

# **POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



Progetto di un assorbitore di urto frontale con utilizzo di schiuma metallica

Relatore: Chiar.mo Prof. Michele MONNO

Correlatore: Ing. Valerio MUSSI

Tesi di Laurea di:

Carlo CASSINARI

Matricola 718203

Anno Accademico 2009 – 2010







# Ringraziamenti

Questo è un momento speciale per me, che rappresenta la fine di un periodo della mia vita e l'inizio di un altro.

Da oggi divento una persona nuova, posso dire davvero che da oggi divento "grande".

Da solo però non avrei potuto raggiungere questo traguardo, e per questo motivo desidero ringraziare alcune persone.

Innanzitutto il Professor Michele Monno, per avermi permesso di svolgere il lavoro di tesi presso il Laboratorio MUSP e per aver saputo consigliarmi con competenza nei momenti in cui ne ho avuto bisogno durante il lavoro di tesi. Allo stesso modo ringrazio due persone che sono state fondamentali per la buona riuscita della tesi; Valerio Mussi e Andrea Rossi.

Vi ringrazio per il sostegno e l'aiuto costante durante tutto il lavoro di tesi e per avermi fatto sentire un vostro amico prima che un vostro collaboratore.

Desidero inoltre ringraziare il Professor Andrea Bernasconi e l'Ing. Sergio Fontanella, che mi hanno aiutato quando ho avuto necessità nonostante non avessero alcun obbligo nel farlo.

Un ringraziamento sentito va alla Dott.ssa Simonetta Boria, per l'estrema disponibilità che ha sempre mostrato nei miei confronti.

Oltre alle persone con cui ho collaborato durante la tesi, ho avuto la fortuna di aver accanto molte altre persone speciali durante questi sette anni di università.

Ringrazio mio padre per avermi dato la forza di impegnarmi in questo percorso di studi e per avermi trasmesso l'amore per la meccanica che lui, ingegnere dentro, ha sempre avuto.

Ringrazio mia mamma per essermi sempre stata vicina e per avermi sempre pensato intensamente durante gli esami, mia sorella per i suoi decisivi "in bocca al lupo" prima degli esami, Filippo e i miei nipotini per avermi regalato sempre sorrisi quando ero a casa.

Oltre a una sorella, devo ringraziare due "fratelli mancati"; grazie Nicola e Matia perché ogni volta mi dimostrate che la vostra amicizia è una di quelle cose che ci sarà sempre e che mi rende felice.

Grazie anche ad Alex, Giova, Marco, Riccardo e a tutti quelli che ho dimenticato perché dovrei ringraziare tutti e sicuramente dimenticherò qualcuno.

Grazie ad Alberto e Barbara per avermi sempre sostenuto in questi anni e per avermi sempre fatto sentire a casa.

Dulcis in fundo, voglio ringraziare quella che in questi anni è stata la mia prima tifosa.

---

## Ringraziamenti

---

Quella che ha creduto ancora prima di me, che ce la potessi fare.

Il mio percorso durante la laurea specialistica è stato molto migliore di quello durante la triennale, sia come impegno che come risultati.

Non a caso, Sara, ti ho conosciuto pochi giorni prima di iniziare le lezioni del primo anno di specialistica.

Non sei mai stata un ostacolo ai miei studi, anzi; mi hai aiutato a credere in me e diventare più determinato, mi hai incitato sempre e dato la forza per continuare nei momenti difficili.

C'è tanto di tuo nella giornata di oggi, sei tu che l'hai resa possibile.

Sei la persona che ho sempre voluto incontrare e voglio che tu sia sempre al mio fianco.

Grazie!

---

---

## Indice Generale

1 INTRODUZIONE .....	1
1.1 IL LAVORO DI TESI .....	1
1.2 IL LABORATORIO MUSP .....	2
1.3 LA PICCHIO S.P.A .....	4
2 LE SCHIUME METALLICHE .....	7
2.1 CARATTERISTICHE DELLE SCHIUME .....	8
2.2 METODI PER REALIZZARE LE SCHIUME .....	10
2.3 APPLICAZIONI DELLE SCHIUME METALLICHE.....	13
3 GLI ASSORBITORI DI URTO FRONTALE .....	15
3.1 INDICI DI PRESTAZIONE .....	15
3.2 LA RICERCA PRESENTE IN LETTERATURA .....	16
3.3 LE NORMATIVE DI SICUREZZA PASSIVA .....	19
4 PROGETTO DI UNA NUOVA SOLUZIONE .....	21
4.1 SOLUZIONE ATTUALMENTE UTILIZZATA.....	21
4.2 SPECIFICHE DI PROGETTO .....	22
4.3 NUOVA SOLUZIONE.....	24
4.3.1 ANALISI DELLA SOLUZIONE ESISTENTE .....	24
4.3.2 PROGETTO DI UNA NUOVA SOLUZIONE .....	24
4.4 TEST SUI MATERIALI PRECEDENTI IL LAVORO DI TESI.....	26
4.5 METODO DI REALIZZAZIONE .....	29
5 PROVE SPERIMENTALI PRELIMINARI.....	31
5.1 TEST QUASI STATICI.....	31
5.1.1 PROVA DI TRAZIONE .....	38
5.1.2 PROVA DI COMPRESSIONE.....	44
5.1.3 MISURAZIONE AL MICROSCOPIO OTTICO.....	48
5.2 TEST DINAMICI .....	51
6 ANALISI FEM DELLA SOLUZIONE IDEATA .....	55

6.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO .....	56
6.1.1 STUDIO MODELLI ESISTENTI E SOLUZIONI ADOTTATE .....	56
6.1.2 MODELLO NUMERICO DELLA SOLUZIONE IDEATA.....	60
6.1.3 PROBLEMATICHE INCONTRATE .....	65
6.2 RISULTATI OTTENUTI .....	67
6.2.1 ANALISI DELL'INFLUENZA DELLA POSIZIONE DELLA PELLE PIU' SOTTILE .....	70
6.2.2 ANALISI DELL'INFLUENZA DELLA MODALITA' DI COSTRUZIONE .....	72
6.2.3 ANALISI DI ALTRE CONFIGURAZIONI DELL'ASSORBITORE .....	74
6.2.4 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI .....	78
6.3 SOLUZIONE CON GEOMETRIA DIFFERENTE.....	84
7 REALIZZAZIONE DELLA CRASH BOX .....	89
8 ANALISI SPERIMENTALE DELLA SOLUZIONE IDEATA .....	111
9 CONFRONTO RISULTATI NUMERICI E SPERIMENTALI .....	121
9.1 RISULTATI DELLA PROVA SPERIMENTALE.....	121
9.2 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE NUMERICA .....	125
10 CONCLUSIONI .....	131
Bibliografia .....	135



## Elenco delle figure

Figura 1.1: Schema della Rete alta tecnologia .....	3
Figura 1.2: La sede della Picchio S.p.a.....	4
Figura 2.1: Schiuma metallica .....	7
Figura 2.2: Curva sforzo-deformazione per schiuma metallica .....	9
Figura 2.3: Grafico forza-spostamento (Foam è la schiuma da sola, AR il metallo da solo, AR+foam i valori delle due curve sommati e F2 l'assorbitore con riempimento in schiuma) .....	10
Figura 2.4: Procedura di realizzazione schiuma metallica da precursore solido	12
Figura 2.5: Pannelli sandwich con cuore in schiuma di alluminio .....	13
Figura 3.1: Schematizzazione prova urto frontale .....	20
Figura 4.1: Vettura di classe CN2 .....	21
Figura 4.2: Assorbitore d'urto utilizzato da Picchio S.p.a. ....	22
Figura 4.3: Prova di compressione honeycomb lungo l'asse della cella (velocità 12 mm/s) .....	26
Figura 4.4: Provino testato .....	27
Figura 4.5: Macchina per la prova di compressione .....	27
Figura 4.6: Risultati mediati prova di compressione.....	28
Figura 5.1: Pannello sandwich di partenza .....	32
Figura 5.2: Sezione del pannello sandwich .....	33
Figura 5.3: Attrezzatura per taglio AWJ .....	34
Figura 5.4: Bloccaggio del pannello su macchina per taglio AWJ .....	34
Figura 5.5: Provini per prova trazione e compressione .....	35
Figura 5.6: Provini per la prova di trazione prima (immagine a sinistra) e dopo (destra) la fresatura.....	35
Figura 5.7: Fresatrice.....	36
Figura 5.8: Macchina per la prova di trazione .....	39
Figura 5.9: Provino pronto per la prova di trazione; si nota l'estensimetro MTS .....	40
Figura 5.10: Cella di carico utilizzata per la prova di trazione .....	41
Figura 5.11: Provino dopo rottura a trazione .....	42
Figura 5.12: Schiacciamento locale del secondo provino .....	42
Grafico 5.1: Risultati prova di trazione .....	43
Figura 5.13: Macchina prova di compressione .....	44
Figura 5.14: Cella di carico prova di compressione.....	45
Figura 5.15: Provino pronto per la prova di compressione .....	46
Figura 5.16: Risultato della prova su un provino .....	47
Grafico 5.2: Risultati prova di compressione .....	47

