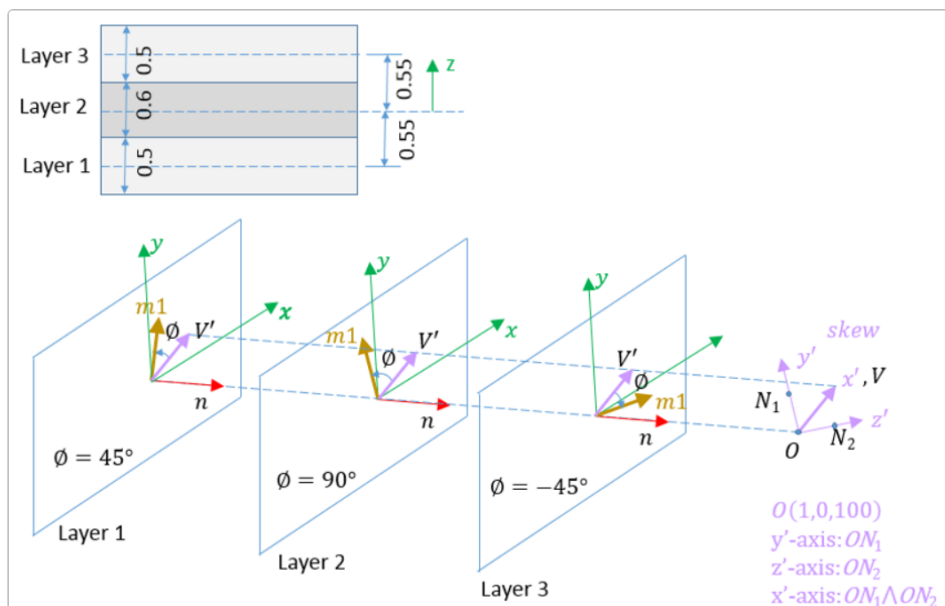


Figura 4.16 Orientazione di ciascun layer all'interno del pannello composito con riferimento al vettore che ne indica l'orientazione.

Segue la rappresentazione della proprietà che, da sinistra verso destra, esprime rispettivamente l'angolo di inclinazione delle fibre, lo spessore della singola ply, l'altezza rispetto alla faccia esterna del laminato (esterna per la trattazione in essere, potrebbe essere anche quella interna qualora la sequenza di laminazione fosse a normale invertita) ed infine il tipo di materiale utilizzato. Nella definizione della coordinata Z è necessario considerare lo spessore della prima ply e sommare il semi-spessore della seconda ply. Così, in cascata per tutte le plies successive.

	Phi	Thick	Z	m	F_weight
1	0.0	0.22	0.11	(1) GG200P_WS_100_T700	0.0
2	0.0	0.22	0.33	(1) GG200P_WS_100_T700	0.0
3	0.0	0.22	0.55	(1) GG200P_WS_100_T700	0.0
4	0.0	0.22	0.77	(1) GG200P_WS_100_T700	0.0
5	0.0	0.22	0.99	(1) GG200P_WS_100_T700	0.0
6	0.0	0.22	1.21	(1) GG200P_WS_100_T700	0.0

Tabella 4-6 Tabella identificativa della card del materiale composito con le diverse plies con orientazione, spessore, quota e tipologia di materiale.

La sommatoria dello spessore delle singole plies deve essere inserito all'interno della voce "Thick". Nel caso si commetta un errore nel definire la sequenza di laminazione con i relativi spessori, si avrà un warning nel file di output (0000.out) secondo cui, attraverso formule di compensazioni disponibili in [7] il software andrà collocando lungo lo spessore del composito ciascuna midsurface in modo da minimizzare la differenza di spessore inserita rispetto a quella calcolata sommando i singoli spessori della proprietà.

Il concetto con cui è stato formulato il composito è spiegato nella figura seguente. In particolare, per poter impilare correttamente le plies di carbonio le une sulle altre si sceglie di procedere, a partire dalla prima pelle, sommando la quota Z per ciascuna ply come lunghezza di semispessore. Più semplicemente il calcolo da effettuare, soprattutto nel caso di pelli di carbonio con singoli spessori differenti e non come nel caso di fig.4.1, è il seguente:

Spessore Ply di carbonio (T)	Quota di impilaggio (Formola)	Valore
0.22	$z = T/2$	0.11
0.22	$z = T/2 + T/2 + T/2 = T/2 + T$	0.33

Tabella 4-7 Tabella per inserimento spessori e quote di impilaggio composito.

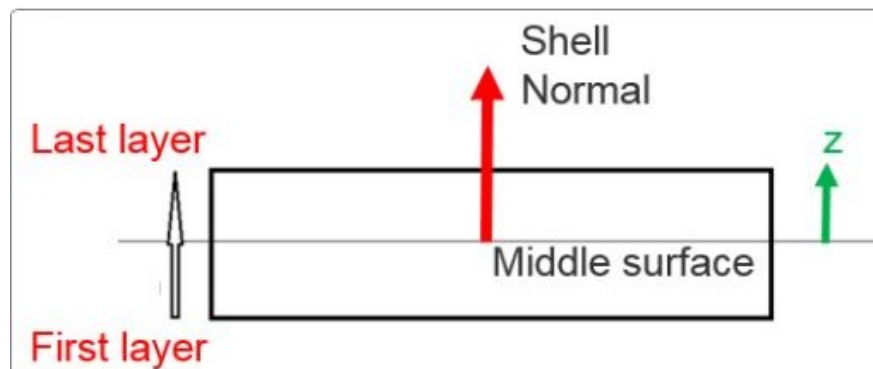


Figura 4.17 Definizione della superficie media nel pannello composito dal primo all'ultimo layer [7].

Di seguito viene riportata la card della proprietà adottata e successivamente verranno argomentati i singoli parametri introdotti.

Name	Value
Solver Keyword:	/PROP/SH_SANDW/
ID:	14
Name:	Al_6Plies_Flangia_2/PROP/TYPE11_(SH_SANDW)
Color:	
Include:	[Main Model]
Defined:	<input checked="" type="checkbox"/>
CommentEnumField:	1:Hide in Menu/Export
Card Image:	P11_SH_SANDW
Ishell:	12:QBAT Shell Formulation.
Ismttr:	4:Full Geometric Nonlinearities.
Ish3n:	0:Use Value in /DEF_SHELL.
Idrll:	0:Default, Set to 2.
P_Thick_Fail:	
Hm:	0.0
Hf:	0.0
Hr:	0.0
Dm:	0.0

Dm:	0.0
Dn:	0.0
N:	6
Data: Phi, ...:	
Istrain:	1:Yes.
Thick:	1.32
Ashear:	0.0
Ithick:	1:Thickness Change is Taken into Account.
Iplax:	2:Radial Return.
# Vector_base_node:	
# Vector_end_node:	
Vx:	0.0
Vy:	0.0
Vz:	1.0
Iskew:	<Unspecified>
Iorth:	0:The First Axis of Orthotropy is Maintained at Constant A...
Ipos:	1:All Layer Postions Zl Must be User-Defined.

Figura 4.18 Card della proprietà /PROP/SH_SANDW/ inserita all'interno del modello numerico [7].

Con riferimento alla suddetta proprietà, si è scelto di utilizzare la formulazione degli elementi che compete alla selezione "Ishell" 12:QBAT. Si tratta cioè della modifica dei elementi di Batoz con quattro punti di integrazione di Gauss ed una riduzione dell'integrazione per il taglio nel piano. Con questa tipologia di formulazione non è richiesto il controllo sull'energia di Hourglass per gli elementi shell.

Per una buona accuratezza del calcolo numerico si inserisce come parametro relativo a I_{smtr} il valore 4. Questo permette di migliorare l'accuratezza della simulazione ed inoltre le deformazioni e le tensioni sono di natura non ingegneristica ma reali.

Come precedentemente riportato la direzione di laminazione viene individuata dalla terna di vettori (X,Y,Z). Con riferimento ad essi, definendo la sequenza (0,0,1) si intende che la laminazione avviene lungo la direzione principale Z ovvero le fibre vengono orientate parallelamente a Z.

All'interno della card del materiale deve essere definito un parametro che indica a partire da quale piano vengono sovrapposte le plies di carbonio. In particolare, si sta parlando del parametro I_{pos} che nella presente trattazione è fissato unitario. Infatti, un accorgimento particolare deve essere tenuto per tale parametro in modo da definire che l'impilaggio in Z sia manualmente definito.

Tale valore sta ad indicare la deposizione delle plies di carbonio a partire dalla pelle inferiore della struttura composita e quindi non dalla superficie media del composito stesso. In questo caso è importante definire con correttezza lo spessore di ciascuna pelle in quanto non vi è un controllo sullo spessore completo del pannello. Questo perché, a differenza del caso in cui si inserisca un valore zero per tale parametro, lo spessore del pannello può anche essere diverso dalla somma delle diverse plies che vengono stese le une sulle altre. Con tale proprietà è possibile anche sovrapporre diverse plies le une sulle altre.

4.6 Sequenza di laminazione: Stagione 2022-2023

All'interno del componente si è definita una sequenza di laminazione, precedentemente studiata attraverso un modello analitico, che potesse soddisfare le specifiche tecniche richieste da regolamento. Infatti, nella presente trattazione verrà data per scontata la fase di progettazione dell'impact e si vanno definendo invece le sequenze del layup.

- **Layup Impact:** l'intero impact attenuator è realizzato utilizzando il GG200P WS 100 T700, materiale che, come detto, è stato opportunamente caratterizzato in laboratorio. La sequenza di impilamento delle varie plies è stata generata in modo che la rigidità vada aumentando verso la parte sottostante dell'assorbitore. Tale scelta deriva dal fatto di voler aumentare lo spessore, la rigidità ma soprattutto la resistenza man mano che la massa battente procede nel danneggiamento dell'assorbitore.

Tutte le plies sono state orientate in 0° con la direzione X (verticale nel modello). Le plies sono posizionate tutte come segue:

- Le prime due plies copre l'intera superficie (205mm);
- La terza ply è 140mm alta;

- La quarta ply è alta 90mm;
 - La quinta ply è alta 50mm;
 - La sesta ply è alta 20mm.
- **Layup AIP:** Anche per questo componente la laminazione è caratterizzata da sole plies di carbonio, sia T300 che T700. La sequenza di laminazione è riportata di seguito:
- Le prime due pelli: 0° T300/45° T300 [2];
 - Successive 6 pelli: 0° T700/45° T300 [6];
 - Patch in corrispondenza dei fori con FBH: 0/45/0 T300 [3];
 - Successive 6 pelli: 0° T700/45° T300 [6];
 - Ultima pelle: 0° T300 1 [1].
- **Layup Supporto Prova Sperimentale:** Anche per questo componente la laminazione è caratterizzata da plies di carbonio, sia T300 che T700 unite in una struttura sandwich con l'honeycomb. Tale supporto deve simulare il comportamento della monoscocca. La sequenza di laminazione è riportata di seguito:
- **Front BulkHead: FBH**
 - [T700 (0°), T700 (45°), T700 (0°), T700 (45°), M46J (0°/45°/0°/-45°/0°/45°/0°/-45°/0°)];
 - Core 20mm, Al5056 4.5 (0°).
 - **Front Hoop Bracing: FHB**
 - [T700 (0°), M46J(45°), M46J(0°), M46J(-45°), M46J(0°)];
 - Core 20mm, Al5052 4.5 (0°).
 - **Front Bulk Head Support: FBHS**
 - [T700 (0°), M46J(45°), M46J(0°),M46J(-45°),M46J(0°)];
 - Core 20mm, Al5052 4.5 (0°).

4.6.1 Sequenza di laminazione: Stagione 2023-2024

Analogamente a quanto fatto in precedenza si riporta la sequenza di laminazione anche per l'assorbitore realizzato per la stagione 2023-2024, dove si è cercato di ottimizzare il layup in modo da mantenerne invariata la rigidezza ma diminuendo la lunghezza di crush.

- **Layup Impact:** l'intero impact attenuator è realizzato utilizzando il GG200P WS 100 T700, materiale che, come detto, è stato opportunamente caratterizzato in laboratorio. La sequenza di impilamento delle varie plies è stata generata in modo che la rigidezza vada aumentando verso la parte sottostante dell'assorbitore. Tale scelta deriva dal fatto di voler aumentare lo spessore, la rigidezza ma soprattutto la resistenza man mano che la massa battente procede nel danneggiamento dell'assorbitore.

Tutte le plies sono state orientate in 0° con la direzione X (verticale nel modello). Le plies sono posizionate tutt come segue:

- Le prime due plies copre l'intera superficie (205mm);
- La terza ply è 45mm alta;
- La quarta ply è alta 35mm;
- La quinta ply è alta 25mm;

- La sesta ply è alta 15mm.
- **Layup AIP:** Anche per questo componente la laminazione è caratterizzata da sole plies di carbonio, sia T300 che T700. La sequenza di laminazione è riportata di seguito:
 - [T700 0°; T300 0°; T700 45°, T300 45°, T700 0°, T300 45°, T700 0°, T700 0°, T300 45°, T700 0°, T300 45°, T700 45°, T300 0°, T700 0°]
- **Layup Supporto Prova Sperimentale:** Anche per questo componente la laminazione è caratterizzata da plies di carbonio, sia T300 che T700 unite in una struttura sandwich con l'honeycomb. Tale supporto deve simulare il comportamento della monoscocca. La sequenza di laminazione è riportata di seguito:
 - **Front BulkHead: FBH**
 - [T700 (0°), IMS (0°), IMS (45°), IMS (0°), IMS (-45°), IMS (45°), IMS (0°), IMS (-45°), IMS (45°), IMS (0°), IMS (-45°), IMS (0°), T700 (0°)].
 - Core 20mm, Al5056 4.5 (0°).
 - **Front Hoop Bracing: FHB**
 - [T700 (0°), IMS (0°), T300(45°), T300(45°), IMS (0°), T700(0°)].
 - Core 20mm, Al5052 4.5 (0°).
 - **Front Bulk Head Support: FBHS**
 - [T700 (0°), M46J(45°), M46J(0°),M46J(-45°),M46J(0°)];
 - Core 20mm, Al5052 4.5 (0°).

4.7 Definizione dei contatti: PROP/INTER/TYPE/7

È importante sottolineare come la definizione dei contatti, qualora scorretta, possa generare problemi di tipo numerico e quindi di convergenza oltre che fisici. In particolare, prima di avviare la simulazione, è bene sempre controllare eventuali compenetrazione tra le interfacce a contatto. Talvolta, sebbene si lasci la distanza corretta tra le due superfici, non sempre questa viene rispettata, magari per sovrapposizione di elementi che vanno a compenetrare nel caso subiscano distorsioni accentuate piuttosto che a causa della definizione del contatto stesso. Nel presente elaborato si investiga con particolare attenzione la definizione del contatto.

Con riferimento ai parametri che vengono inseriti nel modello numerico si riportano di seguito i più significativi, mentre in appendice [B] vengono riportate le contact card. La proprietà scelta per i contatti /INTER/TYPE/7. Alla luce di quanto appena detto si va definendo la rigidezza di interfaccia scegliendo tra uno dei possibili valori di I_{stf} dal menu a tendina.

Per la presente trattazione si è scelto di utilizzare il valore quattro per i seguenti contatti:

- Contatto tra Anti-Intrusion Plate e Front-Bulked;
- Contatto tra IA e Anti-Intrusion Plate;
- I precedenti contatti ma simmetrici quindi invertendo nodi ed elementi master e slave;
- Contatto Interno: si intenda il contatto interno tra nodi ed elementi di tutto il modello esclusa la massa.

Secondo tale parametro la rigidezza dell'interfaccia viene presa come il minimo valore della rigidezza tra la superficie master e slave.

Una particolare attenzione, pertanto, ricopre la definizione opportuna della superficie master e della superficie slave. Infatti, nel caso del contatto tra l'assorbitore e l'IA, è importante definire questo

parametro al fine di evitare che si incorra in un'attribuzione errata della rigidezza di interfaccia. Pertanto, diverse simulazioni sono state effettuate in tal senso, considerando sia il minimo valore della rigidezza di interfaccia ($I_{stf} = 4$), sia il massimo valore ($I_{stf} = 3$) e sia una somma in serie delle rigidezze ($I_{stf} = 5$) piuttosto che un valore medio ($I_{stf} = 2$). A scanso di equivoci, viene riportato anche il caso di default per la proprietà in trattazione ($I_{stf} = 0$).

Durante la modellazione numerica si è assunto che la gran parte di problemi inerenti al contatto potessero essere originati dal contatto tra la massa in caduta libera e l'assorbitore. Oltretutto, tale contatto è quello maggiormente interessante per garantire una buona correlazione con i dati sperimentali.

I risultati vengono riportati di seguito con la precisazione, a sostegno di quanto precedentemente detto, che soltanto nel seguente contatto sono state apportate tali modifiche:

- Contatto Massa_Assorbitore.