Figura 5.17: Microscopio LEICA MZ 75 .....	50
Figura 5.18: Fotografia al microscopio ottico; si nota la pelle e, appena sopra, le prime bolle.....	50
Figura 5.19: Provini quadrati .....	51
Figura 5.20: Provino pronto per la prova su torre di caduta.....	52
Figura 5.21: Confronto tra provino compresso (a sinistra) e non (destra) .....	52
Figura 5.22: Provino dopo la prova di compressione .....	53
Figura 5.23: Andamento dell'accelerazione nel tempo.....	54
Figura 6.1: Fondello anti-slittamento .....	58
Figura 6.2: Uno dei quattro angolari inseriti nel modello .....	62
Figura 6.3: Coupling realizzato per rappresentare l'estremità del rivetto.....	65
Figura 6.4: Modello FEM della crash box .....	69
Figura 6.5: Crash box dopo la compressione.....	69
Figura 6.6: Grafico Spostamento-Accelerazione adesivo esterno 07 .....	71
Figura 6.7: Fase di compressione della crash box non ancora completa; si nota la formazione di due pieghe di folding e la nascita di una terza piega appena al di sotto di esse .....	71
Figura 6.8: Grafico Spostamento-Accelerazione con utilizzo di adesivo e rivetti .....	73
Figura 6.9: Cedimento durante la compressione della crash box con rivetti; si nota come stavolta il cedimento locale sia più impulsivo.....	74
Figura 6.10: Assorbitore con riempimento parziale 50 mm; si noti che a contatto con la massa impattante di destra la parte del cuore è cava.....	75
Figura 6.11: Assorbitore con densità variabile; si può notare la partizione trasversale che permette di assegnare due proprietà diverse .....	76
Figura 6.12: Confronto tra diverse configurazioni di crash box .....	79
Figura 6.13: Confronto tra 50 mm,100 mm e 150 mm di cavità.....	80
Figura 6.14: Confronto tra varie modalità di densità variabili .....	80
Figura 6.15: Grafico Load-Displacement della soluzione che prevede unione degli angolari con adesivo e rivetti.....	83
Figura 6.16: Soluzione con geometria differente .....	85
Figura 6.17: Comportamento di varie configurazioni dell'assorbitore testate..	87
Figura 7.1: Staffe di fissaggio .....	89
Figura 7.2: Pannelli sandwich con cuore in schiuma AlMgSi tagliati tramite AWJ .....	90
Figura 7.3: Attrezzatura per realizzare smussi .....	91
Figura 7.4: Divisore inserito nell'attrezzatura .....	92
Figura 7.5: Tappo di chiusura con cuore in schiuma metallica .....	92
Figura 7.6: Fissaggio della lastra in honeycomb sulla griglia della macchina AWJ tramite staffe .....	93

---

Figura 7.7: Alcuni dei pannelli realizzati tramite AWJ .....	93
Figura 7.8: Particolare di uno dei pannelli realizzati; si noti la tipica struttura a nido d'ape del cuore.....	94
Figura 7.9: Tappo di chiusura .....	94
Figura 7.10: Montaggio sull'attrezzatura per realizzare gli smussi.....	95
Figura 7.11: Confronto delle crash box senza tappo; sono state unite solamente tramite nastro adesivo per dare un'idea del risultato finale, ma in realtà non sono ancora complete.....	95
Figura 7.12: Confronto tra le due configurazioni a costruzione non ancora terminata.....	96
Figura 7.13: Preparazione della lamiera per taglio AWJ.....	97
Figura 7.14: Alcune delle strisce di lamiera ottenute dopo taglio AWJ.....	97
Figura 7.15: Piegatrice manuale.....	98
Figura 7.16: Misura della posizione del ferma-lamiera .....	99
Figura 7.17: Piegatura delle strisce di lamiera .....	100
Figura 7.18: Confronto degli angolari realizzati con la crash box provvisoria .	100
Figura 7.19: Realizzazione riferimenti con truschino.....	101
Figura 7.20: Sega elettrica per il taglio degli angolari.....	102
Figura 7. 21: Trapano a colonna per foratura di pannelli e angolari .....	103
Figura 7.22: Montaggio parziale della crash box .....	104
Figura 7.23: I due assorbitori realizzati; a destra quello con cuore in honeycomb e a sinistra quello con cuore in schiuma .....	106
Figura 7.24: Alcune immagini delle crash box realizzate; dall'alto a sinistra in senso orario, vista frontale (a), laterale (b) e posteriore (c).....	107
Figura 7.25: Fissaggio della piastra di acciaio su macchina per taglio AWJ.....	108
Figura 7.26: Base per fissaggio crash box .....	109
Figura 7.27: Modalità in cui si presenterà l'assorbitore durante la prova.....	109
Figura 8.1: Torre di caduta verticale (Drop tower) .....	112
Figura 8.2: Alcuni particolari della torre di caduta .....	114
Figura 8.3: Assorbitore con cuore in honeycomb montato tramite piastra di fondo sulla torre.....	115
Figura 8.4: Assorbitore con cuore in honeycomb dopo l'urto; il pannello laterale non ha retto .....	116
Figura 8.5: Pannello laterale della crash box dopo il cedimento.....	116
Figura 8.6: Provino al termine dell'impatto; è ancora sotto il peso del maglio ma la sua resistenza ha permesso di evitare una compressione completa .....	117
Figura 8.7: Vista del provino compresso ancora montato sulla macchina; vista dall'alto (a sinistra) e frontale (a destra).....	118
Figura 8.8: Vista da sotto dell'assorbitore compresso.....	118
Figura 8.9: Vista laterale dell'assorbitore compresso.....	119

Figura 8.10: Vista dall'alto dell'assorbitore compresso.....	119
Figura 9.1: Andamento della decelerazione nel tempo per la crash box con cuore in honeycomb .....	121
Figura 9.2: Andamento della decelerazione nel tempo per la crash box con cuore in schiuma.....	122
Figura 9.3: Confronto tra honeycomb (blu) e schiuma metallica (rosso) .....	123
Figura 9.4: Confronto tra dati grezzi (rosso) e dati filtrati (blu) per la schiuma metallica .....	124
Figura 9.5: Folding dell'assorbitore con cuore in schiuma metallica .....	125
Figura 9.6: Modello numerico in scala 1:2 .....	126
Figura 9.7: Particolare del modello numerico visto dall'esterno; si notano i rivetti e gli angolari .....	127
Figura 9.8: Particolare del modello numerico visto dall'interno; si notano gli angolari più corti e, di conseguenza, il numero inferiore di rivetti .....	127
Figura 9.9: Andamento della decelerazione nel tempo per il modello numerico (filtrato).....	128
Figura 9.10: Comportamento dell'assorbitore alla fine dell'urto.....	129

## Elenco delle tabelle

Tabella 5.1: Risultati della pesatura dei provini.....	36
Tabella 5.2: Sezioni dei provini .....	37
Tabella 5.3: Spessore della schiuma nei provini a trazione .....	37
Tabella 5.4: Calcolo densità della schiuma metallica.....	38
Tabella 5.5: Risultati prova di trazione .....	43
Tabella 6.1: Decelerazioni medie con spessore pelle esterna variabile .....	70
Tabella 6.2: Decelerazioni medie con modalità di collegamento diverse .....	72
Tabella 6.3: Decelerazioni medie con riempimenti parziali.....	76
Tabella 6.4: Decelerazioni medie con variazione di densità.....	77
Tabella 6.5: Indice SEA per cuore con schiuma di densità costante.....	81
Tabella 6.6: Indice SEA casi con parziale riempimento del cuore.....	81
Tabella 6.7: Indice SEA casi con densità variabile.....	81
Tabella 6.8: Indice stroke efficiency per le diverse configurazioni .....	83



## Sommario

Le schiume metalliche sono un materiale di crescente interesse scientifico in quanto dotate di diverse caratteristiche interessanti.

Una delle caratteristiche principali è la capacità di assorbire urti, in quanto la schiuma metallica ha la caratteristica di avere un lungo plateau di sforzo costante nel grafico sforzo-deformazione.

La tesi tratta lo studio di un assorbitore di urto frontale realizzato utilizzando schiuma metallica, che viene applicato ad una vettura sportiva.

Vengono realizzati modelli numerici e prove sperimentali per comprendere se la schiuma metallica può essere applicata anche a forme maggiormente complesse, quali sono quelle utilizzate in ambito sportivo.

**Parole chiave:** Schiume metalliche, assorbitori d'urto, drop tower, analisi FEM

## Abstract

Metal foams are growing scientific interest materials because of their interesting features.

One of those is energy absorbing, due to the extensive plateau stress that can be seen in stress-strain graph of the foams.

The thesis is about the study of a frontal energy absorber, realized with metal foam and applied to a sportive car.

Numerical models and experimental tests are carried out to understand if metal foam can be applied to more complex shapes, as in sportive sphere.

**Keywords:** Metal foams, energy absorbers, drop tower, FEM analysis





# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 IL LAVORO DI TESI

Il Laboratorio Musp considera la schiuma metallica un materiale molto interessante, per le molte funzionalità che essa può avere.

In particolare, le schiume metalliche hanno buone capacità di smorzamento di vibrazioni, assorbimento di calore, resistenza a scoppi e soprattutto possiedono la capacità di assorbire bene l'energia che si sviluppa durante un urto.

Nell'ambito dello studio di possibili applicazioni della schiuma metallica si è pensato quindi di intraprendere la strada dell'assorbimento di energia, in quanto il comportamento della schiuma fa pensare che possa essere un'applicazione interessante.

A tale proposito, si è pensato di proporre l'idea all'azienda Picchio S.p.a, che è sempre attenta allo studio di nuovi materiali applicabili alle proprie vetture.

All'interno di questo lavoro di tesi, si è pensato di studiare la possibilità di realizzare un assorbitore di urto frontale (crash box) che prevedesse l'utilizzo di schiuma metallica.

Non è da escludere che la schiuma metallica non possa però trovare applicazioni diverse all'interno della stessa vettura.

La schiuma, come detto, è un materiale multi-purpose, perciò potrebbe essere utilizzata anche per realizzare altri particolari delle vetture, nel caso in cui le sue peculiarità andassero in accordo con le specifiche richieste alla singola parte.