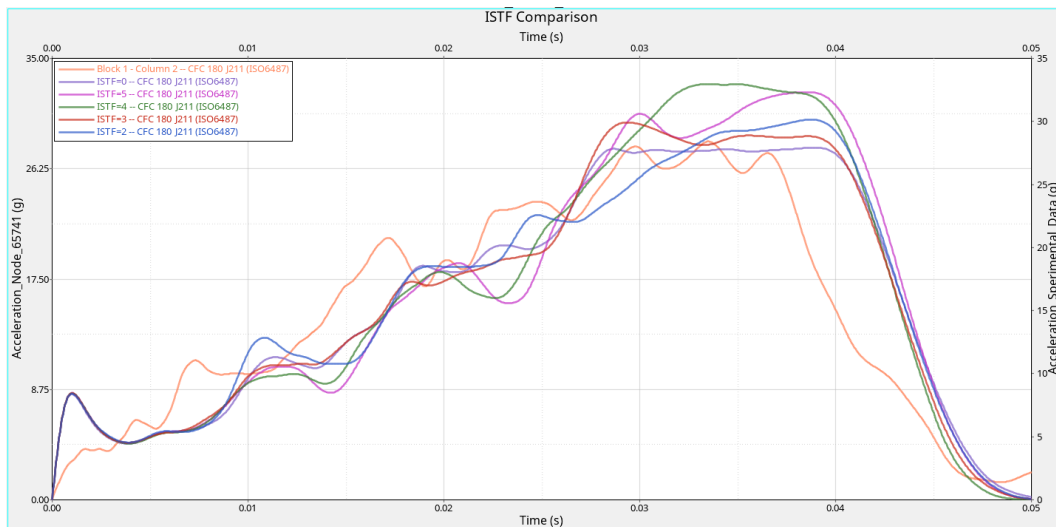


Figura 4.19 Grafico comparativo e parametri in I_{stf} .

Si noti che inserendo come parametro $I_{stf} = 4$, come ci si poteva aspettare, si hanno valori di decelerazioni minori per le fasi iniziali fino a quando invece la tendenza non viene invertita. Infatti, considerando una rigidezza di interfaccia minima, il contatto assume una rigidezza inferiore nel momento in cui la massa incontra la prima pelle del composito e, con riferimento alla trattazione di Mamalis, anche le pelli successive man mano che il crushing progredisce. Intorno ai 30 ms si nota come invece il valore di decelerazione aumenti in quanto l'assorbitore deve accumulare la medesima energia degli altri casi e pertanto avendo decelerato meno la massa nelle fasi iniziali il picco sarà maggiore nelle fasi conclusive. A conferma di ciò basti considerare il fatto che inserendo $I_{stf} = 3$, il quale considera una rigidezza di interfaccia maggiore, si ha un picco più contenuto ed anche i singoli incrementi di decelerazione sono di fatto poco differenti da quelli sperimentali.

Nel caso invece di un valore medio della rigidezza di interfaccia tra la superficie master ed i nodi slave ($I_{stf} = 2$) si nota una buona interpolazione dei dati sperimentale con una curva che mediamente copre lo spettro di decelerazione ma che non coglie in maniera esatta i picchi, soprattutto nella parte finale che è di maggior interesse. Per quanto riguarda invece il caso che media le due rigidezze si ottiene un valore di picco di poco superiore rispetto a quello sperimentale. Questo perché si vanno a considerare, come fossero in serie, due rigidezze molto diverse le une dalle altre.

Per proseguire nella trattazione si sceglie $I_{stf} = 0$.

Proseguiamo poi con gli altri parametri importanti della contact card, tralasciando quelli banali e facilmente definibili.

Il parametro successivo è I_{gap} . Nel caso in cui si scelga tale valore nullo o comunque si lasci la selezione vuota si intende che il valore del gap è quello di default ovvero viene preso come Gap_{min} il valore minimo tra lo spessore medio degli elementi shell della superficie master e la metà della più piccola lunghezza di tutti i segmenti master (siano essi elementi 3D o 2D). Anche in questo caso si sono eseguite diverse analisi per comprendere l'influenza del Gap minimo sulla gestione del contatto. All'interno della card della proprietà è presente anche il Gap_{min} come valore da inserire in input, numericamente. Tale valore di input verrà considerato soltanto nel momento in cui I_{gap} viene posto diverso da zero, in caso contrario la sua influenza è trascurabile.

Con la stessa precisazione precedente si riportano i grafici comparativi.

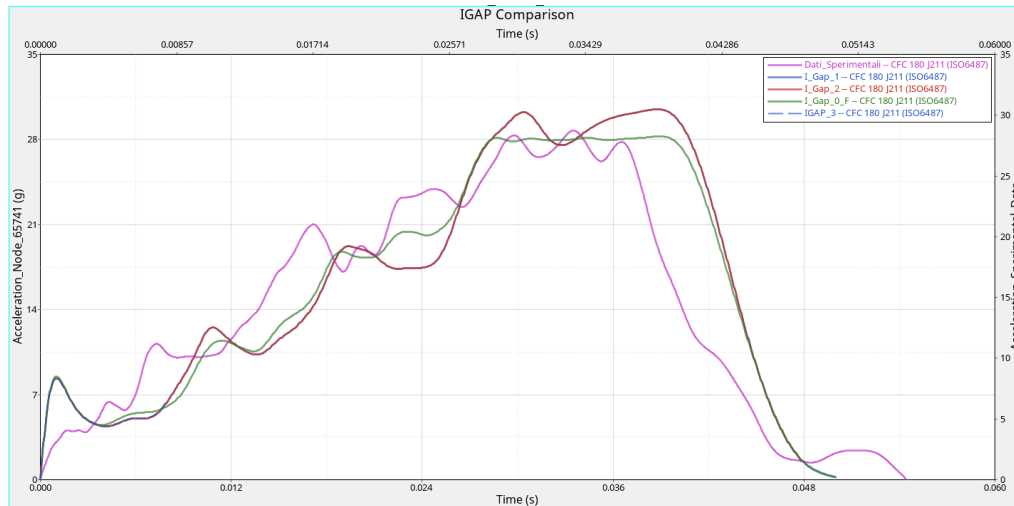


Figura 4.20 Grafico comparativo parametrico in I_{gap} .

Si osservi che I_{gap} pari a 2 (3-4) non genera differenze tra di loro a conferma del fatto che non cambiando la voce Gap_{min} non si hanno modifiche del modello numerico. Caso diverso se si confrontano queste con il caso di I_{gap} pari a 0 che segue meglio i dati sperimentali in quanto tiene conto anche di un contributo topologico quale lo spessore degli elementi e non soltanto di un contributo geometrico.

Un altro parametro importante è il parametro I_{del} che definisce in che modalità vengono eliminati i nodi slave a causa dell'eliminazione dell'elemento. Per questo modello è stato definito il parametro pari a 2 ($I_{del} = 2$).

Proseguendo nell'elenco di parametri disponibili si notano ST_{min} e ST_{max} . Per quanto riguarda il secondo esso viene settato di default mentre per il primo, la cui definizione è sensata solo nel caso in cui si ha un I_{stf} non nullo, viene inserito pari a 1 e poi successivamente pari a 1000 per evitare che vi possa essere un contatto troppo leggero. Si ricordi però che l'influenza di tale parametro non interessa il contatto massa-assorbitore bensì gli altri contatti. Di seguito si riportano i grafici comparativi:

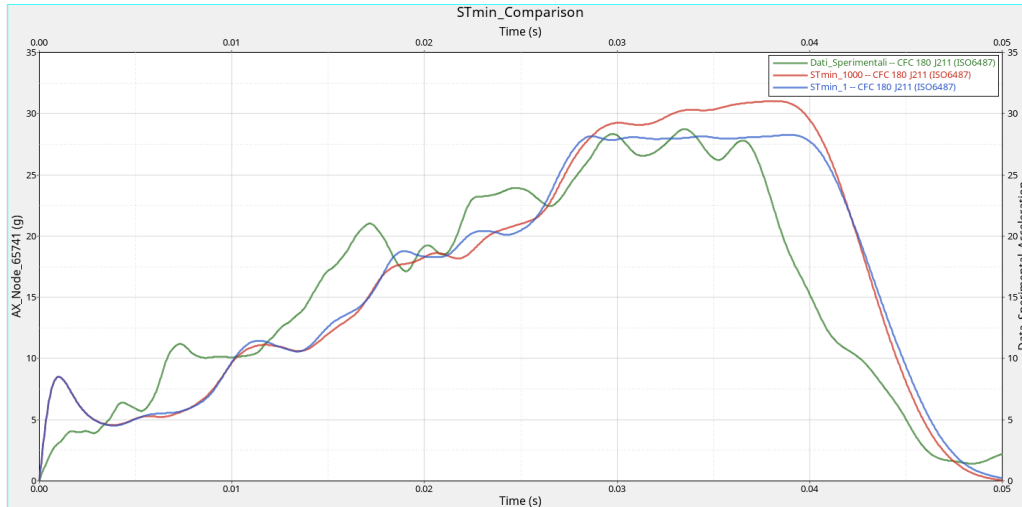


Figura 4.21 Grafico comparativo parametrico in STmin.

Per quanto precedentemente specificato il valore di Gap_{min} ha un senso di essere definito solamente nel caso esso venga considerato riguardo alle penetrazioni in fase di crash. In particolare, esso viene definito per i seguenti contatti che sono quelli con un parametro di I_{stf} non nullo.

- Contatto tra Anti-Intrusion Plate e Front-Bulked;
- Contatto tra IA e Anti-Intrusion Plate;
- I precedenti contatti ma simmetrici quindi invertendo nodi ed elementi master e slave;
- Contatto Interno: si intenda il contatto interno tra nodi ed elementi di tutto il modello esclusa la massa.

Per gli altri invece, tale parametro non viene definito. Il Gap_{min} che si è visto essere ben correlato con i dati sperimentali è pari a 0.1 ed è stato pertanto inserito. Per confronto di quanto affermato si riportano di seguito i grafici comparativi parametrici secondo il Gap_{min} .

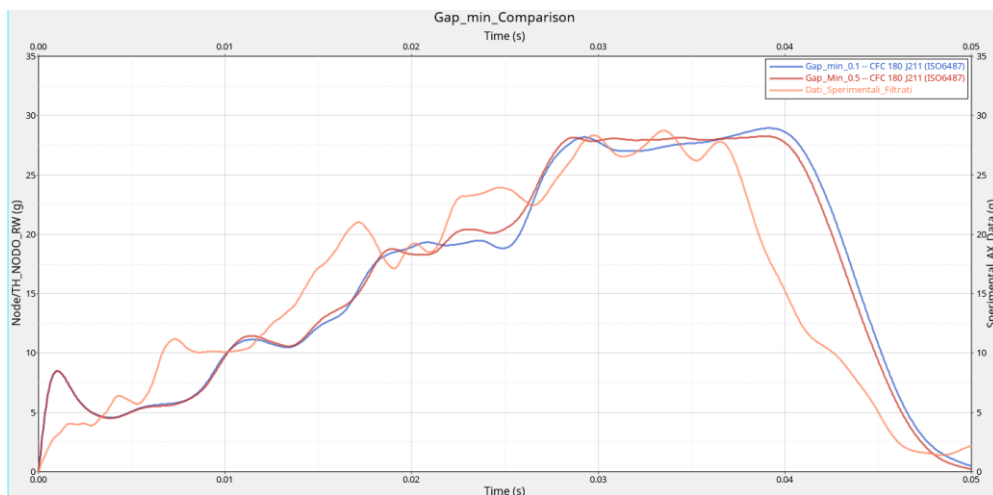


Figura 4.22 Grafico comparativo e parametrico in Gapmin.

In parallelo, sempre al fine di non considerare la rigidezza di interfaccia nel caso di compenetrazioni iniziali in fase di contatto tra la superficie della massa in caduta e la superficie dell'IA, si è utilizzato il parametro $Inacti$.

La scelta del parametro Inacti è stata fatta sulla base di quella che è la reale modellazione dell'assorbitore. In particolare, essendo questo stato modellato con la massa già a contatto con l'assorbitore dall'istante zero, si è scelto di adottare, almeno per il contatto tra massa in caduta libera ed assorbitore, un valore di 5 anziché 6. La motivazione risiede nel fatto che il parametro Inacti 6 viene gestito in modo da penetrare i due componenti a contatto di un quantitativo pari al 5% del gap che intercorre tra i due componenti. Viceversa, invece, l'inacti 5 inserisce come gap minimo esattamente quello rilevato nel modello; nel caso di compenetrazioni il Gap min sarà il gap complessivo decurtato della quota parte di penetrazione.

Inoltre, il parametro Inacti 5 è maggiormente utilizzato nelle simulazioni di airbag mentre il parametro Inacti 6 è utilizzato per limitare problemi di alte frequenze in corrispondenza dell'interfaccia.

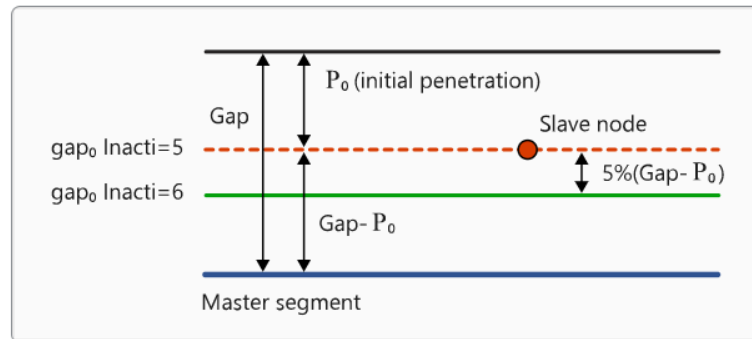


Figura 4.23 Impostazione del Gap min con riferimento alle impostazioni presentate in [7].

Nelle seguenti figure è possibile notare un confronto tra l'utilizzo del parametro Inacti nel caso della sola modifica in corrispondenza della massa battente e della prima pelle dell'assorbitore e poi l'influenza dello stesso parametro per gli altri contatti, ad eccezione di quello precedentemente modificato.

➤ Contatto Massa_Assorbitore.

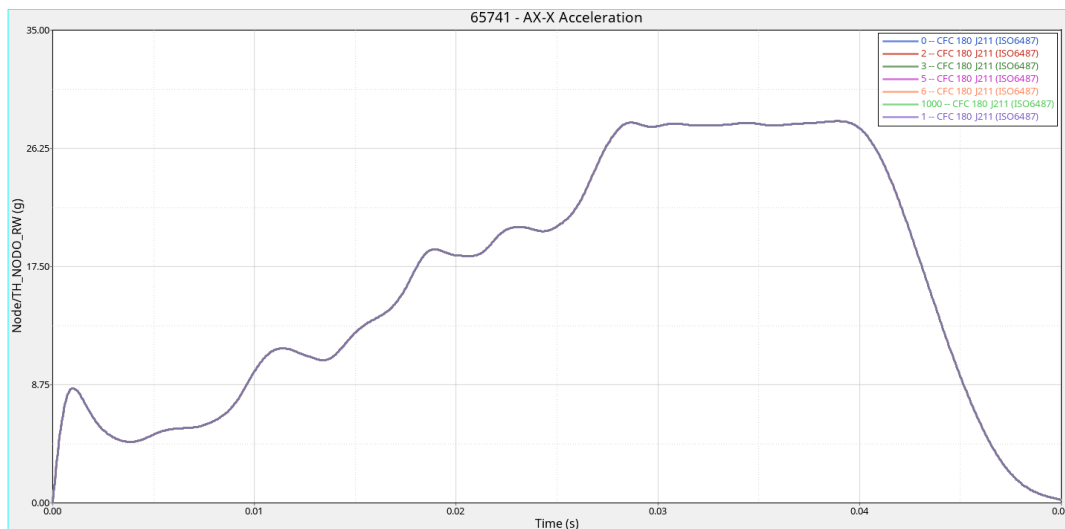


Figura 4.24 Grafico comparativo e parametrico in INACTI per il contatto solo ed esclusivo di massa e assorbitore.

Come visibile dal grafico di cui sopra non si riscontrano variazioni nell'utilizzo di un differente parametro di INACTI nel caso di contatto tra la massa e l'assorbitore. Il motivo può essere dovuto al fatto che essendo già stato eseguito un dimensionamento del gap_min tale per cui la massa in caduta e

l'assorbitore realizzino già dai primi istanti simulativi una distanza relativa nulla, non si ha un contributo importante di questo parametro durante l'intera simulazione.

Nel caso invece del gruppo di contatti sottostante, si possono ottenere i seguenti grafici:

- Contatto tra Anti-Intrusion Plate e Front-Bulked;
- Contatto tra IA e Anti-Intrusion Plate;
- I precedenti contatti ma simmetrici quindi invertendo nodi ed elementi master e slave;
- Contatto Interno.

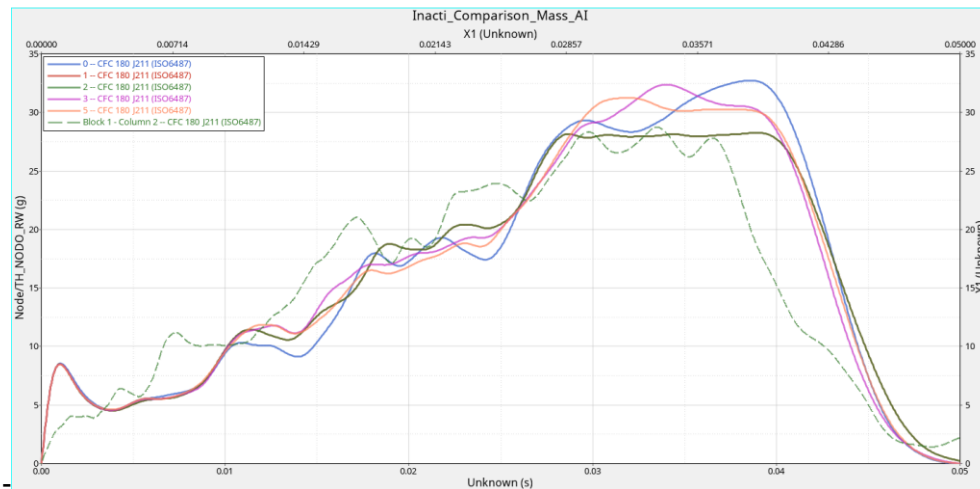


Figura 4.25 Grafico comparativo parametro in INACTI per tutti e soli i contatti ad esclusione di quello tra la massa battente e l'assorbitore.