Essa trova la sua migliore applicazione dove può mettere in mostra alcune sue capacità contemporaneamente (ad esempio se contemporaneamente si volesse un materiale che è in grado di smorzare vibrazioni e resistere a scoppi).

Nel lavoro di tesi, per prima cosa viene presentato il materiale con cui viene realizzata la crash box, ovvero la schiuma metallica (Capitolo 2).

Tale materiale viene già utilizzato per altre parti strutturali dell'autoveicolo, ma generalmente non viene utilizzato per le crash box frontali, solitamente realizzate tramite materiali compositi ed honeycomb.

L'idea di utilizzare la schiuma metallica come materiale per una crash box è nata dalla conoscenza dell'ottima resistenza a compressione e della buona capacità di assorbire urti di questo materiale.

Nel capitolo 3 viene introdotto il concetto di assorbimento d'urto e di assorbitore d'urto, i coefficienti che permettono di paragonare diversi assorbitori e le prove cui essi sono sottoposti per ottenere l'omologazione.

Il passo successivo è stato quello di cercare di comprendere quali fossero le esigenze dell'azienda con cui si è instaurata una collaborazione, per definire la forma, i materiali e tutto ciò che fosse necessario definire al fine di realizzare la struttura (Capitolo 4).

Per realizzare modelli numerici corretti, era necessario conoscere nel modo più accurato possibile le caratteristiche della schiuma metallica.

Per questo motivo sono stati eseguiti test quasi-statici e dinamici, che vengono descritti al capitolo 5.

Avendo a disposizione le caratteristiche dei materiali che costituiscono l'assorbitore è stato possibile realizzare alcuni modelli numerici della soluzione da testare.

Per comprendere bene il funzionamento di un modello numerico di impatto, in precedenza vi era stato uno studio della bibliografia esistente e una serie di modelli base con forme semplici che erano stati creati allo scopo di prepararsi al modello definitivo.

Da queste prove è stato possibile comprendere quale fosse la configurazione ideale dell'assorbitore, dopo aver testato diverse soluzioni, tra cui una di geometria alternativa a quella da realizzare (Capitolo 6).

Per cercare una validazione sperimentale ai test numerici, si è proceduto alla realizzazione pratica di un assorbitore d'urto che prevedeva l'utilizzo di schiuma metallica e uno che prevedeva invece presenza di honeycomb.

Tale fase viene descritta in modo accurato al capitolo 7.

La prova sperimentale, eseguita presso lo stabilimento della Picchio, viene descritta al capitolo 8, mentre nel capitolo successivo vengono proposti i risultati commentati delle prove numeriche e sperimentali.

## 1.2 IL LABORATORIO MUSP

Il laboratorio MUSP (1), come dice l'acronimo stesso (Macchine Utensili e Sistemi di Produzione), è un laboratorio di ricerca dedicato allo studio delle macchine utensili e dei sistemi di produzione.

Le sue finalità sono la ricerca, la formazione e il supporto alle aziende del settore per sostenerne la competitività.

Il coordinamento è affidato al Politecnico di Milano, sotto la guida del Professor Michele Monno.

Sono inoltre partner del laboratorio il Dipartimento di Scienze Economiche e Sociali (DISES) dell'Università Cattolica del Sacro Cuore, sede di Piacenza.

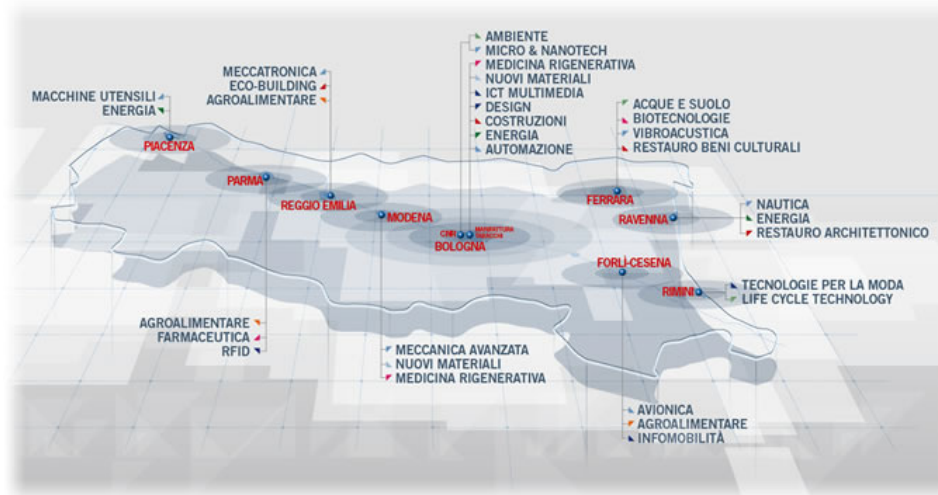


Figura 1.1: Schema della Rete alta tecnologia

MUSP fa parte della Rete Alta Tecnologia - laboratori di ricerca e centri per l'innovazione – che ha l'obiettivo di costruire un'offerta qualificata di ricerca industriale sul territorio dell'Emilia-Romagna, attraverso il potenziamento delle sinergie tra le diverse università e gli enti di ricerca regionali.

Il laboratorio MUSP fa parte della piattaforma MECCANICA MATERIALI che si rivolge a tutte quelle imprese che hanno problematiche di ricerca industriale connesse:

- ✓ al controllo e all'ottimizzazione di prodotti e processi;
- ✓ allo sviluppo e alla caratterizzazione di materiali;
- ✓ al miglioramento dell'efficienza e della produttività in generale.

Il Laboratorio MUSP è suddiviso in sei aree di ricerca, ognuna delle quali si occupa di aspetti e tematiche differenti:

- ✓ AREA 1: Configurazione e gestione dei sistemi integrati di produzione
- ✓ AREA 2: Precision Engineering
- ✓ AREA 3: Progettazione avanzata, materiali e tecnologie
- ✓ AREA 4: Studi di settore, tutela della proprietà intellettuale
- ✓ AREA 5: Tecnologie di produzione per il settore aeronautico
- ✓ I-MUSP: Innovazione MUSP

### 1.3 LA PICCHIO S.P.A

L'avventura della Picchio (2) inizia alla fine degli anni '80 dalla passione di un gruppo da amici.

L'inizio fu la realizzazione di una replica di una auto d'epoca, ma presto arrivarono le auto sportive, con il primo prototipo datato 1989.

Nel 1996 venne avviato il piano industriale e completata la sede dell'azienda, mentre nel 1998 avviene il debutto in corsa del primo modello interamente progettato e costruito dalla Picchio.

Nel 2002 l'Sr2 sbarca negli Stati Uniti vincendo il Campionato Grand Am.

Nel 2003 la Picchio presenta la Daytona Prototype DP2 per concorrere in questa fortunata serie internazionale; al debutto la DP2 ottiene un inaspettato terzo posto alla 24 ore di Daytona.

Attualmente la Picchio progetta, sviluppa e costruisce auto da corsa e auto stradali con il proprio marchio e su commessa di terzi.

Essendo l'innovazione la caratteristica delle proprie vetture, la Picchio fa della ricerca il fulcro delle proprie attività.

La sede è ad Ancarano (Teramo) e nel fabbricato, di 5200 mq, sono presenti:

- ✓ reparto progettazione;
- ✓ laboratorio di ricerca e sviluppo;
- ✓ reparto produzione.

L'organico aziendale è composto da giovani ingegneri e ricercatori, che grazie a software e attrezzature d'avanguardia, assicurano in pochi mesi un prototipo dal foglio bianco al prodotto finito.



Figura 1.2: La sede della Picchio S.p.a

Nei prossimi anni la Picchio sarà impegnata parallelamente nell'attività agonistica e in quella di ricerca e progettazione nel settore delle auto ibride ed elettriche.



## 2 LE SCHIUME METALLICHE

Le schiume metalliche costituiscono una classe di materiali relativamente nuova, che presenta una serie di caratteristiche interessanti per l'applicazione in diversi ambiti della meccanica.

L'idea di realizzare dei composti cellulari di materiale metallico è nata e si è sviluppata negli anni '70 ma, come spesso accade con le nuove tecnologie, inizialmente tale scoperta ha portato un grande entusiasmo nella ricerca ma ad esso non è seguito un adeguato sviluppo commerciale.

E' tipica del settore manifatturiero la necessità di disporre di qualche anno per riuscire a trasportare dalla teoria alla pratica le idee dei ricercatori.

Questa difficoltà è legata alla mancanza di dati di progetto adeguati, esperienza e confidenza con il processo produttivo.

Tipicamente, dopo tale periodo, la produzione comincia ad avere risultati interessanti, mentre c'è un calo nella ricerca, legata alla delusione che inizia a serpeggiare per il mancato impiego della nuova tecnologia.

Occorre quindi arrivare ad una situazione dove le industrie posseggano sufficiente esperienza riguardo il nuovo materiale e ci sia un impulso per proseguire la ricerca su questi materiali e giungere a risultati sempre migliori.

Al giorno d'oggi si può ritenere di essere giunti in questa situazione; le schiume metalliche non rappresentano più una scatola nera, ma sono state studiate approfonditamente (esistono molte ricerche a riguardo) e stanno iniziando a trovare applicazione in diversi settori.

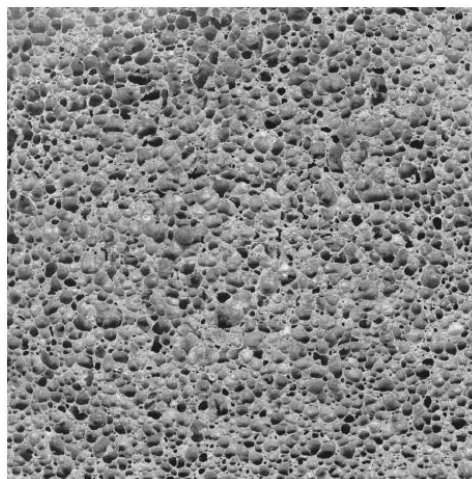


Figura 2.1: Schiuma metallica

## 2.1 CARATTERISTICHE DELLE SCHIUME

Le caratteristiche che rendono le schiume metalliche un materiale particolarmente interessante in campo meccanico sono: elevata rigidità, elevata energia assorbita per unità di massa (che porta ad avere strutture più leggere a parità di assorbimento di energia) ed elevata capacità di smorzare le vibrazioni.

Per questo motivo si è proposto di utilizzare le schiume per i più svariati obiettivi; come assorbitori di energia, materiale da imballaggio, protezione dagli scoppi ecc...

Le schiume trovano un buon campo di applicazione dove è necessaria una buona resistenza mantenendo la leggerezza della struttura.

Perciò è sembrata una buona idea applicare questo materiale dove le sue peculiarità sarebbero state utili, ovvero negli assorbitori d'urto.

Il vantaggio è rappresentato dal fatto che le schiume metalliche sono in grado di resistere ad elevate deformazioni mantenendo uno sforzo costante (vedi fig. 2.2).

Un buon assorbitore deve innanzitutto assorbire elevate quantità di energia, e se possibile deve farlo mantenendo una certa leggerezza, che risulta vantaggiosa in ogni campo di applicazione.

Nel caso di applicazione civile (automobili di grande serie), permette di alleggerire la vettura e perciò ridurre i consumi, mentre nel caso di applicazione nel campo agonistico (vetture da competizione), consente di migliorare le prestazioni.

In entrambi i casi è necessaria l'abilità nell'assorbire elevate quantità di energia per motivi di sicurezza.

Le caratteristiche citate al paragrafo precedente, possono essere spiegate osservando il diagramma sforzo-deformazione di una schiuma metallica.

Esso presenta un tratto lineare elastico, seguito da un lungo tratto di deformazione a sforzo costante (plateau stress) e infine, giunti a una certa deformazione (densification strain), lo sforzo aumenta notevolmente fino al cedimento.

L'area sottesa a tale curva dà l'energia che la struttura è in grado di assorbire; logicamente maggiore è l'area e più vantaggiosa può essere tale schiuma per i nostri scopi.

Tale diagramma risulta essere quello più simile al diagramma di un assorbitore "ideale", che dovrebbe avere un tratto elastico senza deformazione e un lungo



tratto plastico a sforzo costante, in modo da assorbire più energia possibile senza avere picchi indesiderati di carico.

In sostanza, il comportamento ideale di un assorbitore è quello che si vedrebbe nel diagramma sforzo-deformazione di un materiale elastico perfettamente plastico.

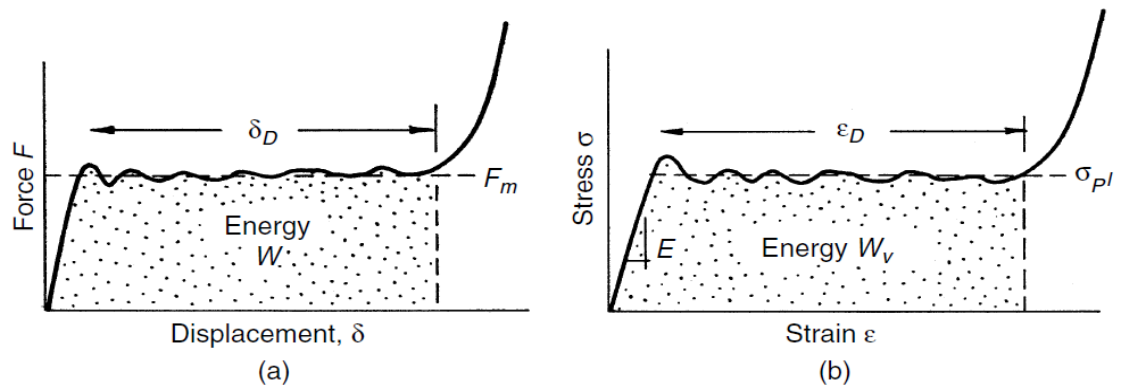


Figura 2.2: Curva sforzo-deformazione per schiuma metallica

La capacità della schiuma metallica di assorbire bene gli urti mantenendo la leggerezza della struttura, ha portato a pensare alle schiume metalliche come riempimento per gli assorbitori d'urto frontali delle automobili.

E' stato dimostrato come il riempimento in schiuma metallica, a parità di energia assorbita, sia da preferire rispetto alla possibilità di aumentare lo spessore di un tubo non riempito.

Inoltre, l'utilizzo della schiuma metallica come riempimento porta ad avere assorbitori che, a parità di peso, portano ad assorbire maggiore energia rispetto a quelli senza riempimento.

Come è stato dimostrato da diversi autori, inoltre, il riempimento in schiuma metallica, porta ad avere un'energia assorbita superiore a quella che si otterrebbe singolarmente da un tubo non riempito e una schiuma compressa separatamente dal tubo.

Ciò fa capire come sia importante anche l'effetto di interazione tra schiuma e tubo.

Tra di essi è doveroso citare il lavoro svolto da Hall et.al.(3), i cui risultati sono apprezzabili in figura 2.3.

Inoltre la schiuma consente di controllare il collasso dell'assorbitore.

L'utilizzo della schiuma metallica da sola come assorbitore non risulterebbe invece vantaggioso, per motivi legati sia alla minore energia che

permetterebbe di assorbire che alle difficoltà che introdurrebbe il montaggio di tale dispositivo nell'autovettura.

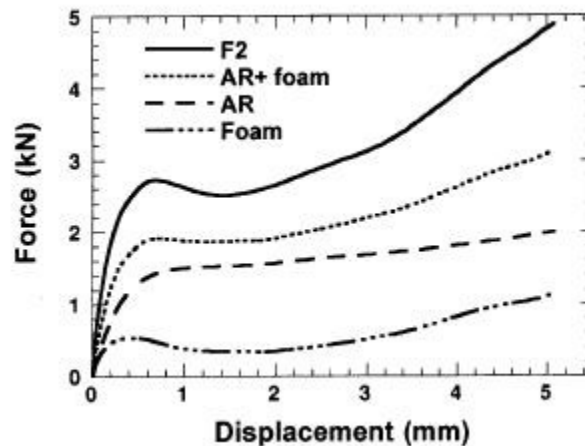


Figura 2.3: Grafico forza-spostamento (Foam è la schiuma da sola, AR il metallo da solo, AR+foam i valori delle due curve sommati e F2 l'assorbitore con riempimento in schiuma)

## 2.2 METODI PER REALIZZARE LE SCHIUME

Esistono nove metodi per la realizzazione delle schiume metalliche, di cui cinque di essi hanno una realizzazione commerciale (4);

- Soffiaggio di gas all'interno del metallo fuso
- Inserimento di agente schiumogeno nel metallo fuso e controllo della pressione durante il raffreddamento
- Consolidamento di polvere metallica con agente schiumogeno con riscaldamento in forno
- Creazione di uno stampo di ceramica da un precursore (di cera o schiuma polimerica), con successiva eliminazione del precursore e infiltrazione di metallo fuso sotto pressione
- Deposizione in fase di vapore o elettrodeposizione di metallo su di un precursore di schiuma polimerica, che poi viene fuso, lasciando le celle libere

L'elenco precedente riporta solamente i 5 metodi di realizzazione delle schiume metalliche utilizzati in ambito industriale.

E' molto importante la scelta del materiale con cui si intende realizzare la schiuma, poiché le proprietà della schiuma dipendono dalle proprietà del

metallo ; inoltre le proprietà della schiuma dipendono anche dalla propria densità relativa e dalla topologia che assumono le celle (possono essere aperte o chiuse, di varia dimensione e via dicendo).

Nel nostro caso il metodo di realizzazione prevede l'utilizzo di un precursore realizzato tramite polvere metallica di lega di alluminio a cui viene aggiunto un elemento schiumogeno, l'idruro di titanio ( $TiH_2$ ).

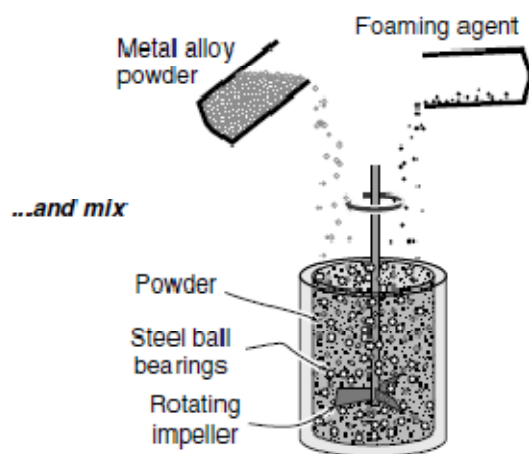
Essi vengono compattati e poi scaldati in forno; ciò che accade è che a una certa temperatura l'idrogeno cerca di uscire dal composto e per questo spinge sulle pareti circostanti creando delle bolle di dimensioni variabili; tramite l'utilizzo di appositi stampi è possibile realizzare elementi della forma desiderata.

Le leghe di alluminio si prestano bene a questo processo, perciò vengono scelte come polvere metallica nella maggior parte dei casi.

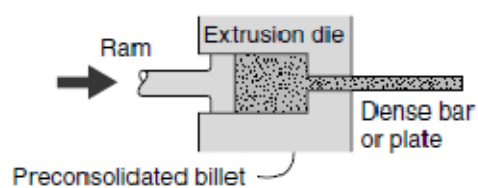
La procedura con cui vengono realizzati può essere sintetizzata come nella figura seguente.