Infine, a conclusione della modellazione numerica, è necessario definire gli output da richiedere per l'analisi dei risultati. In particolare, come approfondito nel capitolo successivo, gli output interessanti del modello sono i seguenti:

- Grandezze associate alla massa battente: per avere in output questo parametro è necessario andare a definire un output block seguendo la seguente procedura:

Create → *output block* → *TH_Node* → *IG_Node = Set_Node* → *N. Variables* → *Export*

In tal modo, si sta attribuendo allo spostamento del nodo di interesse, nel caso in trattazione il master della massa battente, un file di output che poi potrà essere richiamato in HYPERGRAPH andando a plottare il contour dello spostamento del nodo identificato da un ID. Nel caso in trattazione si parla del nodo 65741 per il quale, nel capitolo successivo, sono ottenuti i grafici di riferimento.

Inoltre, sempre all'interno del presente pannello è possibile scegliere il numero di variabili che si vogliono ottenere in output, tra cui lo spostamento. A tal fine sono state richieste le seguenti grandezze, sempre agendo tramite il menu a tendina:

1. Spostamento massa battente;
 2. Velocità massa battente;
 3. Accelerazione massa battente.
- Massa dei nodi (Node Mass): In calcoli di questo tipo è necessario tenere sotto controllo la massa complessiva. Nel momento in cui tale valore di massa non si mantenga costante o comunque abbia escursioni di grandi valori la simulazione perde di significato fisico e pertanto

di accuratezza. Per evitare tale condizione è bene introdurre all'interno dell'output block anche un nuovo TH_Node per il quale chiedere in output la massa totale del modello.

A tal fine si può seguire lo stesso percorso precedente con la differenza che per evitare di perdere qualche grandezza in output e dover pertanto rilanciare la simulazione si chiede in output ciò che viene definito come "default" selezionando come N. Variables → Default.

4.8 Aspetti critici, problematiche affrontate e risultati ottenuti

Durante la parte di caratterizzazione numerica diverse sono state le iterazioni effettuate per il parametro I_{cc} ed I_{off} . Questo perché, pur avendo eseguito correttamente la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali in trattazione, si deve fornire al software la chiave di lettura corretta di quelli che sono i valori da prendere come limite per ciascuna condizione di cedimento. Infatti, entrambi i parametri sopra citati sono parametri che regolano le modalità secondo cui si vanno ad eliminare gli elementi del modello a seguito del cedimento.

Definire però tale condizione di cedimento non è immediato: sebbene ci si aspetti che fornendo come valore di input le tensioni di snervamento-rottura del materiale ed il lavoro plastico massimo oltre il quale si verifica cedimento, in RADIOSS non è stata importata direttamente la curva tensione-deformazione di natura sperimentale. In tal caso collocare il cedimento in corrispondenza di un certo valore di tensione piuttosto che in corrispondenza del massimo valore di energia assorbita dall'elemento comporta due soluzioni completamente differenti in quanto vengono inseriti soltanto i limiti estremi delle proprietà meccaniche e non i relativi andamenti.

L'analisi dei contatti precedentemente definita è stata condotta in maniera iterativa ed è molto correlata sperimentalmente, soprattutto quella che riguarda l'assorbitore è la massa in caduta libera, ove le interazioni dinamiche sono maggiormente significative. Ciò che però è possibile migliorare in tale senso è ridefinire il contatto iniziale tra la massa e l'assorbitore: ai fini dell'analisi in sé non ci si dovrebbe aspettare una grande differenza in termini di decelerazione ma dal punto di vista del contour delle forze di contatto sulla pelle sovrastante (unica zona dove è presente una sola pelle di materiale) la differenza è sostanziale. Si può sostenere che dal punto di vista della decelerazione e quindi dell'energia accumulata il contributo di questa modifica sia trascurabile perché la pelle sovrastante dell'assorbitore è la prima a rompersi ed inoltre l'unica ad offrire una rigidità quasi nulla. Infatti, tale pelle, viene inserita solo al fine di chiudere l'assorbitore per renderlo esteticamente più apprezzabile.

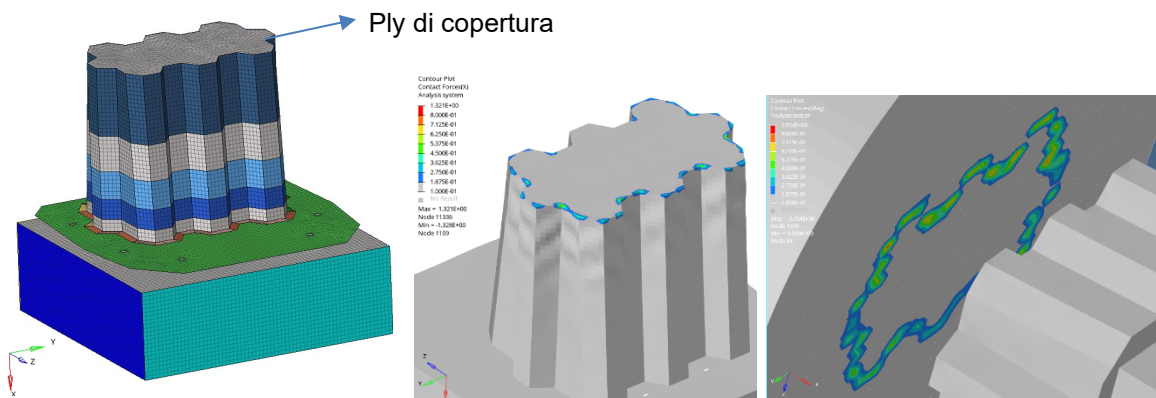


Figura 4.26 Contour delle forze di contatto tra assorbitore e massa battente in corrispondenza della prima pelle, ossia quella superiore di copertura.

È possibile comunque implementare il modello andando a migliorare la gestione del contatto tra l'assorbitore e la struttura ad esso sottostante. Infatti, come precedentemente riportato, il contatto tra l'assorbitore e la struttura di supporto è gestito attraverso un contatto di tipo "tie". In realtà, tale contatto non è propriamente adatto a simulare un collegamento dovuto all'incollaggio con adesivo strutturale ma piuttosto un collegamento che presuppone un contatto molto più rigido, come ad esempio una saldatura. In tal caso, per rendere più verosimile il contatto è possibile aggiornare il modello inserendo la colla strutturale, modellata comunque con elementi bidimensionali di tipo shell, ai quali viene attribuito lo

spessore pari a quello utilizzato per realizzare l'incollaggio. La criticità che si è riscontrata in tale elaborato e quindi motivo di non implementazione nel modello in trattazione risiede nella necessità di conoscere le proprietà della colla stessa ottenute tramite caratterizzazione sperimentale, in particolare per le condizioni di rottura.

Inoltre, sarebbe possibile implementare un contatto differente per lo sgabello e la piastra andando a modellare la colla stessa come elemento di collegamento tra il supporto e la piastra. Di fatto, la piastra alla base, in acciaio, è incollata alla parte terminale dello sgabello e pertanto, evitando di modellare il vincolo alla base come fosse un appoggio si potrebbe incastrare alla base la piastra ed incollare successivamente lo sgabello alla piastra base incastrata.

In aggiunta a quanto sopra riportato, per completezza di simulazione, potrebbe essere interessante caratterizzare sperimentalmente, a rottura, anche i materiali presenti all'interno della struttura di appoggio. Tale aspetto potrebbe non essere cruciale ai fini della simulazione numerica nel caso in cui la rottura, come sperabilmente accade, non interessa la struttura che sorregge l'assorbitore dove tali materiali sono collocati. Qualora però, come per la stagione 2023-2024 anche se in minima parte, dovesse verificarsi una rottura in corrispondenza del supporto, tale rottura potrebbe non essere colta dal modello numerico causa la mancata definizione delle caratteristiche a rottura dei seguenti materiali:

- CFRP: M46J;
- CFRP UD: IMS_t=0.1.

Un altro aspetto riguarda invece la possibilità di poter inserire e far leggere al software le curve sperimentali ottenute in laboratorio: questo permette di non dover iterare i diversi parametri da inserire all'interno per correlare il materiale numerico con quello sperimentale. Ad esempio, i coefficienti moltiplicativi b_{1t} e b_{2t} sono stati ottenuti, con un modo di procedere critico, in maniera iterativa ed avendo a disposizione un polo di calcolo molto disponibile in termini di spazio e prestazioni, aspetto non sempre scontato. Pertanto, minore è il numero di iterazioni e maggiore sarà la velocità con cui si può costruire il modello numerico senza perderne in termini di accuratezza.

Si rimanda al capitolo successivo invece l'analisi dei risultati e il raggiungimento degli obiettivi precedentemente posti che, ribadendo a scanso di equivoci, sono i seguenti:

- Energia assorbita durante l'urto (SEA);
- Decelerazione massima che, come previsto da regolamento, non deve superare i 40 g;
- Decelerazione media nel periodo della prova non superiore ai 20g;
- Deformazione complessiva dell'assorbitore e di riflesso spostamento totale della massa battente.

CAPITOLO 5

Analisi dei risultati

In questo capitolo si affronta il post processing dei risultati per istituire una corrispondenza biunivoca tra il modello numerico ed i dati sperimentali ottenuti in torre di caduta. L'obiettivo perseguito è quello di ottenere sia i dati sperimentali e sia i dati derivanti dal modello numerico in maniera grezza adottando solo successivamente un filtro opportunamente formulato in HYPERGRAPH.

5 Introduzione

Al fine di acquisire i dati sperimentali in maniera corretta sono stati implementati, durante le acquisizioni, un filtro anti-aliasing ed un filtro passa basso al fine di ridurre il rumore del segnale.

In particolare, l'output della prova è un file ASC, derivante dall'accelerometro in figura, il quale acquisisce ad una frequenza di 50000 Hz e fornisce un array di valori che corrisponde alle decelerazioni della massa battente durante la caduta della stessa.

Tali dati, vengono elaborati dal seguente script Matlab opportunamente realizzato e fornendo in input l'intervallo di tempo entro cui filtrare i dati, con un filtro passa basso con frequenza di taglio pari a 100 Hz, come previsto da regolamento, fornisce in output i dati sperimentali filtrati nella finestra di campionamento scelta.

L'impatto effettivo ha una durata di circa 50 ms e pertanto l'intervallo di tempo definito per le due prove di riferimento sono i seguenti:

- Stagione 2022-2023: 6.2345-6.2905 s;
- Stagione 2023-2024: 3.1690-3.2190 s.

Di seguito vengono posti in contrapposizione i dati filtrati provenienti dalle due prove eseguite nelle due differenti stagioni con riferimento agli intervalli di campionamento precedentemente definiti.

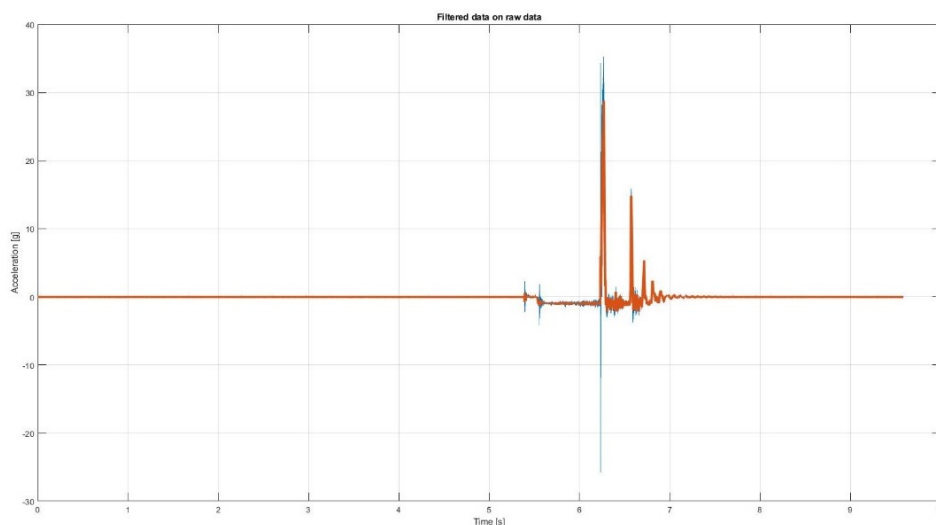


Figura 5.1 Dati sperimentali derivanti dalla prova eseguita in torre di caduta nella stagione 2022-2023.

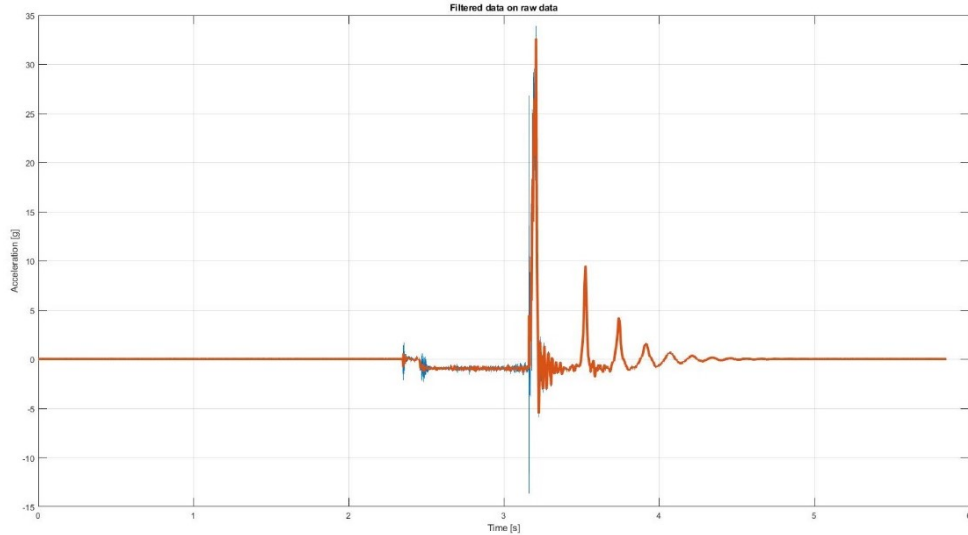


Figura 5.2 Dati sperimentali derivanti dalla prova eseguita in torre di caduta nella stagione 2023-2024.

Che traslate ad origine comune e sovrapposte, risultano essere come di seguito definite:

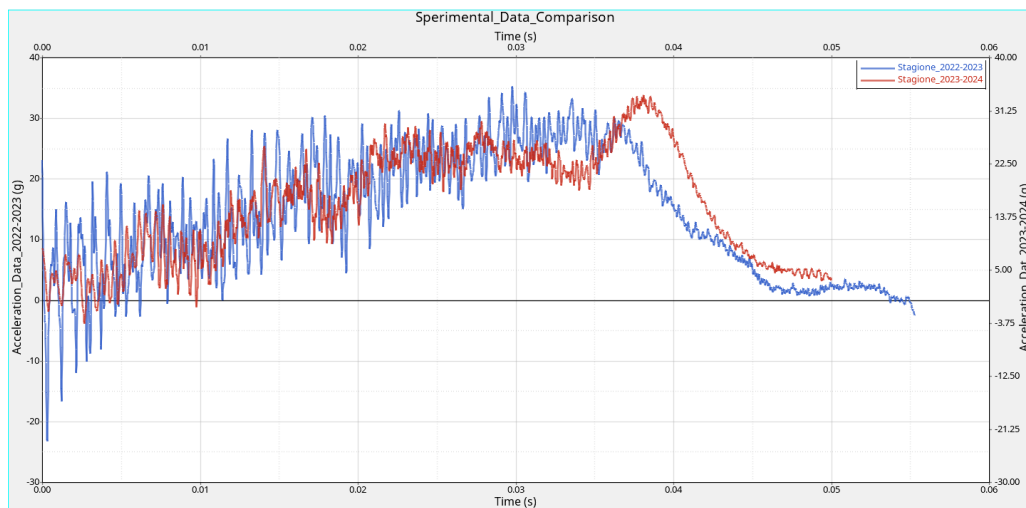


Figura 5.3 Confronto dei dati sperimentali delle due stagioni, campionati negli appositi intervalli.

A partire da questi dati è possibile istituire un confronto diretto tra la capacità, letta nel grafico in termini di g, di assorbire energia da parte dell'una e dell'altra soluzione, a parità di geometria ma con un differente layup. Per raggiungere tale scopo si filtrano le curve sperimentali e si ottengono i seguenti andamenti sperimentali il cui obiettivo è esattamente quello di validare il modello numerico, oggetto del presente elaborato.

Alcuni degli aspetti che verranno presi in considerazione nel seguito della trattazione riguardano i seguenti punti principali:

- 1) Energia assorbita durante l'urto (SEA);
- 2) Decelerazione massima che, come previsto da regolamento, non deve superare i 40 g;
- 3) Decelerazione media nel periodo di 50ms;
- 4) Deformazione complessiva dell'assorbitore e di riflesso spostamento totale della massa battente;

Avendo effettuato due modelli, uno per la stagione 2022-2023 ed uno per la stagione 2023-2024, si procede in maniera ordinata partendo dal primo. Si riportano per completezza i dati di fig.5.3 opportunamente filtrati.