**PARTICLE  
DECOMPOSITION  
IN SEMI-SOLID**

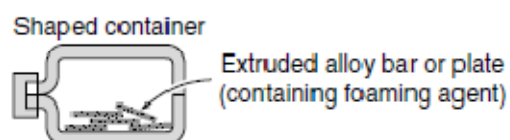
**a) Select  
Ingredients**



**b) Consolidation & Extrusion**



**c) Shaped mold**



**d) Foaming**

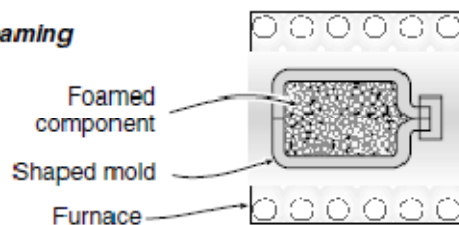


Figura 2.4: Procedura di realizzazione schiuma metallica da precursore solido

La realizzazione della schiuma in forno richiede l'impostazione di alcuni parametri, quali la temperatura del forno e la durata della schiumatura.

Come detto prima, i precursori vengono inseriti all'interno di stampi della forma desiderata, e poi indotti a diventare una schiuma tramite riscaldamento in forno.

Appena vengono estratti dal forno, poi, essi vengono raffreddati velocemente tramite l'utilizzo di aria compressa e successivamente estratti dalla forma.

### 2.3 APPLICAZIONI DELLE SCHIUME METALLICHE

La schiuma metallica può essere utilizzata in due modi differenti.

Dalle ricerche risulta chiaro come l'effetto dell'interazione tra tubo e schiuma porti a preferire il loro utilizzo contemporaneo, a discapito dell'utilizzo della schiuma da sola.

Le alternative che si presentano sono due; utilizzare la schiuma come riempimento di un tubo oppure realizzare dei pannelli sandwich con la schiuma che rappresenti il cuore di essi.



Figura 2.5: Pannelli sandwich con cuore in schiuma di alluminio



## 3 GLI ASSORBITORI DI URTO FRONTALE

Lo scopo degli assorbitori di urto frontale è quello di assorbire quanta più energia possibile nel caso di impatto frontale, facendo inoltre sì che tale assorbimento sia il più graduale possibile.

E' consuetudine definire urti frontali tutti quegli urti (veicolo contro ostacolo fisso oppure veicolo contro veicolo) nei quali la direzione principale delle forze scambiate è posta all'interno di un cono che si estende di 30 gradi a destra ed a sinistra rispetto alla direzione longitudinale anteriore e nei quali la struttura frontale è interessata alle deformazioni. (5)

La crash box frontale rappresenta uno degli organi più importanti per la resistenza della vettura agli urti frontali e per la sicurezza dei passeggeri, in quanto è il primo organo che si trova oltre il paraurti anteriore, che ha efficacia soltanto per urti a basse velocità (3-5 km/h).

La parte frontale dell'autoveicolo è progettata in modo da resistere agli impatti in modo sequenziale crescente; il paraurti resiste a basse velocità come già accennato, le crash boxes a velocità superiori (circa 15 km/h) e gli organi successivi a velocità sempre crescenti.

Per questo motivo è stato oggetto di approfonditi studi nel corso degli anni, sia da parte delle case automobilistiche, che da parte dei ricercatori, che hanno cercato di individuare nuovi materiali atti ad assorbire in modo migliore l'urto frontale.

### 3.1 INDICI DI PRESTAZIONE

Gli assorbitori in generale vengono progettati in base all'ingombro e ai materiali a disposizione, e alla quantità di energia che occorre assorbire durante l'impatto.

Ciò non toglie che se si volesse effettuare un confronto tra alcune tipologie differenti di assorbitori, sia possibile farlo tramite alcuni indici di prestazione, che sono stati definiti per tale scopo.

Tra di loro, quelli più utilizzati sono i seguenti: SEA (Specific Energy Absorbed),  $\eta_c$  (Crush force efficiency) e  $st_e$  (Stroke efficiency).

L'indice SEA (6) esprime la quantità di energia assorbita rispetto alla massa dell'assorbitore, perciò permette di comprendere quale struttura consenta di assorbire più energia a parità di peso, oppure di capire quale struttura sia più leggera conoscendo l'energia che deve essere assorbita.

$$SEA = \frac{Ea}{M} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.1)$$

L'indice Crush force efficiency (7) permette di valutare la presenza di picchi di forza nell'impatto e, di conseguenza, di forti decelerazioni.

Tali decelerazioni sono fortemente dannose per i passeggeri e perciò occorre evitarle.

Essendo un coefficiente è adimensionale, e più esso si avvicina al valore di 1, minore è l'entità dei picchi di forza presenti nel grafico load-displacement.

E' dato dal rapporto tra carico medio e massimo durante l'impatto.

$$\eta_c = \frac{P_{med}}{P_{max}} \quad (3.2)$$

L'ultimo indice (8), permette di comprendere se l'assorbitore ha eseguito completamente il compito per cui è stato concepito, oppure se esso poteva ancora comprimersi.

Esso viene espresso dal rapporto tra la lunghezza di compressione e la lunghezza iniziale del provino; se si ottiene un valore pari a 1 significa che il provino si è compresso totalmente, mentre se il valore del coefficiente è nullo, non si è denotata alcuna compressione.

Questo indice è forse il meno significativo dei tre; non dà infatti un'idea precisa né sull'energia assorbita né sulla presenza di picchi di forza, che rappresentano gli obiettivi principali di progetto.

$$st_e = \frac{S_{st}}{l} \quad (3.3)$$

### 3.2 LA RICERCA PRESENTE IN LETTERATURA

L'assorbimento di energia è da tempo oggetto di studio di innumerevoli ricerche, in quanto argomento particolarmente complesso e interessante, del quale ogni giorno si scoprono possibili innovazioni.

Per comprendere meglio l'argomento ho cercato di leggere e analizzare quante più ricerche possibili, in modo da riuscire a conoscere quali fossero le principali scoperte già realizzate in questo campo e trarne spunto per la progettazione del mio assorbitore.



Alcune ricerche hanno analizzato diverse tipologie di materiali, in modo da comprendere quali materiali fossero adatti ad assorbire energia e quali no e quale fosse il loro comportamento.

In questo caso sono state testate forme semplici, quali cilindri oppure parallelepipedi.

I materiali testati sono stati molteplici: alluminio, schiuma metallica, honeycomb, acciai alto e basso resistenziali, polimeri, compositi e così via.

Tali materiali sono stati testati sia singolarmente che in combinazione tra di loro, per analizzare possibili interazioni.

Da queste analisi si è compreso, per esempio, come le schiume metalliche rappresentino un buon materiale per gli assorbitori d'urto grazie alla loro capacità di assorbire molta energia se sottoposte ad urto frontale.

In particolare, si è notato come le schiume metalliche diano il meglio se combinate insieme a tubi metallici(9), in quanto ad aumentare l'energia assorbita contribuisce un effetto di interazione esistente tra la schiuma e il metallo.

In sostanza l'energia assorbita è superiore a quella che si potrebbe ottenere sommando quella assorbita dal tubo e dalla schiuma compressi in modo isolato.

Un altro gruppo di ricercatori ha provato invece ad analizzare l'effetto che ha la geometria dell'assorbitore sull'energia assorbita.

L'assorbitore che idealmente svolge meglio il proprio lavoro è quello che subisce una compressione progressiva con la formazione di quante più "pieghe" possibili di lunghezza più breve possibile.

E' noto come la scelta di una geometria oppure di un'altra porti a compressioni di tipo diverso.

Gli assorbitori, solitamente si deformano seguendo due andamenti caratteristici: *concertina*, dove si creano pieghe consecutive che portano l'assorbitore ad assomigliare ad una fisarmonica (da qui il nome) e *diamond*, dove l'assorbitore si comprime creando non più delle pieghe simmetriche, ma dei lobi che, visti dall'alto hanno una forma simile a quella di un diamante.

In particolare, la formazione delle pieghe può avvenire in modo simmetrico, asimmetrico oppure senza seguire una modalità precisa.

Gli andamenti simmetrici e asimmetrici sono quelli più desiderati, in quanto permettono un miglior funzionamento dell'assorbitore.

Dalla ricerca di Abramowicz(10) è noto che per ottenere un andamento asimmetrico (perciò positivo), occorre utilizzare assorbitori a sezione quadrata, mentre l'utilizzo di assorbitori di sezioni diverse quali triangolare e trapezoidale porta ad ottenere andamenti di deformazione differenti, per nulla graditi.

Potrebbero però nascere durante la compressione dei modi indesiderati, che portano la struttura a collassare piegandosi lateralmente, e perciò non riuscendo a comprimersi completamente, limitando così la sua capacità di assorbire urti, che può ridursi anche del 40 %.

Un modo per ottenere vantaggio da questi modi è quello di forzarli nella fase di creazione del provino; solitamente si ottiene tale effetto creando delle indentature (*trigger*), che portano all'innescò di tali modi nel momento giusto, e permettono così di ottenere diverse pieghe plastiche senza avere un collasso laterale(11).

Altre possibilità adottate per ridurre la possibilità di creazione di modi instabili è quella di generare degli intagli nello spessore del tubo oppure di realizzare degli assorbitori di forma conica, che permettano di reagire meglio ai carichi non perfettamente assiali.

La scelta di una geometria conica è supportata dalla conoscenza del fatto che l'aumento dell'area di sezione trasversale che comporta questa soluzione, consente di prevenire un'instabilità di tipo euleriano durante la deformazione che, come detto, deve avvenire nel modo più graduale e regolare possibile.