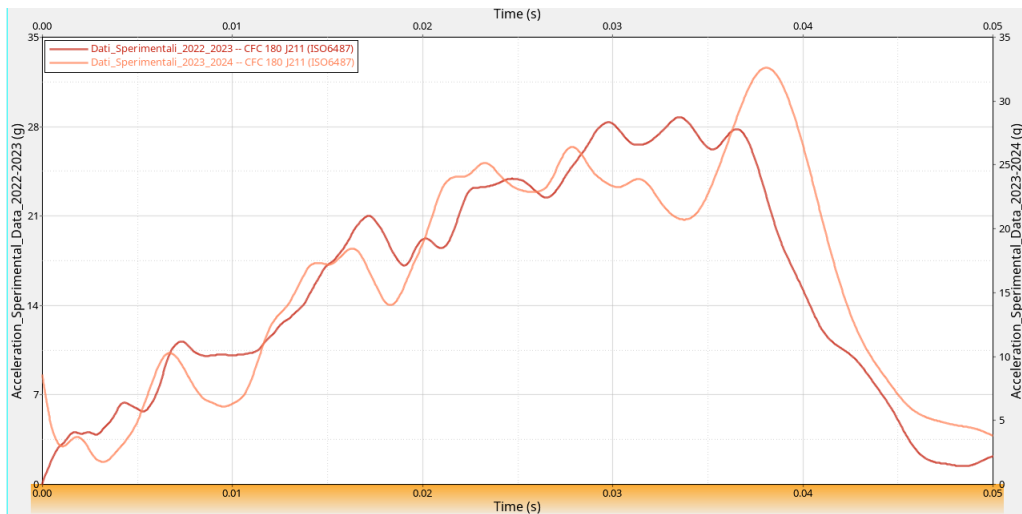


Figura 5.4 Confronto dati sperimentali filtrati delle due stagioni.

È possibile osservare come l'impact abbia lavorato in maniera meno efficiente durante la stagione 2023-2024 rispetto a quella precedente. Questo è intuibile dal fatto che le escursioni delle decelerazioni tra massimo e minimo sperimentali sono di entità superiore ed inoltre i valori di picco superiori si riscontrano nella parte conclusiva del crash e non all'inizio. Ad esempio, in corrispondenza dei 10 ms, piuttosto che dei 35 ms si può riscontrare un delta picco più elevato, frutto di un assorbimento di energia non graduale. Tale affermazione sarà maggiormente chiara nel seguito.

5.1 Post processing: risultati stagione 2022-2023

Di seguito vengono riportati i dati non filtrati della prova sperimentale. Poiché non si è interessati a cogliere quanto accade dal momento in cui la massa cade fino a quando la stessa non impatta l'assorbitore, si è scelto di considerare come finestra temporale quella che va dall'inizio dell'impacto fino a quando la massa sospesa non subisce un'accelerazione negativa di rimbalzo. D'altronde, all'interno del modello numerico, la massa battente è già in contatto, sin dall'istante iniziale, con l'assorbitore.

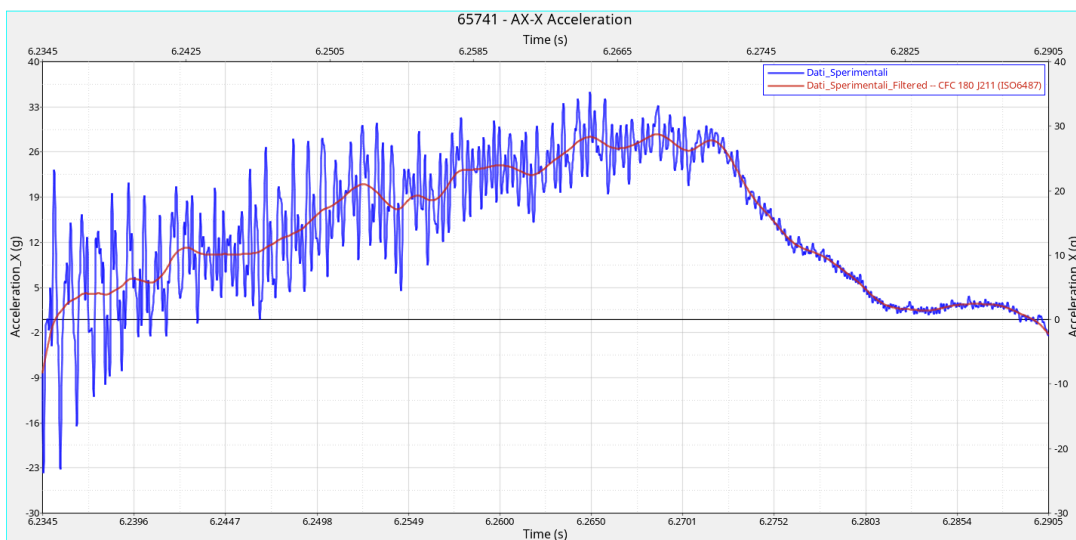


Figura 5.5 Dati sperimentali stagione 2022-2023 grezzi e funzione filtro.

Si ricorda che per soddisfare i requisiti di regolamento si rende necessario avere picchi di accelerazione non superiori ai 40g. Il primo requisito è pertanto soddisfatto.

Tale grafico viene filtrato, così come i dati derivanti dalla simulazione numerica, con un filtro CFC 180 SAE J211/1 ISO6487 Padding (Fwd-Back). Per quanto riguarda il modello numerico si è scelto di riportare nel grafico, ai fini della comparazione con gli stessi sperimentali, l'accelerazione (espressa in g) del nodo 65741 del modello che corrisponde al master del rigido della massa battente. In tal modo è possibile correlare in maniera sufficientemente veritiera, l'accelerometro che fisicamente viene montato sulla massa battente in caduta libera.

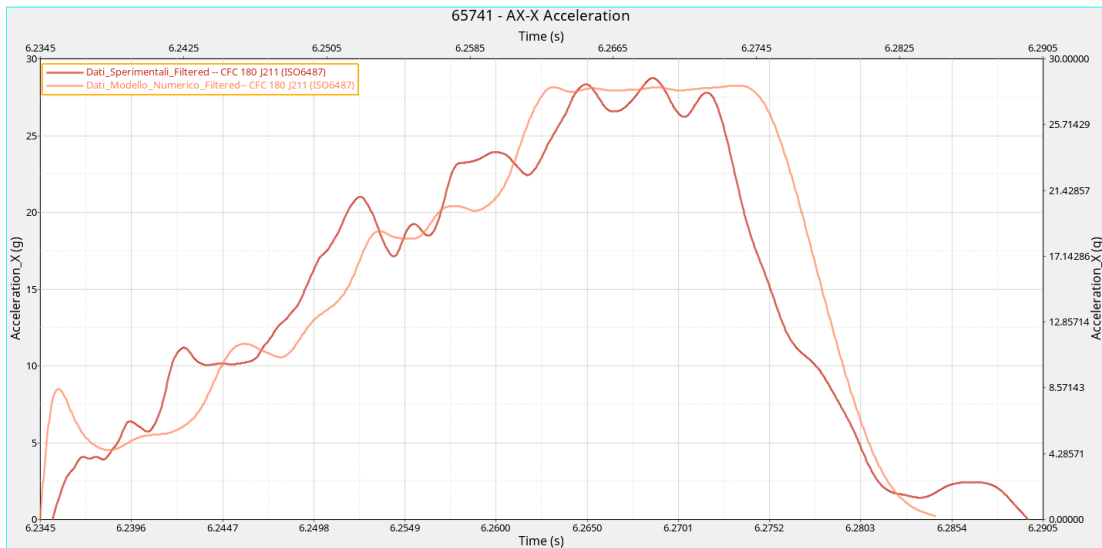


Figura 5.6 Confronto dati sperimentali ottenuti da test in torre di caduta e dati provenienti dal modello numerico.

Con riferimento alla parte iniziale della simulazione si ha uno scostamento imputabile ad una questione numerica riguardante il contatto oppure dovuta ad una errata calibrazione del modello in fase di discesa. Nella fattispecie, si intende il fatto che la massa battente è assunta in caduta libera ma con velocità iniziale pari a quella che si ottiene con le classiche formule del moto uniformemente accelerato. In realtà però, nel modello numerico è stata implementata una velocità iniziale della massa battente ottenuta integrando l'accelerazione dall'istante iniziale in cui si coglie $-1g$ fino all'equivalente $-1g$ post crushing. Facendo la media di questa finestra di dati derivanti dall'accelerometro si ottiene la velocità iniziale con cui la massa impatta contro l'assorbitore. Quanto appena espresso è consultabile nel capitolo 3 della presente trattazione.

Quello che potrebbe essere implementato nel modello è di inserire la velocità sopra citata con una curva non a gradino ossia evitare l'effetto impulsivo del carico dinamico che porta ad un'escursione di circa 8g nella fase iniziale.

5.1.1 SEA: analisi e discussione dei risultati

Per quanto riguarda l'energia assorbita essa può essere ottenuta e confrontata in maniera esatta andando ad integrare l'accelerazione acquisita dall'accelerometro per i dati sperimentale ed analogamente per il modello andando ad utilizzare la velocità di movimentazione della massa battente, con la consapevolezza ed anche assunzione intrinseca che, durante il fenomeno di crash l'energia cinetica della massa battente viene interamente convertita in energia interna.

Per validare il modello analitico e valutarne dunque la correttezza si sceglie di sfruttare il modello numerico per identificare il valore dello spostamento complessivo del rigido per capire a quanto ammonta la deformazione nella direzione dell'asse Z dell'assorbito, nel seguito crushed length. Questo servirà

anche a confrontare i due modelli relativi alle due stagioni dove, nel caso più recente si è ottimizzato il layout in modo da avere una crushed legth minore, aspetto che fisicamente è realmente avvenuto.

Con riferimento a quanto detto si riporta il grafico del displacement nel tempo durante il crushing dell'assorbitore. Il valore massimo visualizzabile è pari a 168.84 mm contro i 163 mm ottenuti con il modello numerico in Matlab.

Dal seguente grafico è infatti possibile risalire al fatto che il massimo del picco di accelerazione si manifesta, secondo il modello analitico e non lontanamente da quello numerico in corrispondenza di una lunghezza di deformazione dell'assorbitore pari a 160mm.

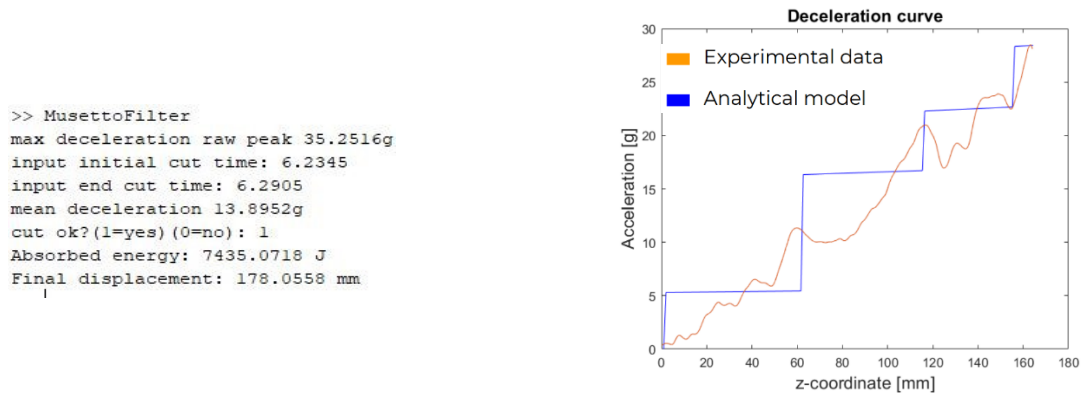


Figura 5.7 A sinistra si possono osservare i valori forniti in output dal modello numerico mentre a destra gli stessi valori in termini di accelerazione contrapposti allo spostamento della massa sia numerici che sperimentali.

La figura di sinistra riporta l'output del modello analitico che si vuole comunque comparare con i dati sperimentali e con il modello numerico in modo che lo stesso possa essere utilizzato almeno in fase di pre-dimensionamento. Di seguito sono riportate la velocità di movimentazione della massa e la relativa energia assorbita dall'assorbitore. Chiaramente il grafico è stato traslato verso l'origine e pertanto la velocità in corrispondenza dell'istante iniziale non sarà zero ma sarà pari alla velocità di impatto della massa battente contro l'assorbitore ovvero $6.76 \frac{m}{s^2}$. Analogamente, per l'energia cinetica che avrà il valore massimo laddove la velocità è massima.

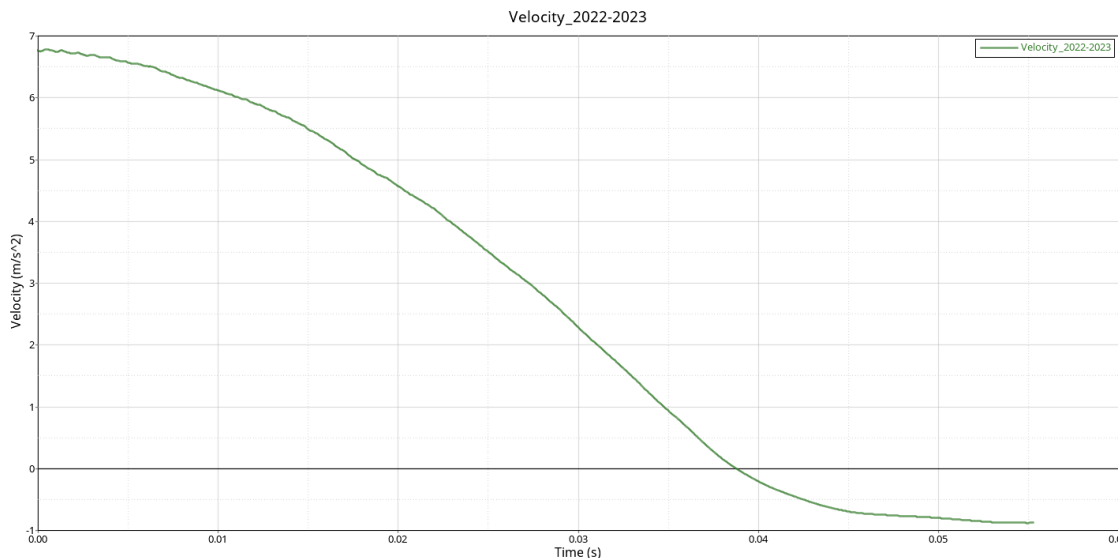


Fig.5.8. Dati numerici velocità di decelerazione della massa battente

Procedendo in tal senso si riportano di seguito i due grafici per il confronto dell'energia immagazzinata dall'assorbitore.

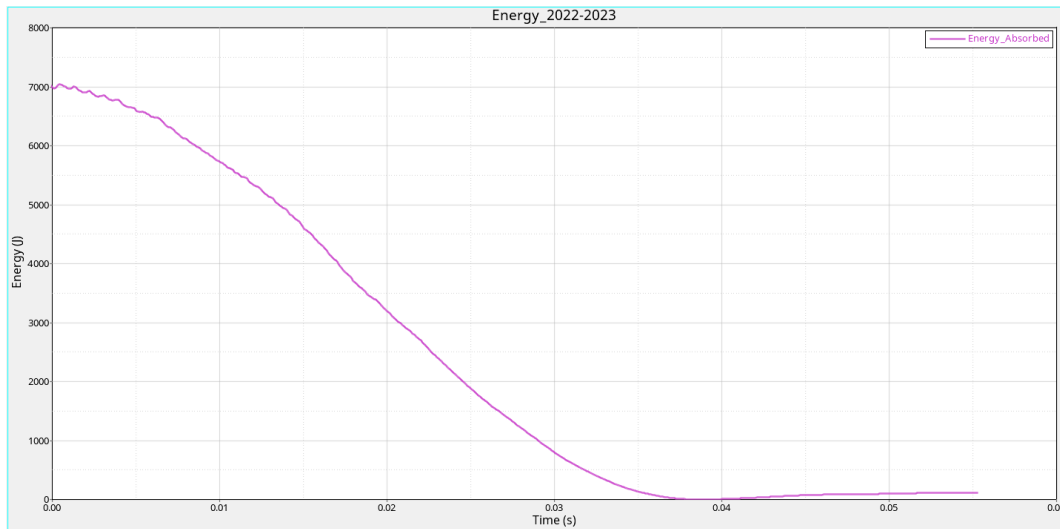


Figura 5.8 Dati numerici energia cinetica della stagione 2022-2023.

È possibile ora andare a comparare il grafico dell'energia assorbita sperimentalmente a quello del modello numerico generato.