Inoltre l'angolo esistente tra il carico e le piastre che costituiscono la sezione permette di indurre la formazione di cerniere plastiche, vantaggiose per l'ottenimento di una buona compressione del provino.

Tra i vari lavori che si sono occupati di questo aspetto si può fare riferimento alla ricerca di Chirwa et.al.(12), che hanno approfondito questo argomento in modo particolare.

Una volta ottenute queste indicazioni iniziali, i ricercatori si sono spinti alla ricerca di configurazioni sempre migliorate.

In particolare, credo sia il caso di ricordare alcune ricerche relative alle schiume metalliche, che sono state fonte di ispirazione per il lavoro di tesi.

Da alcune ricerche è emerso come l'utilizzo di tubi completamente riempiti di schiuma metallica portasse ad avere un elevato picco di forza iniziale nell'impatto.

Ciò è particolarmente negativo, perché un elevato picco si traduce in elevate decelerazioni per il pilota.

Per risolvere questo problema, si è pensato di realizzare strutture con riempimento parziale e non totale in schiuma metallica, lasciando l'estremità impattata libera dalla schiuma.

Ciò ha permesso di ridurre il picco di forza iniziale e di alleggerire l'assorbitore.

Un'altra possibilità, già pensata da Sun et. al.(13), è quella di prevedere un assorbitore con riempimento in schiuma, la quale abbia densità variabile lungo la direzione di impatto.

Egli e i suoi collaboratori hanno dimostrato come l'aumento della densità a partire dall'estremità dell'assorbitore colpita fino ad arrivare all'estremità opposta, porti ad aumentare l'energia assorbita.

### 3.3 LE NORMATIVE DI SICUREZZA PASSIVA

Lo strumento utilizzato per definire degli standard di sicurezza minima che devono essere garantiti al pilota sono le normative di sicurezza passiva.

Tali normative stabiliscono quali test devono subire le vetture e quali condizioni tale vetture devono essere in grado di soddisfare durante l'urto.

In campo civile occorre ricordare i test previsti dalle normative ECE/ONU 94 e dagli enti EURO-NCAP, i quali assegnano delle stelle di merito in base agli standard di sicurezza raggiunti.

Tale ente è costituito da varie associazioni non governative, perciò gli esiti del test non possono impedire l'omologazione di un certo dispositivo di sicurezza.

I risultati del test sono comunque diventati importanti per le case automobilistiche, per la loro forte valenza commerciale.

Il fatto di esprimere la qualità dell'assorbitore in stelle di merito, lo rende facilmente comprensibile anche all'utente non esperto, che può quindi farsi un'idea immediata della sicurezza dell'autovettura.

Per tale motivo, essendo i test EURO-NCAP più severi di quelli governativi, le case automobilistiche sono state "costrette" a realizzare sistemi di sicurezza più performanti per raggiungere le tanto agognate "5 stelle EURO-NCAP", delle quali ormai tutte le autovetture possono vantarsi (5).

Tali normative, però, non sono di interesse nel caso della tesi, ma sono state citate solamente per completezza.

In questo caso occorre far riferimento ai test previsti dalla normativa FIA, che vengono specificati all'articolo 259 appendice J del regolamento (14).

In sintesi i test di resistenza da superare sono due:

- **STATICA:** La prova di resistenza statica consiste nell'applicare al crash-box, unito al suo tronchetto di montaggio, un carico trasversale costante di intensità 2000 daN su un lato del musetto usando un "pad" (parallelepipedo di legno) posto a 500 mm dall'asse delle ruote anteriori. Un altro "pad" viene posizionato dalla parte opposta a 2 mm dall'interfaccia tronchetto-crash box. La prova è volta a verificare la resistenza degli attacchi del crash-box al telaio. Se dopo 30 secondi dall'applicazione non si notano cedimenti della struttura o di ogni altro attacco tra crash-box e telaio la prova si può ritenere conclusa positivamente.

- **DINAMICA:** Successivamente si passa all'urto contro barriera fissa indeformabile alla velocità di 12 m/s. Il crash-box è unito al tronchetto mediante bulloni e quest'ultimo, a sua volta, viene ancorato su una piastra di alluminio. Il tutto viene posizionato su un carrello che viene opportunamente zavorrato al fine di ottenere il peso di 610 kg per una CN2. Durante la prova sono acquisite le decelerazioni dell'impatto, mediante accelerometri, e sono effettuate le riprese ad alta velocità con il sistema digitale da una sola angolazione. Il sistema di acquisizione dati ricostruisce un grafico delle decelerazioni istantanee e poi ne calcola il valor medio. Durante l'impatto la struttura non deve essere soggetta ad accelerazioni superiori ai 25g di decelerazione media e la deformazione finale si deve limitare alla zona situata a più di 100 mm dalla pedaliera.

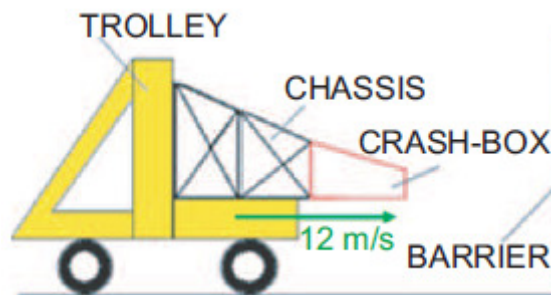


Figura 3.1: Schematizzazione prova urto frontale

Nel caso della tesi, il test che si vuole riprodurre tramite la torre di caduta è quello dinamico; le condizioni saranno leggermente diverse, ma sufficienti a garantire un confronto tra le prestazioni fornite dall'assorbitore attuale e quelle fornite dall'assorbitore progettato.

## 4 PROGETTO DI UNA NUOVA SOLUZIONE

### 4.1 SOLUZIONE ATTUALMENTE UTILIZZATA

L'azienda Picchio S.p.a. si occupa della realizzazione di prototipi partecipanti a differenti categorie di gare, e per questo motivo anche gli assorbitori d'urto saranno differenti nella forma o nelle dimensioni.

Nel caso di cui tratta la mia tesi, la vettura che monta l'assorbitore è di classe CN2.



Figura 4.1: Vettura di classe CN2

La soluzione attualmente utilizzata dall'azienda su questa vettura prevede l'utilizzo di un assorbitore di forma tronco piramidale realizzato attraverso l'utilizzo di pannelli sandwich e chiuso all'estremità anteriore da un pannello metallico.

Il pannello sandwich è costituito da due materiali: 1) le pelli sono realizzate in alluminio A6082-T6 (spessore 1.5 mm) e 2) il cuore è costituito da honeycomb di alluminio A5052-H111 (spessore 12 mm e densità  $68.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ).

Le giunzioni vengono realizzate attraverso l'utilizzo di angolari dello stesso materiale delle pelli (dimensione 25x25x1 mm) e di rivetti di chiusura (diametro 4 mm).



Figura 4.2: Assorbitore d'urto utilizzato da Picchio S.p.a.

## 4.2 SPECIFICHE DI PROGETTO

Un assorbitore frontale ha il compito di proteggere il pilota dagli effetti di un urto frontale, che nel campo delle competizioni può assumere entità veramente significative, a causa delle forze in gioco e delle alte velocità.

Per tale motivo, come detto al paragrafo 3.3, esistono delle normative di sicurezza che certificano la capacità dei sistemi di sicurezza passiva (quale la crash box) di salvare la vita al conducente.

Nessun assorbitore ottiene l'omologazione ad essere utilizzato nelle competizioni se non è in grado di garantire tali condizioni di sicurezza.

Appare chiaro allora come il primo vincolo progettuale sia quello di soddisfare le richieste della normativa, sia per ottenere l'omologazione che per sincerarsi della sicurezza del conducente.

In particolare, dalle schiume metalliche ci si aspetta di poter ridurre le accelerazioni medie durante l'impatto.

A tal proposito, occorre considerare un altro particolare.

Nella normativa si fa riferimento ad una prova su slitta orizzontale, che in questo caso però non verrà eseguita.

L'azienda con cui si è collaborato, per motivi di spazio, al momento non possiede tale slitta, perciò ci si baserà su un confronto tra la soluzione attuale e quella nuova attraverso un test su torre di caduta verticale.

Successivamente, a seguito della bontà dei risultati ottenuti dalla schiuma metallica, se l'azienda volesse applicare la nuova soluzione sulle sue vetture, dovrà procedere a test su slitta orizzontale presso un ente esterno specializzato per ottenere l'omologazione della crash box.

Verrà invece eseguita una prova su torre di caduta verticale, disponibile presso l'azienda, per avere un confronto sperimentale tra la soluzione con cuore in schiuma e quella con cuore in honeycomb.

Un secondo vincolo progettuale è la leggerezza della struttura.

Per una vettura da competizione, spesso un alleggerimento risulta vantaggioso, anche se ciò dovesse andare a discapito di un costo superiore.

Perciò, un altro elemento che renderebbe interessante l'utilizzo della schiuma in sostituzione dell'honeycomb, sarebbe proprio il minor peso ottenibile.

Tale vincolo è però di importanza inferiore, in quanto l'obiettivo è quello di ridurre le decelerazioni medie.

Inoltre, non è detto che l'aumento del peso, se contenuto, sia un problema per le prestazioni della vettura.

Infine, un'ultima specifica che l'assorbitore deve soddisfare è la compressione legata alla prova di schiacciamento del provino.

Durante l'urto è necessario che l'assorbitore non arrivi a completa compressione, in modo da lasciare un minimo di sicurezza ulteriore al conducente in caso di impatto in condizioni più gravose della prova di sicurezza.

Tale evento è tutt'altro che improbabile, trattandosi di una competizione.

Inoltre occorre tener conto del fatto che le prove di sicurezza non sono in generale sufficientemente restrittive.

Per effettuare un confronto tra le due soluzioni, e capire quale delle due permette di soddisfare in modo migliore le richieste progettuali, è possibile basarsi sugli indici di prestazione citati al paragrafo 3.1, oppure valutare

semplicemente i diversi valori raggiunti di decelerazione media durante l'impatto.

Un altro termine di paragone, seppur di importanza inferiore, può essere la massa dell'assorbitore, essendo la ricerca della leggerezza un altro punto cardine della progettazione.

### 4.3 NUOVA SOLUZIONE

#### 4.3.1 ANALISI DELLA SOLUZIONE ESISTENTE

Per ottenere un risultato migliore, è necessario valutare le prestazioni fornite dalla soluzione attualmente utilizzata sulla vettura.

Il peso di tale soluzione è pari all'incirca a 3.46 kg (ad esclusione del peso di angolari e rivetti), mentre la decelerazione media ottenuta nell'impatto su slitta orizzontale, risulta essere pari a 22.11 g.

Tale valore è di poco inferiore a quello massimo previsto dalla normativa FIA (25 g), perciò lo spazio di miglioramento è notevole.

Da una prima analisi FEM, si è notato come realizzare la nuova soluzione solamente sostituendo il cuore in honeycomb con uno in schiuma di alluminio non rappresenti un'idea vincente.

Questo perché la densità della schiuma utilizzata è circa 8 volte quella dell'honeycomb, e perciò la struttura risulta essere molto più rigida e pesante, capace di fornire decelerazioni medie decisamente superiori a quella limite.

Tale soluzione è da scartare, in quanto le densità minime della schiuma che si possono realizzare si aggirano intorno ai  $300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , perciò sicuramente superiori a quelle dell'honeycomb utilizzato.

Per quanto riguarda gli angolari di chiusura, il filo logico è il seguente.

L'intenzione è quella di inserire nel modello numerico anche tali angolari e riprodurli con la stessa geometria e con il materiale della pelle utilizzata nell'assorbitore progettato, ricorrendo a modifiche solo se necessarie.

I rivetti utilizzati hanno diametro pari a 4 mm, ed essi saranno mantenuti.

#### 4.3.2 PROGETTO DI UNA NUOVA SOLUZIONE

Il progetto della soluzione parte dallo studio dell'ambiente in cui l'assorbitore dovrà lavorare.

Occorre tener conto degli ingombri a disposizione e della modalità di collegamento al telaio.



Per questo motivo sembra una buona idea cercare di mantenere la geometria esistente, modificando il materiale del cuore del sandwich e, per i motivi citati al punto precedente, gli spessori di pelli e cuore.

L'idea è quella di realizzare un assorbitore che possa sfruttare in toto le peculiarità della schiuma metallica, e che non sia per forza a totale riempimento.

L'assorbitore che si pensa di realizzare avrebbe un valore aggiunto se fosse in grado di mutare le sue capacità di assorbire energia a seconda dello scopo richiesto, e ciò potrebbe essere raggiunto variando la quantità di schiuma presente all'interno del sandwich.

Si è notato dalla letteratura che un parziale riempimento potrebbe servire a ridurre il picco iniziale tipico degli impatti di una schiuma metallica.

Inoltre, è sembrato anche interessante valutare come può reagire un assorbitore nel quale la schiuma presenta una densità variabile, crescente dalla zona di impatto all'estremità di collegamento alla vettura.

Si intende considerare tali soluzioni come un "piano di riserva", in quanto la soluzione ideale sarebbe quella di utilizzare un completo riempimento del pannello, in quanto consentirebbe di utilizzare giunzioni di tipo metallurgico, più interessanti di quelle con adesivo.

Come ulteriore sforzo progettuale, si è pensato di testare una seconda soluzione, che non prevedesse l'utilizzo di una forma tronco-piramidale, ma che permettesse comunque di rispettare gli ingombri e fornire le prestazioni richieste.

Tale soluzione prevede l'utilizzo di un fondello realizzato con un sandwich di forma circolare e diametro 200 mm con pelli di spessore 10 mm e cuore di spessore 80 mm; su di esso viene montato un cilindro di alluminio di diametro 35 mm che presenta all'estremità inferiore un cilindro di schiuma che funge da cuscinetto per l'impatto.

Anche questa soluzione si basa sull'idea di utilizzare una quantità variabile di schiuma a seconda dello scopo; nel caso in esame si è notato che la quantità ideale sembra essere una altezza di 80 mm del cilindretto.

Di tale soluzione resterà però solamente una prova numerica, in quanto si allontana dalle richieste dell'azienda partner, ma appare sicuramente utile come lavoro di ricerca.

Un'ulteriore prova che si pensa di eseguire è quella di testare il comportamento dell'assorbitore nel caso di urto leggermente inclinato, ovvero non perfettamente frontale.

Ciò non è richiesto dalla normativa, ma può essere utile conoscerlo, poiché difficilmente si realizza realmente un urto perfettamente frontale.

Per testare tutte le soluzioni sopracitate si è ricorso a modelli fem, in modo da ridurre i tempi e i costi di progettazione.

## 4.4 TEST SUI MATERIALI PRECEDENTI IL LAVORO DI TESI

In prima battuta si intende analizzare la differenza di comportamento tra schiuma ed honeycomb, confrontando la risposta dei due materiali alla prova di compressione.

Per farlo, si hanno a disposizione i risultati della prova eseguita in precedenza dall'azienda Picchio, che verranno confrontati con quelli su una schiuma derivanti da un precedente lavoro di tesi(15) svolto presso il Laboratorio Musp. La schiuma utilizzata non è la stessa che verrà utilizzata per costruire l'assorbitore, ma può già essere utile come un primo termine di paragone (considerando anche che tali dati sono stati utilizzati nei primi modelli fem da me realizzati).

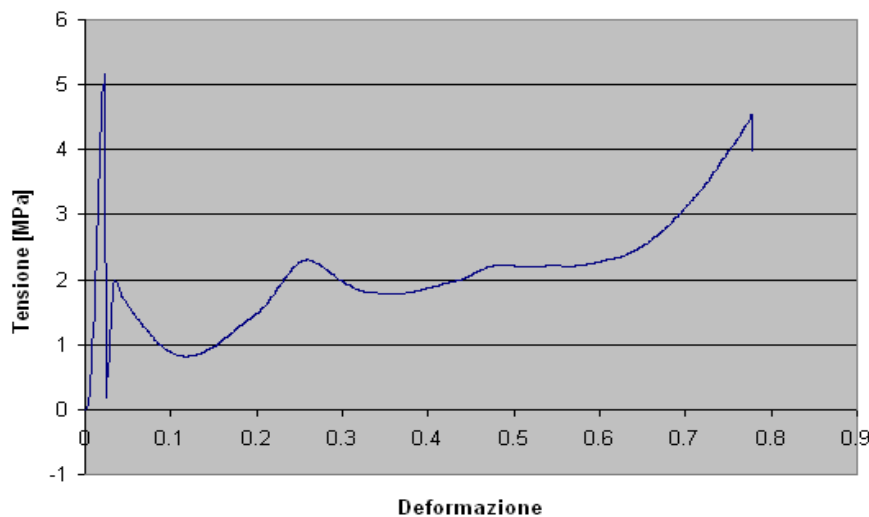


Figura 4.3: Prova di compressione honeycomb lungo l'asse della cella (velocità 12 mm/s)

Nelle figure sottostanti si può vedere uno dei provini utilizzati nella prova di compressione, l'apparecchiatura per eseguirla e gli esiti della stessa.