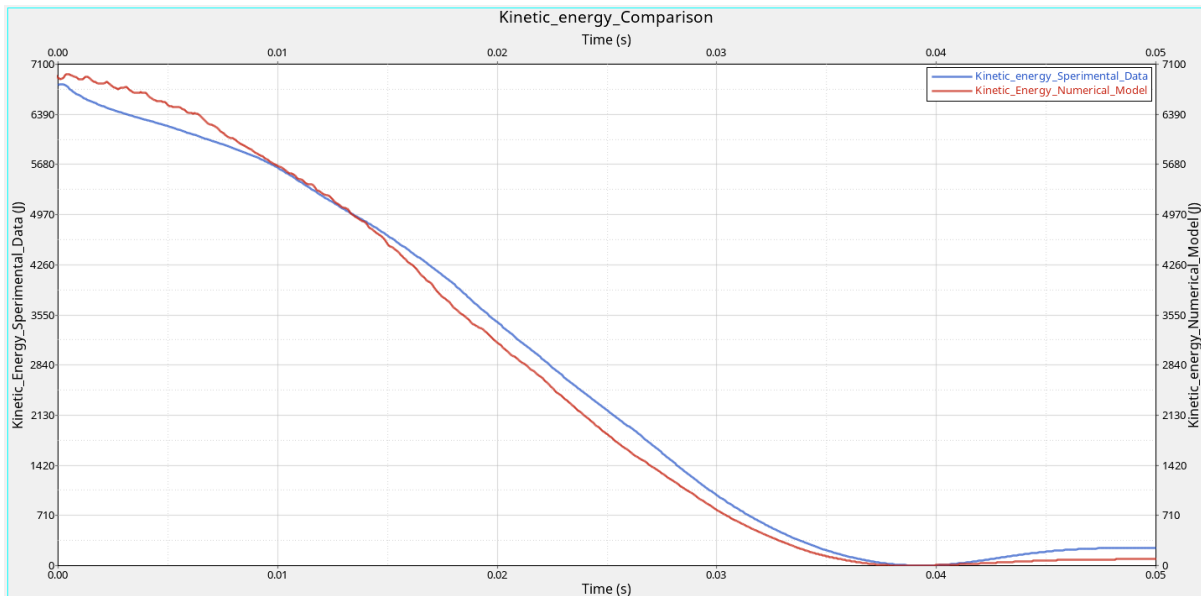


Figura 5.9 Confronto tra energia cinetica ottenuta dal modello numerico e dai dati sperimentali.

Si può osservare come gli scostamenti tra le curve siano minimi e quindi si può concludere con buona accuratezza che il modello fornisce una previsione piuttosto attinente alla realtà sperimentale. Ciò nonostante, è possibile sottolineare che rispetto ai dati sperimentali, anche se di poco, l'energia assorbita dal modello numerico è superiore rispetto a quella iniziale soprattutto nella parte iniziale dove la velocità ha una consistente diminuzione che poi si riflette su una velocità di rimbalzo leggermente inferiore. Aspetto maggiormente interessante è la curvatura della stessa nella fase centrale che comunque risulta essere più gravosa e quindi più conservativa rispetto al caso sperimentale.

A completezza di quanto precedentemente riportato, si riporta di seguito l'energia interna, ottenuta plottando la forza che la massa in caduta genera moltiplicata per lo spostamento della stessa durante l'impatto, con l'accortezza di inserire il solo spostamento nella finestra temporale interessata dal crash dell'assorbitore ossia, incipiente a 6.2345s.

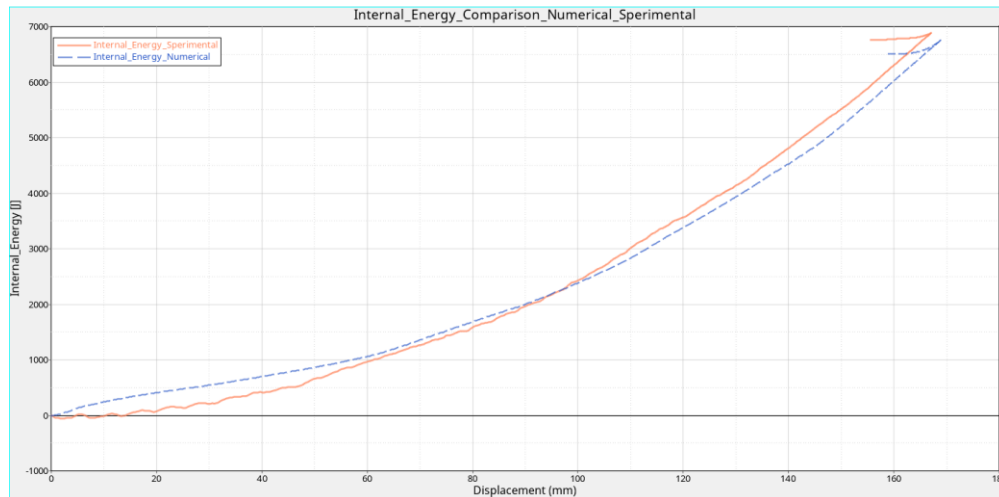


Figura 5.10 Confronto tra energia interna numerica e sperimentale.

Per concludere la trattazione inerente allo scambio di energia tra la massa in caduta e l'impattore, si riportano di seguito i grafici di confronto tra l'energia interna assorbita dall'assorbitore e l'energia cinetica posseduta dalla massa in caduta. Ciò che ci si aspetta è una inversione di tendenza sufficientemente simmetrica rispetto alle ordinate e ad una distanza dall'origine che presumibilmente non sarà prima del secondo cambio di rigidità essendo i primi 90 mm di impattore caratterizzati da un layup con poche pelli e quindi meno rigido.

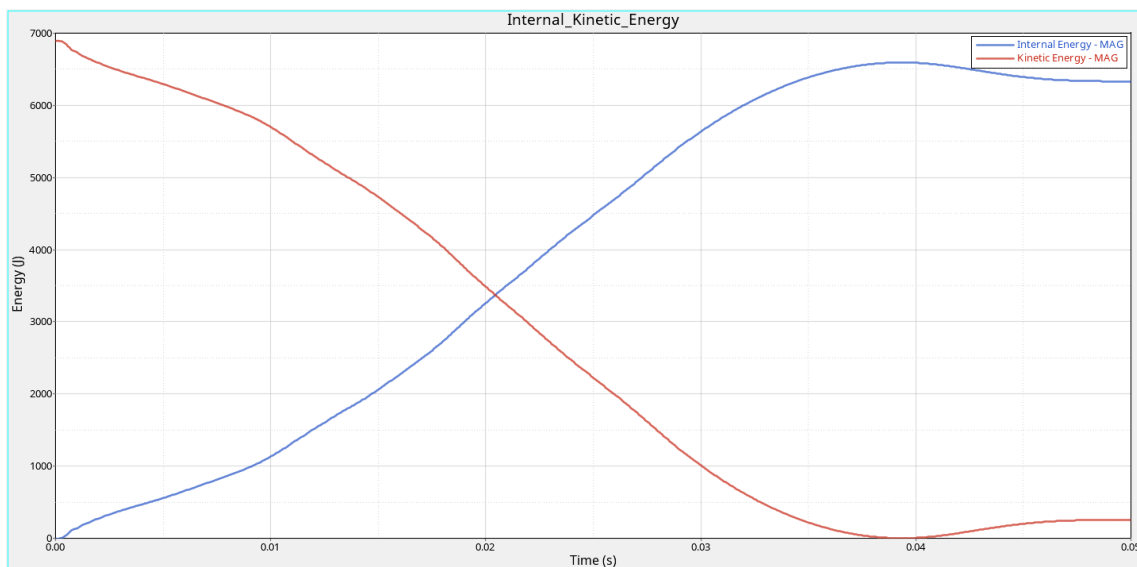


Figura 5.11 Grafici di energia interna ed energia cinetica nel tempo: risultati stagione 2022-2023.

Deformazione: discussione dei risultati

Un altro parametro altresì importante è quello relativo allo spostamento della massa sospesa, in particolare a seguito dell'urto con l'assorbitore. Infatti, come previsto da modello analitico lo spostamento

massimo dell'assorbitore ammonta a 178 mm circa. Nel modello numerico e nel profilo sperimentale invece il massimo ammonta a 168.9 mm per lo sperimentale e 167.41 mm per il modello numerico.

La curva rappresentata in blu rappresenta la deformazione complessiva (X,Y,Z), quindi chiaramente superiore rispetto a quella ottenuta plottando soltanto lo spostamento in direzione X del master del rigido, rappresentata invece in colore rosso. Si consideri ai fini delle considerazioni della seguente trattazione soltanto la curva rossa. Proseguendo con l'analisi dello spostamento sperimentale misurato dall'accelerometro montato in torre di caduta. In particolare, integrando due volte l'accelerazione si ottiene un grafico dello spostamento che indichiamo nella seguente figura in verde, in modo da compararlo con quanto esposto dal modello analitico e numerico.

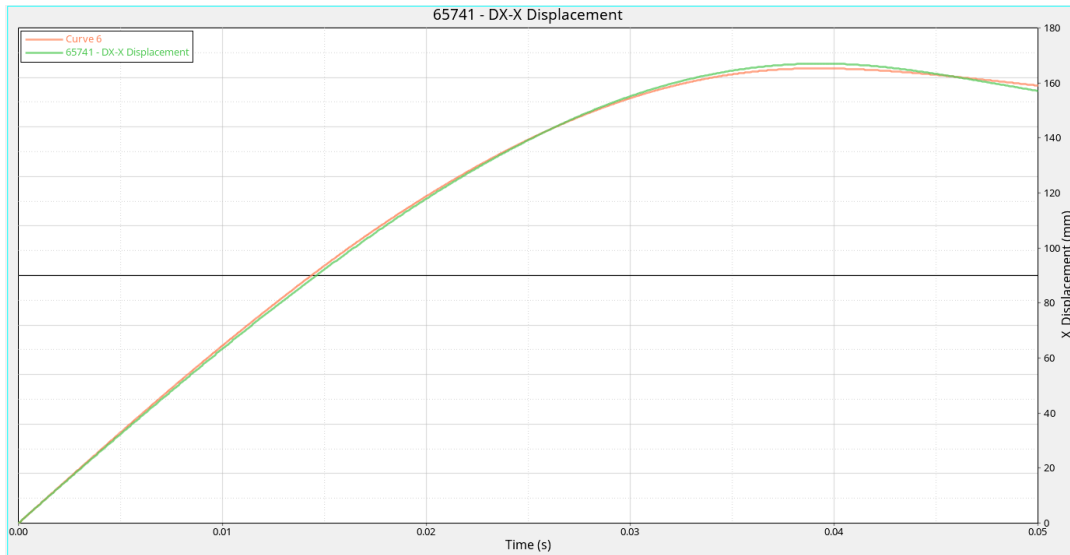


Figura 5.12 Curve di spostamento della massa battente: confronto tra modello numerico e modello sperimentale. In particolare, la curva verde fa riferimento al caso numerico mentre quella arancione a quella sperimentale.

Lo scostamento tra le due curve è trascurabile, pertanto, lo spostamento reale della massa battente è in linea con lo spostamento in direzione X del rigido con massa concentrata.

Ai fini riassuntivi si riporta di seguito la tabella riepilogativa del confronto tra il modello sperimentale, il modello analitico ed infine quello numerico.

Stagione 2022-2023			
	Analitico	Sperimentale	Numerico
Max Decelerazione [g]	35.25	35.25	29
Energia Assorbita [J]	7435	6880	6753
Spostamento Totale [mm]	178.1	167	168.9

Tabella 5-1 Tabella riassuntiva risultati stagione 2022-2023.

Come è possibile osservare dalla figura 5.3 l'andamento del grafico delle accelerazioni nel tempo è molto sensibile nei riguardi della finestra di campionamento scelta. Questo perché lo script elaborato in Matlab richiede in input, oltre ai dati sperimentali, anche i valori del tempo di inizio e fine del fenomeno

di crash. Essendo però il modello numerico tale da riprodurre, per ovvi motivi di onere computazionale, soltanto il fenomeno di danneggiamento e non anche la discesa della massa battente, si rileva una condizione di ritardo dei dati numerici rispetto a quelli sperimentali che è tanto minore quanto più si riesce a cogliere il momento dell'urto in maniera esatta. Il dominio del tempo è però un dominio discreto e pertanto l'ottimo valore tale da garantire la sovrapposizione delle due curve, in termini temporali, è di difficile raggiungimento.

5.2 Post processing: risultati stagione 2023-2024

Analogamente a quanto fatto prima per la stagione 2022-2023 si vanno descrivendo gli aspetti principali del problema in termini energetici, deformativi e dinamici.

L'altezza da cui viene fatta cadere la massa battente è la stessa della stagione precedente, pertanto, la velocità di impatto è pari a 6.71 m/s come previsto dalla legge del moto uniformemente accelerato.

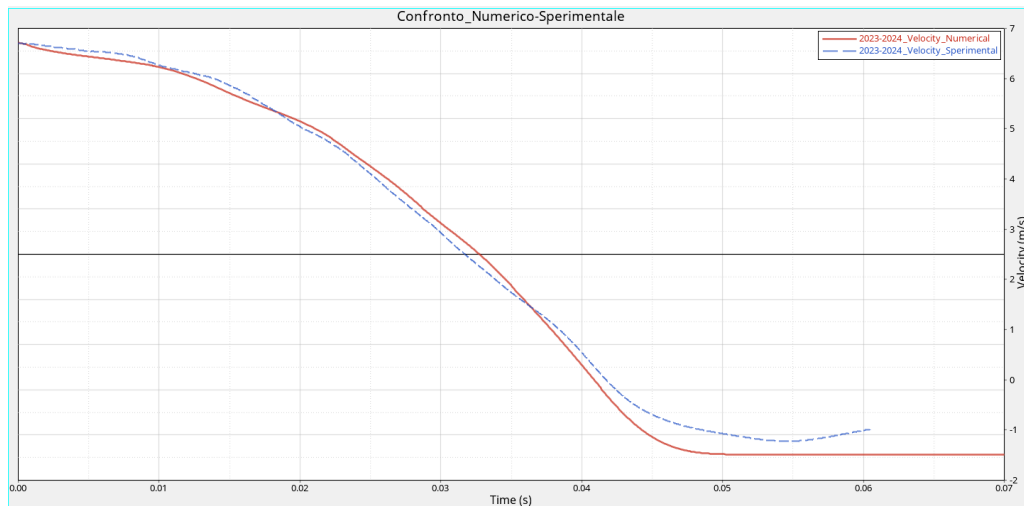


Figura 5.13 Grafico comparativo delle velocità di decelerazione del modello numerico e di quello sperimentale a confronto.

L'energia sperimentale nel confronto con il modello numerico è raffigurata di seguito. Il modello, stando ai dati ottenuti è molto in linea con le analisi sperimentali.

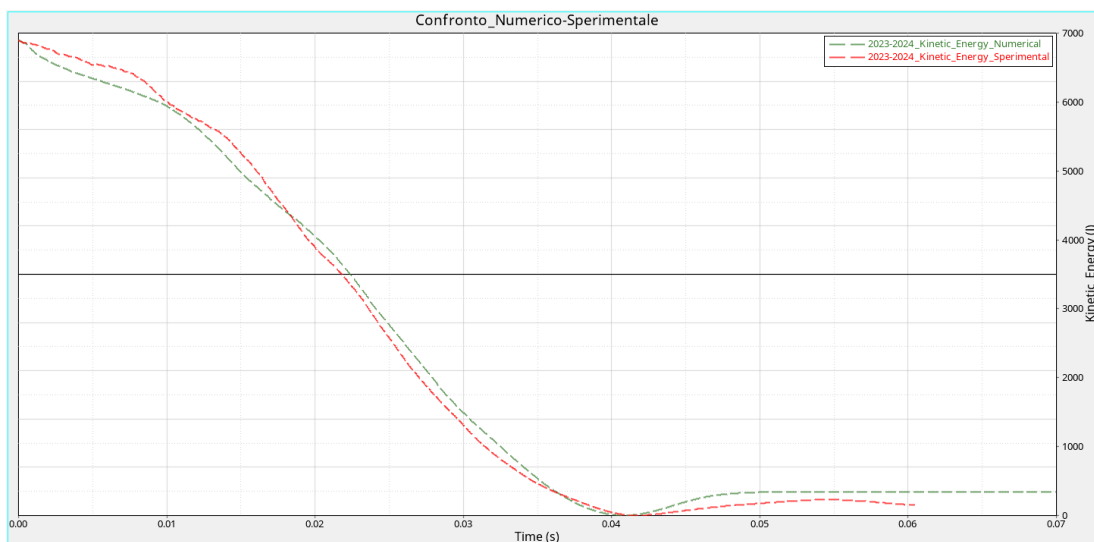


Figura 5.14 Grafico comparativo delle energie cinetica nel caso di modello numerico e sperimentale.

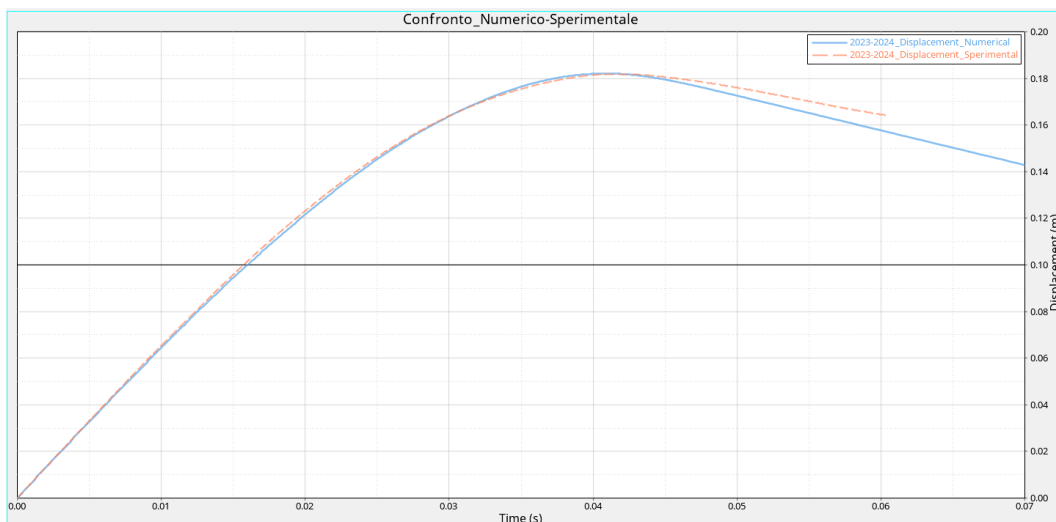


Figura 5.15 Grafico comparativo degli spostamenti del caso numerico e di quello sperimentale, ciascuna con la propria unità di misura.

Le differenze tra la curva sperimentale e quella numerica sono da attribuire ai diversi errori di manufacturing commessi durante la realizzazione dell'assorbitore. Infatti, tali errori di manufacturing oltre ad essere insiti nella realizzazione sono anche visibili ad occhio nudo osservando l'assorbitore.

```
>> MusettoFilter
max deceleration raw peak 33.868g, and filtered peak 32.6418 g
input initial cut time: 3.1665
input end cut time: 3.2270
mean deceleration 12.963g
cut ok?(1=yes) (0=no): 1
Absorbed energy: 6725.4469 J
Final displacement: 170.6774 mm
```

Figura 5.16 Risultati attesi secondo il modello analitico da confrontare con quelli ottenuti sperimentalmente e numericamente.

Stagione 2023-2024			
	Analitico	Sperimentale	Numerico
Max Decelerazione [g]	33.868	32.60	34.51
Energia Assorbita [J]	6709.22	6888.69	6878.20
Spostamento Totale [mm]	166.40	181.9	182.06

Tabella 5-2 Confronto risultati del modello analitico, numerico e simulazione sperimentale stagione 2023-2024.

5.2.1 Confronto danneggiamento numerico-sperimentale

Si riporta di seguito un confronto, numerico-sperimentale, riprodotto frame per frame del danneggiamento progressivo dell'assorbitore a seguito dell'urto. Per l'acquisizione video si è adoperata una videocamera fornita dall'azienda Dewesoft, la quale ha permesso un'acquisizione video su 1000 fps integrandola in un unico DAQ con l'accelerometro multi-assiale con fondo scala 50g. La scelta di quest'ultimo, per eventuali acquisizioni future, è da operare in maniera differente in quanto pur non

raggiungendo valori di picco superiori o prossimi ai 50g, si è vicini al fondo scala e quindi l'acquisizione del segnale è risultata essere leggermente falsata.

La videocamera utilizzata è stata gestita attraverso il software Dewesoft nel quale è stato possibile definire il trigger di acquisizione e garantire poi il post processing dei risultati in maniera dettagliata, con un frame per ogni millesimo di secondo scansionato. L'obiettivo di questo paragrafo è quello di creare una corrispondenza biunivoca tra il meccanismo di danneggiamento reale, quindi sperimentalmente riscontrato, e quello numerico.-

La distinzione cromatica è stata definita opportunamente in modo da avere un riscontro dell'avanzamento della massa durante l'urto. Infatti, sull'assorbitore reale sono state realizzate, alla stessa distanza corrispondente alla variazione di rigidità a seguito della variazione del layup, delle linee di colore bianco che permettono di istituire una corrispondenza tra il modello numerico e quello sperimentale.

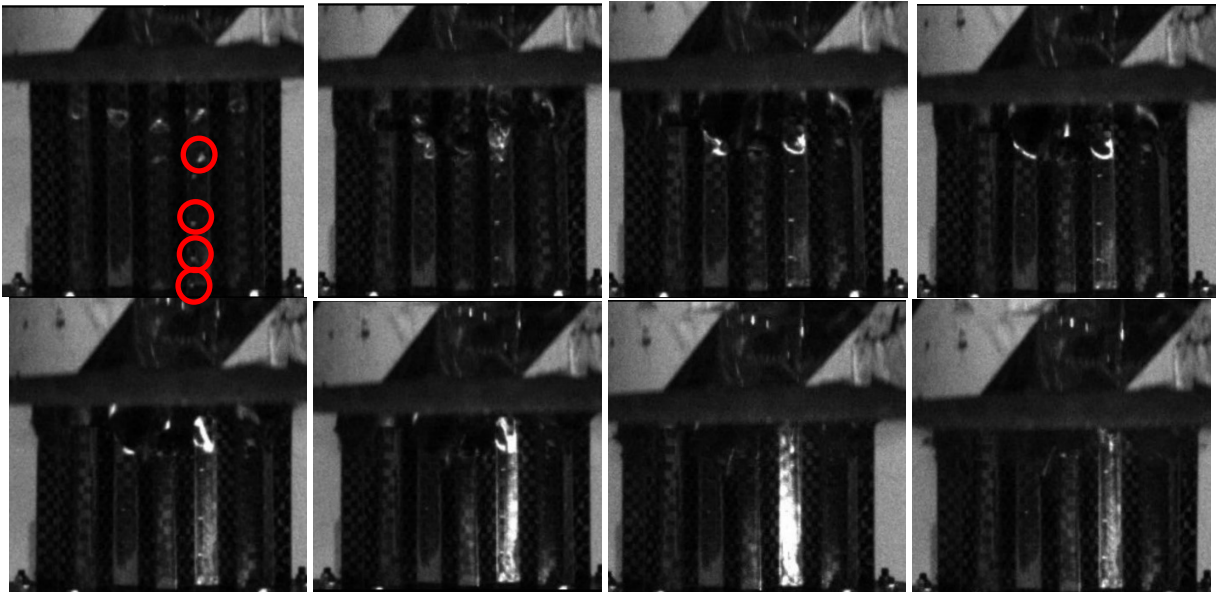


Figura 5.17 Grafico frame by frame della sequenza temporale per il danneggiamento sperimentale dell'assorbitore nel caso sperimentale. Test effettuato in torre di caduta in OZ.

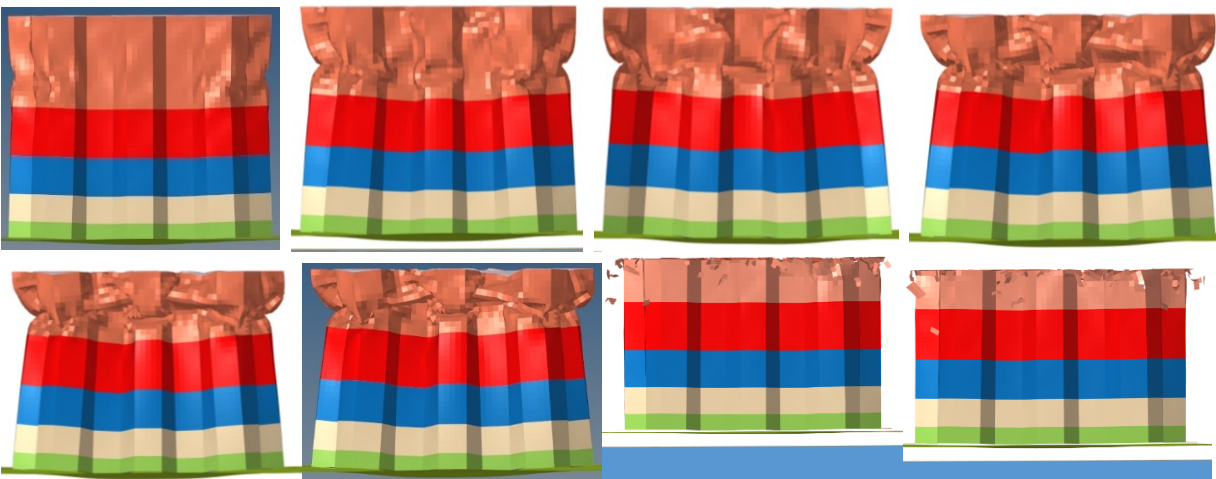


Figura 5.18 Grafico frame by frame della sequenza temporale per il danneggiamento numerico dell'assorbitore nel caso numerico.

Come è possibile osservare dalle precedenti istantanee ottenute durante il test in torre di caduta, si nota che per i primi istanti ove il contatto inizia tra la massa e l'assorbitore si ha un comportamento plastico del materiale che genera una deformazione sulle pareti laterali dove le stesse si iniziano a deformare lateralmente avvolgendosi su sé stesse. Le prime porzioni di composito che vanno rompendosi si trovano in corrispondenza dei 7-8 ms dall'inizio della prova dove la deformazione plastica in corrispondenza delle pareti laterali è tale da indurre cedimento nell'assorbitore.

Ciò che si vuol sottolineare in questa trattazione non è tanto la deformazione istantanea, in quanto di difficile definizione, piuttosto ciò che interessa sottolineare è il luogo in cui avvengono le rotture ed anche in corrispondenza di quali istanti temporali. Infatti, a partire dal 7-8 ms della prova si nota che la rottura avviene nel punto in cui la struttura grecata è meno rigida e quindi ampiamente antecedente il primo punto segnato sull'assorbitore. Infatti, la prima rottura interessa solamente la porzione di assorbitore che è costituita da 2 plies di composito, le prime due a partire dalla parte superiore dell'assorbitore.

Con riferimento a quanto appena sottolineato, si noti che il danneggiamento, avviatosi intorno ai 7-8 ms prosegue fino al completo danneggiamento delle prime due plies di composito, senza che alcuna altra parte dell'assorbitore raggiunga il failure, in corrispondenza dei 12-13 ms. Come visibile dalle seguenti figure, si nota che in corrispondenza del cerchio rosso, ovvero laddove termina la sezione costituita dalle due prime plies, si ha una buona adesione al modello che, all'interno della stessa finestra temporale sperimentale (12-13 ms) presenta una rottura analoga a quella registrata attraverso la videocamera.

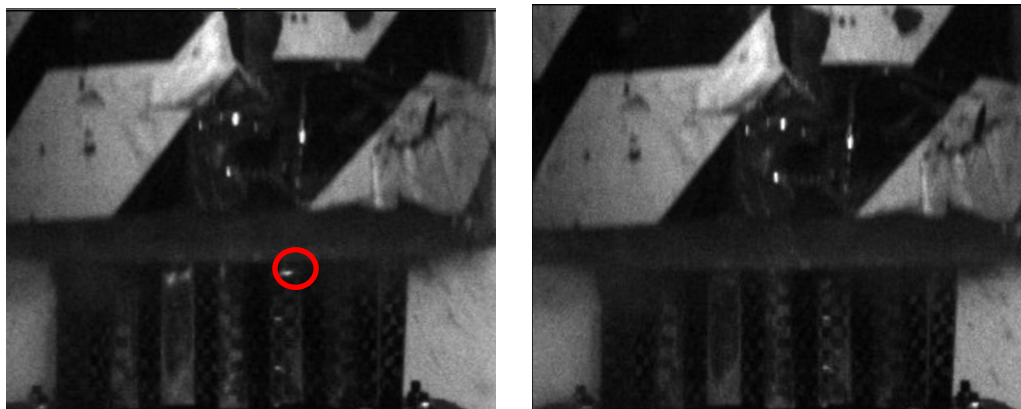


Figura 5.19 Momento in cui avviene il danneggiamento dell'assorbitore in corrispondenza della variazione di rigidità, da 2 a 3 plies in termini di layup. Frame di riferimento 12-13.

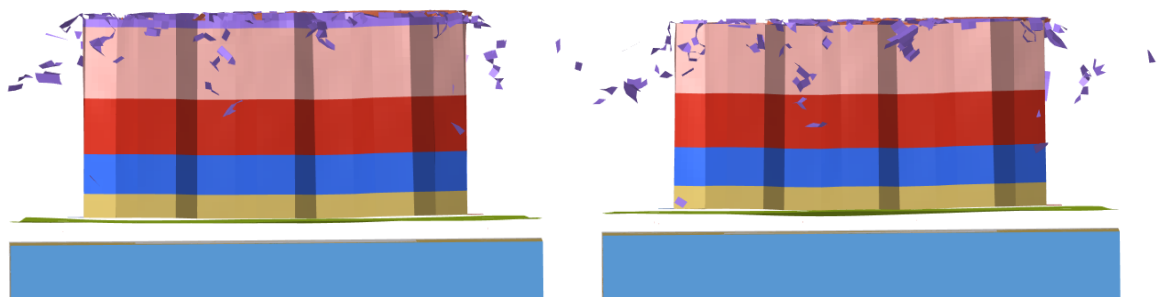


Figura 5.20 Momento in cui avviene il danneggiamento dell'assorbitore in corrispondenza della variazione di rigidità. Frame di riferimento 12-13.

5.3 Confronto stagione 2022-2023 – 2023-2024

Con riferimento a quanto precedentemente riportato, nel seguito di questo capitolo si vuole rappresentare il confronto tra gli assorbitori relativi alle due stagioni. Tale confronto verrà strutturato in modo tale da identificare le differenze reali ed oggettive a livello sperimentale e solo successivamente

valutare le analoghe differenze a livello numerico, andando a considerare il livello di accuratezza che il modello numerico offre con riferimento al caso sperimentale e di conseguenza riportando le considerazioni atte a definire la sensibilità del modello in fase di design.

5.3.1 Introduzione

Ciascun colore dell'assorbitore è associato ad una determinata proprietà che rappresenta a sua volta una sequenza di laminazione. Si ricorda, come riportato nel capitolo 3, che la sequenza di laminazione è implementata dall'alto verso il basso con l'aumento del numero di pelli che vengono sovrapposte le une alle altre in favore di un aumento di rigidità dall'alto verso il basso e quindi dalla parte prossima alla sommità dell'assorbitore e la parte del supporto simulante il comportamento strutturale della monoscocca.

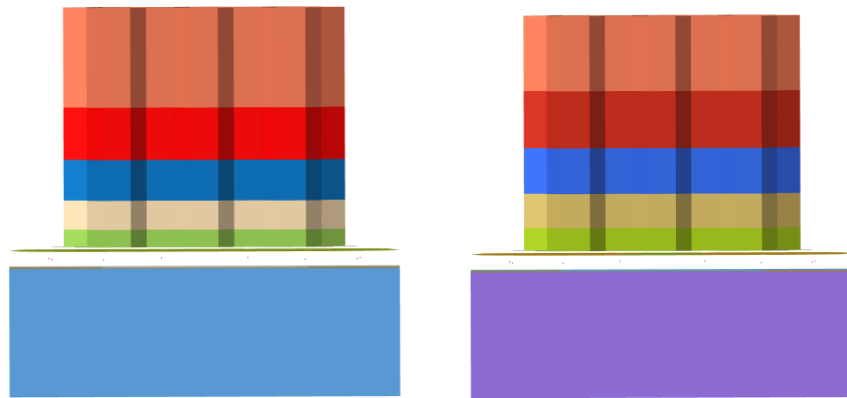


Figura 5.21 Modelli numerici a confronto: a sinistra quello relativo alla stagione 2022-2023 ed a destra quello della stagione 2023-2024.

La colorazione è da intendersi analoga, a differenza della leggera variazione della scala cromatica tra l'immagine di sinistra e quella di destra, tra i due assorbitori. Si può osservare che nel modello della stagione 2023-2024, il tratto con due sole pelli interessa una lunghezza dell'assorbitore superiore rispetto a quello della passata stagione, a conferma del fatto che la sequenza di laminazione risulta essere meno conservativa. In tal senso, al di là dei rilievi sperimentali e di quelli numerici, ci si aspetterà una maggiore deformazione dell'assorbitore in quanto l'assorbitore sarà globalmente meno rigido. Di contro la base dell'assorbitore è stata cambiata in termini di layout in quanto si è resa necessaria, come richiesto da regolamento, la variazione del layup della monoscocca e quindi del supporto stesso.

I colori corrispondenti indicano su entrambi gli assorbitori una sequenza di laminazione identica. Ciò che va cambiando è la lunghezza delle pelli stese ed in particolare l'altezza di ciascuna pelle con riferimento alla base dell'assorbitore.

Gli aspetti che si vogliono osservare in tal senso tra i due modelli sono i seguenti:

- Deformazione complessiva dell'assorbitore;
- Energia assorbita per unità di area;
- Ritorno elastico a fine impatto;
- Deformazione complessiva, al netto del ritorno elastico, dell'AIP,
- Modalità di danneggiamento dell'assorbitore.

Ciascuno di questi confronti è da intendersi in senso assoluto ovvero eseguito sia per il caso numerico che quello sperimentale.

5.3.2 Confronto numerico - sperimentale

Come primo riferimento si analizza il confronto sperimentale, pertanto reale ed oggettivo, tra l'assorbitore della stagione 2022-2023 e l'assorbitore della stagione successiva 2023-2024.

Si può osservare dal grafico seguente come l'assorbitore della stagione 2023-2024 sia effettivamente meno rigido di quello della passata stagione.

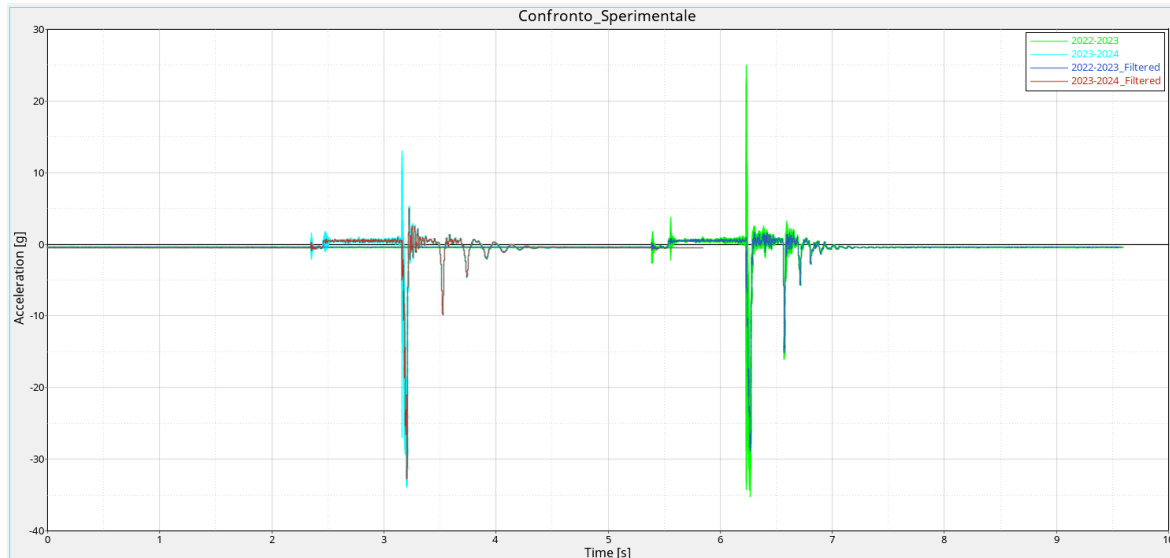


Figura 5.22 Confronto rilievi sperimentali, anche filtrati, delle stagioni 2022-2023 e 2023-2024.

Quanto detto è riscontrabile comparando i grafici sperimentali filtrati, ove si può notare come il picco di decelerazione maggiore sia, per l'assorbitore della stagione 2023-2024, in corrispondenza di oltre 30 g, precisamente 32.6 g contro i 28.7 g della precedente stagione. Una decelerazione superiore. Tale aspetto però, se non corrisposto in termini energetici, non è verificato sperimentalmente. Si procede pertanto al calcolo dell'energia cinetica associata alla massa in caduta, considerando valida l'ipotesi secondo cui l'energia cinetica viene convertita in energia interna e pertanto anche l'energia interna sia dell'uno che dell'altro assorbitore sono indirettamente poste in contrapposizione.

Per poter analizzare il caso relativo all'energia si convertono le curve in termini di unità di misura e solo successivamente si procede al calcolo dell'energia cinetica nei due casi. Si procede in tal senso andando a considerare la velocità della massa dell'assorbitore e campionando opportunamente la finestra temporale di laddove la massa raggiunge la velocità massima per poi iniziare a diminuire a seguito dell'impatto.

Si osservi che essendo state eseguite tali prove in due stagioni differenti e da due autori differenti la velocità di impatto sarà sicuramente diversa e pertanto diverse saranno le curve di accelerazione e di velocità. Consapevoli di tale considerazione è possibile comunque analizzare la bontà e accuratezza delle valutazioni effettuate nel seguito.

Integrando i dati sperimentali delle accelerazioni si ottengono le velocità della massa in caduta libera che impatta sull'assorbitore.

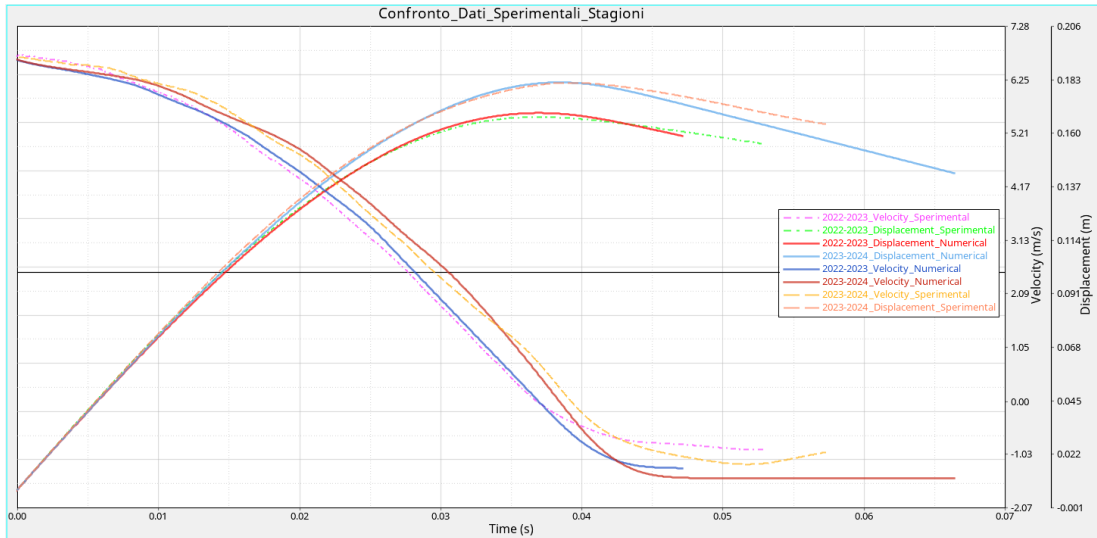


Figura 5.23 Confronto tra le due stagioni in termini di spostamento della massa battente nonché deformazione della stessa e relativa velocità.

Per una corrispondenza diretta, del solo impatto si vanno campionando le finestre temporali relative al solo fenomeno di crushing. In particolare, si scelgono come intervalli temporali i seguenti:

- Per la stagione 2023-2024 si ha un intervallo temporale [3.1665-3.2270] s;
- Per la stagione 2022-2023 si ha un intervallo temporale [6.23116-6.28964] s.

Campionando per tali intervalli si ottengono le seguenti curve di velocità e di conseguenza le seguenti curve di energia cinetica. Come visibile l'energia in gioco è molto diversa, maggiore per l'assorbitore della passata stagione rispetto a quello della stagione corrente. Sebbene questa disparità energetica la curva relativa all'accelerazione nel tempo mostra un picco minore rispetto a quello della stagione 2023-2024 e pertanto pur avendo un'energia assorbita superiore il picco è minore e dunque il layup è ottimizzato in termini di rigidità in modo che sia molto rigido per assorbire un'energia superiore ma allo stesso tempo accumula energia con un valore massimo di accelerazione più basso.

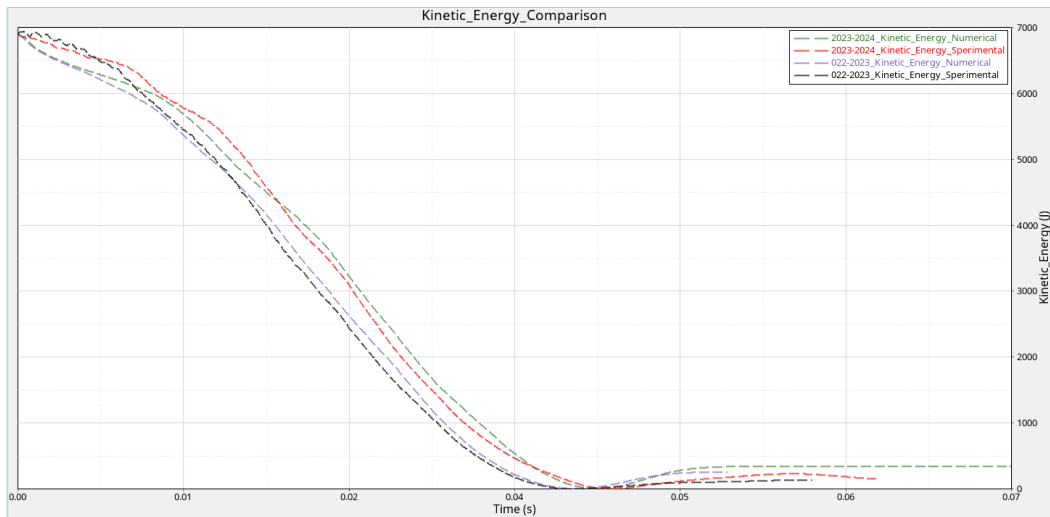


Figura 5.24 Confronto tra le due stagioni in termini di energia assorbita dalla crashbox in condizioni di perfetta conversione dell'energia cinetica in energia interna.

Se questo fosse vero ci si dovrebbe aspettare una deformazione dell'assorbitore più bassa, in quanto se maggiormente rigido a parità di forza applicata si deformerà meno ma in questo caso con un'energia cinetica addirittura superiore raggiunge un picco di decelerazione minore e pertanto una deformazione inferiore. Si riporta di seguito il confronto tra le due deformazioni sperimentali nel tempo, rispettivamente per le stagioni 2022-2023 e 2023-2024.

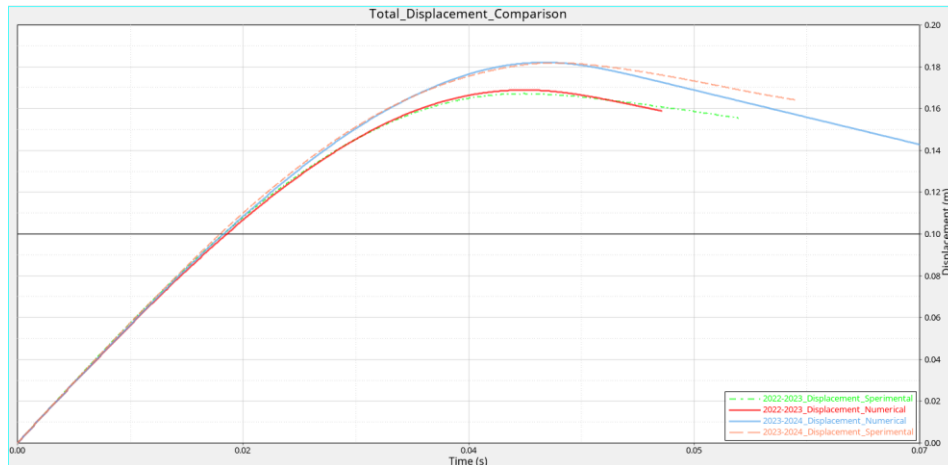


Figura 5.25 Confronto sperimentale e numerico dell'assorbitore delle due stagioni in termini di spostamento della massa sospesa ovvero di deformazione dell'assorbitore.

Un aspetto altrettanto importante che riguarda la gestione dell'energia immagazzinata è il ritorno elastico che l'assorbitore presenta in fase di rimbalzo della massa battente. Come visibile dalla figura 5.26, in corrispondenza della parte terminale della curva si può notare una differenza di energia nelle due curve. In particolare, quella che viene rappresentata è energia cinetica che però, supponendo un perfetto scambio di energia cinetica in energia interna, corrisponde alla quota parte elastica di energia interna totale che viene accumulata dall'assorbitore. L'assorbitore pertanto avrà un rilascio di energia elastica superiore rispetto alla stagione precedente a simboleggiare il fatto che l'assorbitore non ha lavorato in maniera ottimizzata dal punto di vista del danneggiamento. D'altronde, con un'energia cinetica inferiore si ha un picco di decelerazione superiore ed addirittura una deformazione maggiore.

Infine, un parametro su cui ci si sofferma e con il quale si vuole istituire un rimando con quanto discusso in apertura dell'elaborato in merito all'assorbitore realizzato in honeycomb è l'energia assorbita elastica assorbita dall'impact durante il danneggiamento della crashbox e rilasciata poi durante il rimbalzo.

Come visualizzabile dalla figura seguente, lo spostamento dell'AIP durante la prova, plottato in funzione del tempo, è diverso per le due stagioni. Tale spostamento è quello complessivo che comprende quindi sia l'eventuale deformazione plastica che anche quella elastica.



Figura 5.26 Mostra l'andamento dello spostamento e quindi la deformazione del piatto antintrusione nel tempo.

Proprio sulla componente elastica si vuole porre l'attenzione, in quanto tale energia corrisponde alla quota parte di energia che viene restituita alla massa in caduta libera durante la fase di rimbalzo. Infatti, a confermare ciò si può utilizzare il seguente grafico che rappresenta l'energia cinetica dell'assorbitore nel tempo. In particolare, è bene porre l'attenzione sulla parte della curva che segue l'annullamento dell'energia cinetica per poi mostrare un successivo aumento dovuto alla conversione dell'energia interna accumulata durante l'urto in energia cinetica della massa in rimbalzo.

È possibile notare tale corrispondenza, inoltre a partire dal fatto che durante il rimbalzo della massa non si hanno ulteriori dissipazioni per attrito in quanto la massa ha già lasciato il contatto con l'assorbitore e pertanto la quota parte di energia interna è stata ceduta sotto forma di energia cinetica alla massa in caduta. Come visibile dalla figura seguente, a partire da circa 40 ms si nota che l'energia cinetica si annulla per poi aumentare. I valori che tale energia assume in fase di risalita sono inseriti all'interno della tabella 5.3 in relazione ai valori numerici ottenuti dal modello.

I valori numerici ottenuti dal modello derivano dalla valutazione dell'energia come prodotto di tensione per deformazione quadrata e successivamente dimezzando tale valore si ottiene l'energia assorbita dall'assorbitore nell'ultimo tratto utile e dal piatto antintrusione.

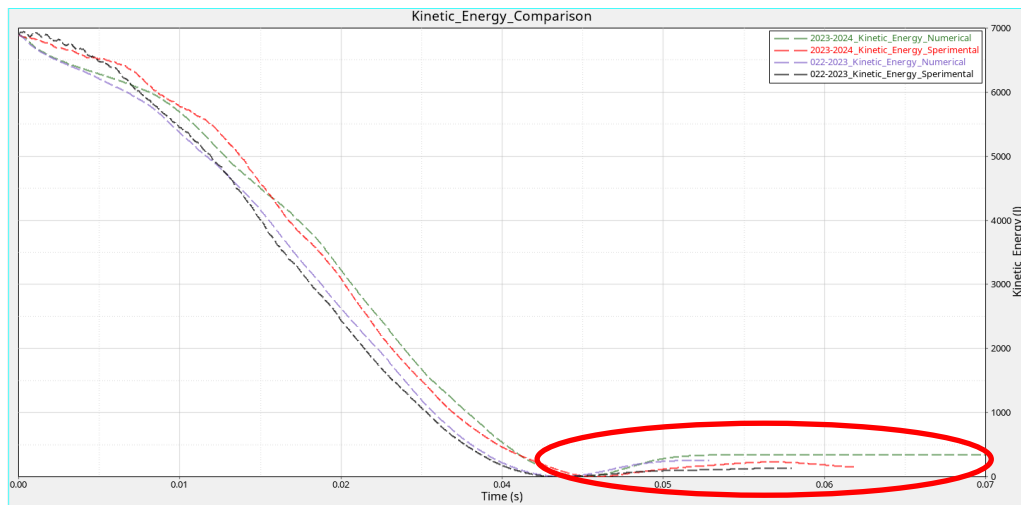


Figura 5.27 Mostra l'andamento, con particolare attenzione, dell'energia cinetica nel tempo.

Nella parte terminale del precedente grafico si considera la quota parte di energia elastica che viene rilasciata in fase di risalita dell'assorbitore. Di seguito sono riportate le curve ed i successivi passaggi atti a determinare la densità di energia interna immagazzinata durante l'urto.

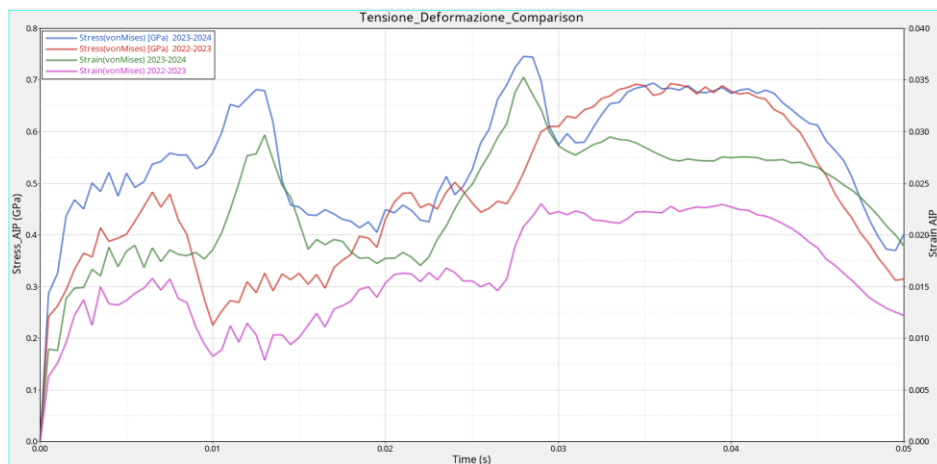


Figura 5.28 Andamento di tensione e deformazione nel tempo per le stagioni 2022-2023 e 2023-2024.

Il calcolo è stato effettuato per entrambe le stagioni in modo da poter comparare anche la differenza di energia accumulata come energia elastica da parte del piatto anti-intrusione. Infatti, come già possibile notare dalle curve relative alle deformazioni dell'AIP, durante la prova relativa alla stagione 2023-2024 l'AIP ha lavorato in maniera maggiore in quanto la deformazione, la tensione e quindi l'energia interna sono superiori rispetto a quelli della stagione 2022-2023. Ciò è visibile, in termini deformativi e tensionali dalla figura precedente, mentre in termini energetici da quella successiva.

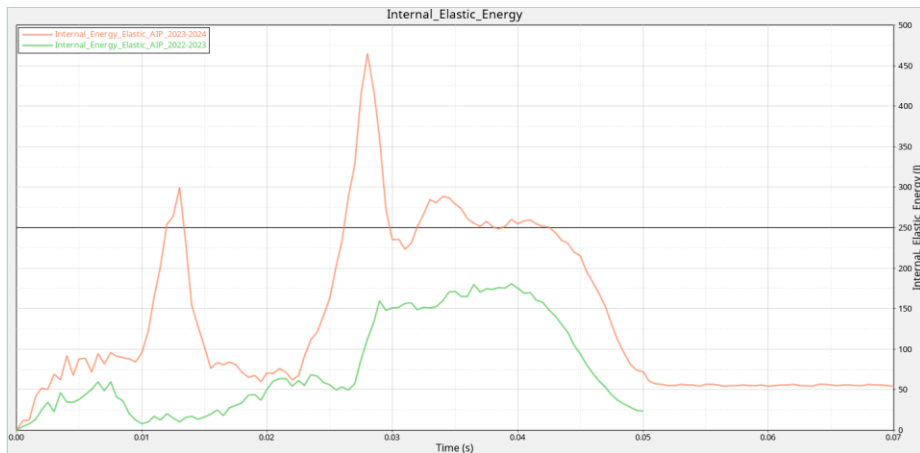


Figura 5.29 Figura rappresentativa dell'energia interna accumulata dall'AIP. Particolare attenzione va al tratto successivo ai 40 ms.

5.4 Aspetti critici e problematiche affrontate

In questo paragrafo si riprendono alcuni aspetti elaborati in questo capitolo al fine di sviscerare i problemi affrontati durante la modellazione e conseguente analisi numerica. Infatti, pur avendo caratterizzato numericamente il materiale e quindi pur avendo riprodotto le curve sperimentali ottenute in laboratorio nell'ambiente simulativo, i primi problemi affrontati riguardavano l'aumento di massa all'interno del modello. Problematiche di questo tipo sono state affrontate innanzitutto pensando che il materiale fosse caratterizzato in modo errato e solo successivamente si è risaliti alla causa principale, ossia i contatti.

In particolare, i contatti tra le lamine di carbonio e la massa in caduta libera generavano un contatto localizzato che per essere risolto richiedeva di aggiungere massa al modello ed una riduzione significativa del time-step (di seguito un grafico rappresentativo del time-step nel tempo).

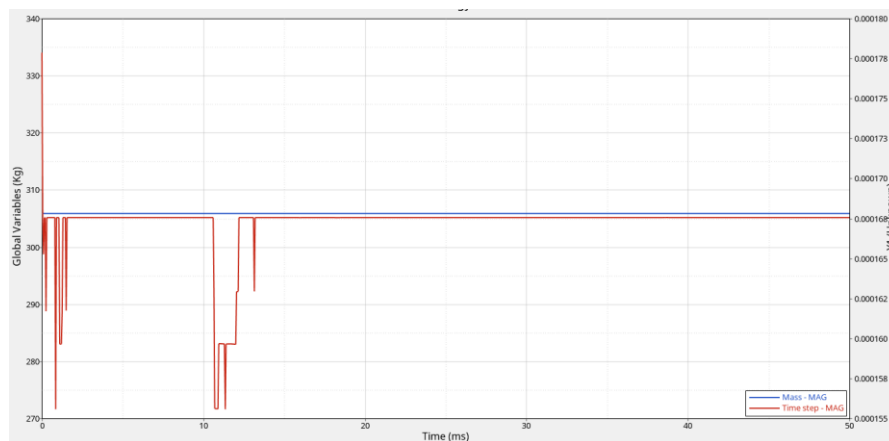


Figura 5.30 Grafico correlativo massa-time step in condizioni già di convergenza.

I parametri su cui maggiormente si è iterato sono INACTI e IGap (cfr. Capitolo 4, paragrafo 4.7). Chiaramente, tali errori in termini di massa si ripercuotono sull'energia in gioco ed in particolare quella cinetica che di riflesso genera degli scompensi nei riguardi di quella interna. Inoltre, lo spostamento della massa battente risulta essere maggiore di quello che sperimentalmente si può registrare.

In tal senso, per scongiurare errori grossolani di modellazione si possono confrontare le curve di decelerazione con riferimento ai dati sperimentali. Da tale confronto è possibile risalire alla tipologia di errore, o meglio alla causa dell'errore in quanto la tipologia può essere identica per diverse cause ad essa correlate. Se l'errore è generato dal materiale non ci si aspetta un incremento di massa insieme ad una curva di decelerazione differente da quella sperimentale ma soltanto una curva che non segue i dati sperimentali (magari per un errore nell'inserimento del modulo elastico oppure delle tensioni di snervamento o rottura). Nel caso invece di errore nel contatto si avranno, per la maggior parte dei casi, errori di massa associati a decelerazioni (e relative curve) non previste.

Di seguito viene riportato un grafico che pone in relazione la differenza tra le due casistiche precedentemente esposte.

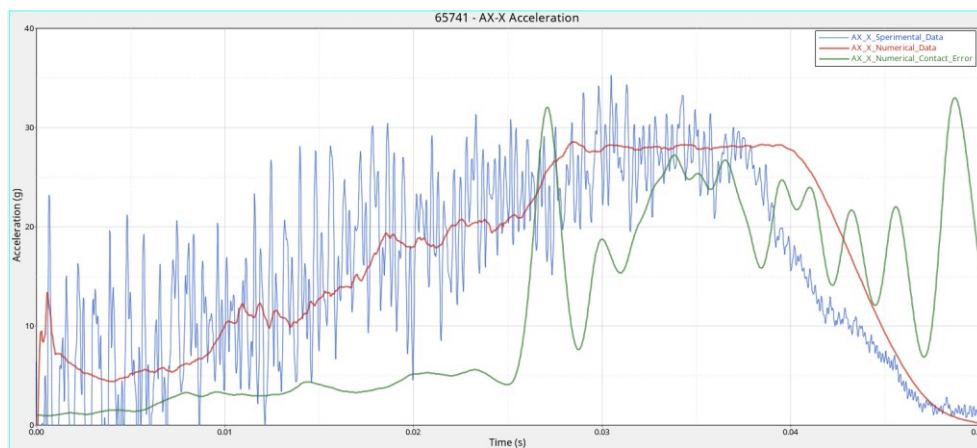


Figura 5.31 Confronto tra i dati sperimentali e numerici della stagione 2022-2023 con riferimento all'errore (curva verde) legato all'errore nella definizione del materiale associato ad un errore di contatto.

Un altro tipo di errore riscontrato durante la modellazione dell'assorbitore è legato alla definizione, all'interno della card del materiale, del parametro che regola l'eliminazione o meno dell'elemento a seguito del raggiungimento della condizione energetica di failure.

Come discusso nel capitolo 4, tale parametro è l_{off} . Tale errore però è sì imputabile alla definizione del materiale ma si riflette in un errore di contatto. Questo perché nel momento in cui un elemento raggiunge la condizione di failure e si distacca dall'assorbitore, se non venisse eliminato, rientrerebbe all'interno del contatto generando un possibile errore di massa dovuto al fatto che l'assorbitore, procedendo nel suo moto, incontra un elemento che ha una rigidità irrisoria rispetto a quella dell'assorbitore stesso. Questo genera pertanto un problema di tipo numerico che fa aumentare esponenzialmente la massa complessiva del modello.

In tal senso, per scongiurare tale problematica si è proceduto andando ad eseguire il debug del modello partendo da un primo run nel quale si è analizzato un contour dell'energia e degli stress per ciascun elemento che si è staccato dall'assorbitore con l'obiettivo di conoscere il motivo per il quale si è raggiunta la condizione di rottura ossia se per limite di energia o di tensione raggiunto. Infatti, conoscendo sperimentalmente tali valori di energia e di stress limiti si può risalire, plottando le energie e gli stati tensionali degli elementi che si sono rotti nelle fasi antecedenti il cedimento totale, alla causa del distacco, appunto se energetica o tensionale.

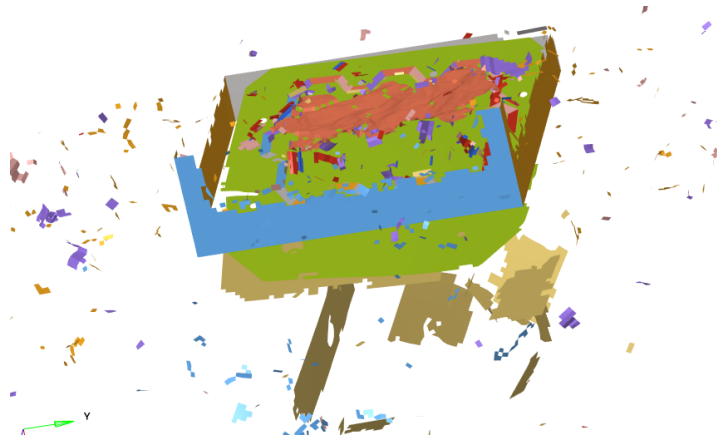


Figura 5.32 Errore numerico dovuto all'incremento della massa all'interno del modello e quindi un conseguente incremento dell'energia cinetica.

A seguito di ciò si vanno a identificare quegli elementi e ad essi si associa, nella card del materiale (se necessario si organizzano questi elementi in un componente a cui associare la proprietà specifica) il parametro I_{off} corrispondente a quella modalità di cedimento, se energetica allora si utilizza I_{off} pari a 5 o 6 viceversa se tensionale si può inserire il parametro unitario.

Infine, ciò che può essere implementato nel futuro riguarda il contatto iniziale tra la massa e l'assorbitore. Infatti, se si considera la curva dell'accelerazione numerica a confronto con quella dei dati sperimentali, si notano dei picchi di decelerazione immediati che nella realtà sperimentale non sono presenti. Si potrebbe trattare di un problema numerico dovuto al fatto che l'assorbitore entra in contatto con la massa battente lungo il perimetro della sua faccia superiore e pertanto, parlando in termini di ambiente CAE, lungo un edge. Il contatto superficie-edge non viene ben colto dal contatto INTER/TYPER/7. Si potrebbe utilizzare invece la tipologia di contatto INTER/TYPER/11 che gestisce i contatti anche tra superfici e spigoli e potrebbe evitare un riflesso dinamico che con la contact property utilizzata in questo elaborato invece si verifica. In Fig.5.32. si possono vedere tali picchi delle curve di accelerazione se confrontati a quelli sperimentali.

CAPITOLO 6

Conclusioni

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Il modello numerico che è stato strutturato nel presente lavoro di tesi ha avuto un buon riscontro sperimentale. Il motivo di tale vicinanza ai dati sperimentali, in termini quantitativi, deriva dal fatto che i materiali utilizzati sono stati precedentemente caratterizzati sperimentalmente e poi numericamente. Infatti, sono stati inseriti nel modello tutti i parametri relativi anche al comportamento a rottura; in tal senso l'azienda ospitante HPE ha fornito alcuni parametri presenti nel loro database che sono stati utilizzati al fine di caratterizzare propriamente il materiale.

In tal senso, il modello numerico può essere utilizzato non solo per un pre-dimensionamento qualitativo ma anche come strumento atto a confrontare diversi layout in relazione alla metodologia di danneggiamento che maggiormente si vuole sfruttare. In particolare, si può andare a differenziare il comportamento dell'assorbitore a seconda di quanto si voglia o meno far contribuire all'assorbimento dell'energia altri componenti come ad esempio l'AIP. Il fatto di poter prevedere anche in maniera numerica lo spostamento della massa in caduta libera piuttosto che il contributo di ciascun layout nei confronti dell'energia assorbita permette anche il non dover testare diversi assorbitori al fine di conoscerne la rigidezza piuttosto che la deformazione degli stessi.

Anche ai fini delle prove statiche il fatto di poter giustificare una sola realizzazione dell'assorbitore con un buon livello di certezza tale per cui non si rende necessaria una seconda prova per validare la stessa è motivo di risparmio sia economico che anche di tempo. Tale aspetto è sicuramente ben visto in ottica Formula SAE e soprattutto in ottica degli eventi statici quali cost e design a cui i membri del Team sono sottoposti.

Il miglioramento di tale modello numerico risiede nella modellazione delle colle per le quali sono stati inseriti dei contatti a simulare una saldatura anziché un vero e proprio incollaggio, tramite la funzione "tie", utilizzata solitamente per contatti molto rigidi. La modellazione delle colle può essere effettuata in maniera semplice con elementi shell ai quali si va attribuendo un certo spessore pari allo spessore della colla utilizzata. Un aspetto da non trascurare è il fatto di avere a disposizione una caratterizzazione sperimentale della colla utilizzata in quanto sarà necessario fornire tutti i parametri richiesti dal modello durante la caratterizzazione numerica della colla stessa.

Inoltre, si può ritenere utile modellare le viti in maniera fisica anziché utilizzare delle spring al fine di sincerarsi del fatto che queste stesse non assorbano energia deformandosi in maniera elastica e rilasciandola solo successivamente in fase di rimbalzo della massa. L'obiettivo in tal senso potrebbe essere quello di adottare una modellazione fisica della vite con tanto di collegamento rigido a tutti i nodi della stessa. Il precarico andrà poi successivamente inserito come fatto per la presente trattazione.

Se si utilizza una versione di RADIOSS 2022 sarà possibile anche inserire un rigid wall con una velocità iniziale in modo di simulare la massa battente che si muove con la velocità di 6.76 m/s. In tal caso è stato definito il modello con una massa battente modellata tramite elementi shell i cui nodi sono collegati ad un rigido con massa pari a quella della massa battente. In tal caso però si è visto che nella prima fase dell'impatto si hanno delle imprecisioni numeriche dovute alla differenza di rigidezza riscontrata tra la massa e l'assorbitore, in particolare le prime due plies esterne. Per attenuare tale aspetto si è deciso di limitare il contatto massa assorbitore eliminando il collegamento rigido alla prima fila di nodi della massa in modo da non avere il picco di rigidezza, lato massa battente, in corrispondenza della zona di contatto. Nel caso si adotti il rigid wall questo problema numerico potrebbe non sussistere in quanto non vi saranno elementi a contatto con differenze ingenti di rigidezza.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio la mia famiglia che mi è sempre stata vicino. Ringrazio la mia famiglia che mi ha sempre lasciato la possibilità di inseguire le mie passioni. Non mi è mai mancato nulla e per questo so di essere molto fortunato. Vorrei inoltre ringraziare i miei nonni, che nonostante la distanza hanno saputo essere sempre vicini. Vorrei ringraziare anche tutti i miei amici che nel corso di questi anni mi sono stati vicini e chiunque io abbia incontrato durante il percorso e che mi ha arricchito a suo modo.

Vorrei ringraziare anche il professore Giovanni MENEGHETTI che mi ha dato la possibilità di integrare l'esperienza in HPE Group con il progetto di Formula SAE dell'Università di Padova, rinnovando ancora una volta la potenzialità delle collaborazioni tra università e azienda. Vorrei ringraziare anche tutto il team Race UP con il quale ho passato dei momenti di crescita formativa e personale e che con grande piacere custodisco nel percorso.

Grazie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Crashworthy capability of composite material structures, A. G Mamalis, P* M. Robinson,' D. E. ManolakosP G. A. DemosthenousP M. B. Ioannidis” & J. Carruthersb;
- [2] Marino Quaresimin, Mauro Ricotta, Livio Martello, Stefano Mian. Energy absorption in composite laminates under impact loading.
- [3] Formula Student Rules 2023-2024: Formula Student Germany
- [4] ASTM D3039-D3039M – 00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, American Standard Society for Testing Materials, 2000
- [5] ASTM D3518-D3518M – 18, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of PolymerMatrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate, American Society for Testing Materials, 2018
- [6] ASTM D3410-D3410M – 16, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, America Society for Testing Materials, 2016
- [7] <https://help.altair.com/hwsolvers/rad/index.htm>
- [8] Progettazione ad impatto di un musetto FSAE realizzato con struttura sandwich, Silvia Candela, Master Thesis, University of Padua,2019-2020
- [9] Caratterizzazione statica di materiali compositi a matrice polimerica per impieghi strutturali, Gianluca Faggian
- [10] Farley, G. L. and Jones R. M., crushing characteristics of continuous fibre-reinforced composites tubes J. Comp. Mats, 26 (1991) 37.
- [11] Investigation of the energy absorption mechanisms arising in automotive structures. Comparison between aluminium alloys and composite materials, from the experimental evidence to the numerical scenario, Ignazio Lo Presti, University of Modena and Reggio Emilia, March,2019.
- [12] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Viegelahn, G. L. and Baldoukas, A. K., Bending of fibre-reinforced composite thin-walled tubes. Composites, 21, (1990) 431.
- [13] Savage, G. Safety and survivability in Formula One motor racing. Metals and materials, March, 1992,147.
- [14] Fairfull, A. H. and Hull, D., Energy absorption of polymer matrix composite structures: Friction effects. Structural Failure for International Symposium on Structural Failure, MIT, 1988, 255.
- [15] Farley, G. L., Effect of fibre and matrix maximum strain rate on the energy absorption of composite materials. J. Comp. Mats, 20 (1986) 322.

- [16] ASTM D3039-D3039M – 00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, American Standard Society for Testing Materials, 2000.

- [17] ASTM D3518-D3518M – 18, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate, American Society for Testing Materials, 2018.

- [18] ASTM D3410-D3410M – 16, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, American Society for Testing Materials, 2016.

- [19] ASTM C273/C273M – 18, *Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*, American Society for Testing Materials, 2018

- [20] ASTM D7336/D7336M – 16, *Standard Test Method for Static Energy Absorption Properties of Honeycomb Sandwich Core Materials*, American Society for Testing Materials, 2016