Figura 4.4: Provino testato

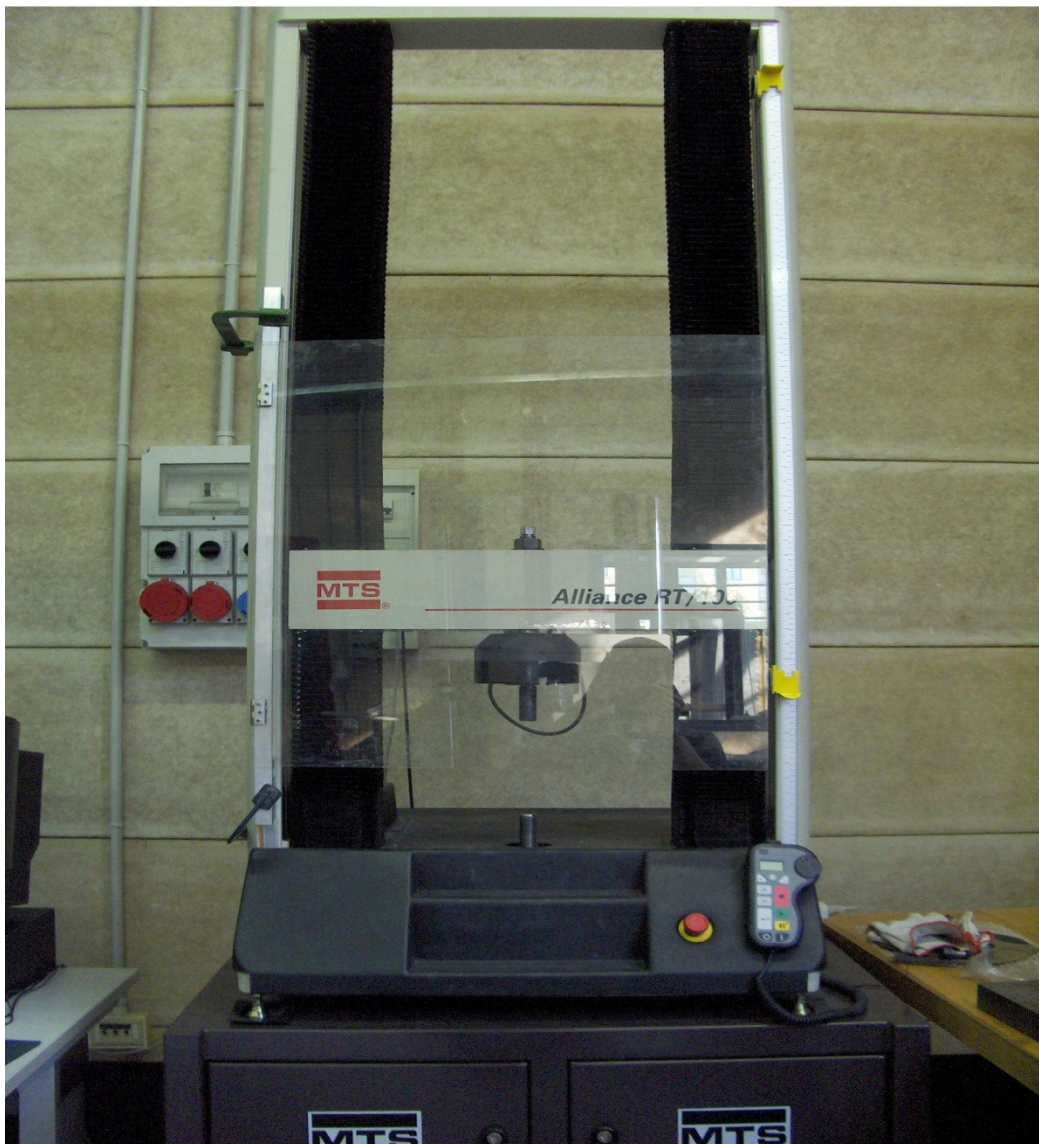


Figura 4.5: Macchina per la prova di compressione

L'area della sezione del provino era pari a  $18 \times 18 \text{ mm}^2$ , e sono stati testati diversi provini che avevano subito un raffreddamento in acqua, aria ed aria compressa dopo la schiumatura in forno.

Si è scelto di rappresentare la sintesi dei risultati ottenuti dai provini testati dopo raffreddamento in acqua, mediando i risultati delle varie prove, allo scopo di ottenere un confronto qualitativo con la curva dell'honeycomb.

La procedura attuata per testare i provini era la seguente:

- Step preliminare di precarico di 50 N a velocità  $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  (controllo di carico)
- Step in compressione di 3 mm percorsi a velocità costante  $3 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  (controllo di posizione)
- Step di scarico fino al valore di precarico iniziale di 50 N (controllo di carico)
- Step di carico fino a 12.5 mm di spostamento totali a velocità costante  $3 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  (controllo di carico)

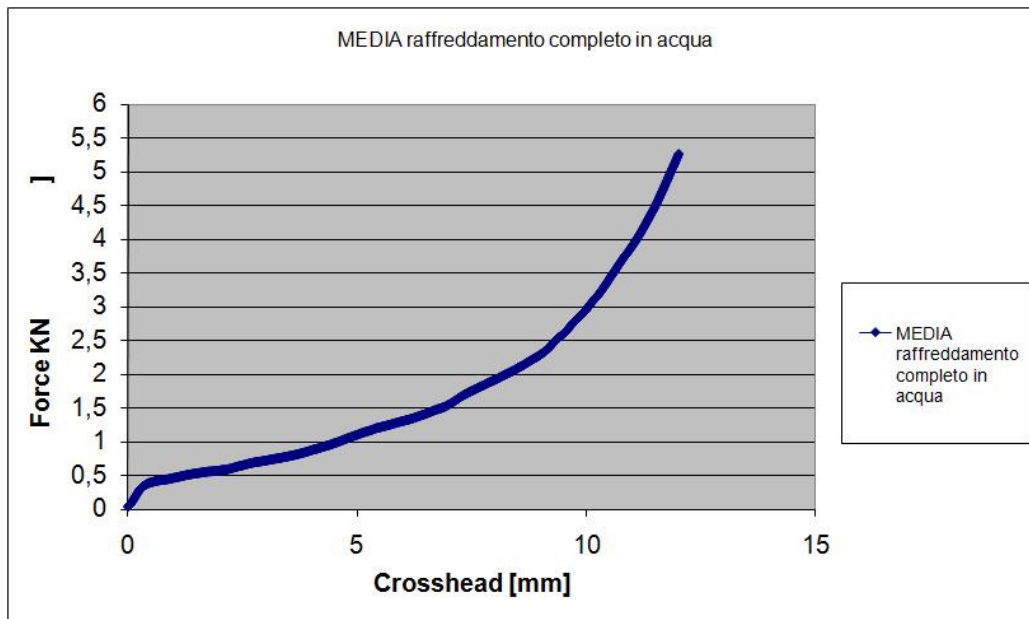


Figura 4.6: Risultati mediati prova di compressione

Come si può vedere, l'andamento della prova di compressione quasi-statica si avvicina a quello previsto per la schiuma.

Esso infatti è composto da una prima fase elastica, un piccolo plateau di stress e una fase di densificazione con aumento evidente della forza in gioco.

In generale, si può notare la differenza con i risultati ottenuti dall'honeycomb.

In tal caso era infatti evidente un picco iniziale, segno di qualche cedimento strutturale oppure della tendenza del materiale a reagire in modo rigido anche ad urti a velocità ridottissime, al limite nulle.

La schiuma, dal canto suo, presenta questo comportamento solo per urti ad alte velocità, e ciò è un comportamento comune sotto l'azione di carichi impulsivi.

## 4.5 METODO DI REALIZZAZIONE

Come detto, l'assorbitore realizzato sarà essenzialmente simile a quello già esistente.

Per tale motivo, anch'esso presenterà le stesse modalità di realizzazione.

I pannelli sandwich suddetti verranno tagliati a 45° e assemblati tra loro attraverso l'utilizzo di angolari per costituire una forma a tronco di piramide.

Ciò che potrebbe essere differente è la modalità con cui vengono realizzati i pannelli sandwich.

Nel caso attualmente utilizzato dall'azienda Picchio, si è scelto di unire l'honeycomb (che costituisce il cuore del pannello) alle pelli esterne tramite l'utilizzo di una giunzione adesiva.

Inoltre si è poi deciso di fissare gli angolari tramite l'utilizzo di rivetti di giunzione.

Nel caso delle schiume metalliche è possibile valutare diverse opportunità.

Una prima opportunità si avvicina a quella citata, e consiste nella realizzazione della schiuma tramite appositi stampi e della giunzione di essa con le pelli tramite una colla.

Successivamente l'unione verrebbe garantita dall'utilizzo di angolari e rivetti.

Una seconda possibilità fornita dalla schiuma è quella di sfruttare l'adesione di tipo metallurgico, che la contraddistingue.

Se si pensa di "schiumare" il precursore in forno insieme alle pelli di alluminio, si potrà notare la nascita di una "saldatura" tra pelli e schiuma.

Essa è legata al fatto che ad alte temperature si forma un legame metallico tra le molecole di alluminio della pelle e della schiuma, che porta ad una unione di tipo continuo.

Successivamente si potrebbero comunque applicare gli angolari e i rivetti per unire le sezioni dell'assorbitore, ma escludendo l'utilizzo degli adesivi.

Tale soluzione è senz'altro più economica e di più facile realizzazione rispetto agli adesivi.

L'utilizzo degli adesivi, in particolare, presenta una problematica.

Sotto carichi impulsivi, è possibile che avvenga una delaminazione, che porterebbe al distacco delle pelli dalla schiuma e perciò a un comportamento peggiore della crash box.

Da prove sperimentali eseguite sul crash box in honeycomb è noto come è possibile durante l'impatto che ci sia un distacco dei rivetti, con conseguente peggioramento della risposta della struttura ed eventualmente con apertura del sandwich a causa della delaminazione.

Ciò non era stato visibile dall'analisi ad elementi finiti.

L'utilizzo di sandwich senza adesivo risolverebbe questo problema, ma occorre comunque fare attenzione ad un altro tipo di problematica.

Da prove di peel test eseguite in laboratorio, è stato possibile notare come, in caso di cedimento, la parte che cede non è quella di contatto tra schiuma e pelle (legame che invece è molto resistente), ma quella relativa alle prime bolle della schiuma che si formano a partire dalla parete.

Ciò probabilmente è dovuto alla loro scarsa densità e allo spessore ridotto delle pareti delle bolle.

Anche con l'utilizzo di adesione metallurgica, comunque, il rischio di distacco dei rivetti permane.

Per questo motivo si è pensato anche a soluzioni alternative di unione delle sezioni dell'assorbitore (per esempio tramite saldatura), ma per il momento non sono ancora state valutate in quanto l'obiettivo della tesi è differente.

L'ultima parte che costituisce l'assorbitore è un "tappo" (realizzato sempre tramite pannelli sandwich), che chiude l'assorbitore, e che viene anch'esso collegato ai sandwich tramite dei rivetti.

Un'ulteriore scelta da effettuare è quella relativa al modo in cui si pensa di collegare gli angolari ai pannelli sandwich.

Le modalità che sono state pensate sono due:

- Collegamento mediante adesivo
- Collegamento tramite adesivo e rivetti

Per valutare quale sia la tecnica migliore verranno realizzati modelli numerici per ognuna di esse.

## 5 PROVE SPERIMENTALI PRELIMINARI

Dopo aver realizzato i modelli numerici (di cui si discuterà ampiamente al capitolo 6), si è considerata conclusa la parte progettuale del lavoro di tesi finalizzata alla creazione dell'assorbitore da testare.

I modelli fem hanno consentito di trarre alcune conclusioni, decisive al fine della realizzazione della crash box.

La più importante di esse è stata quella di stabilire che l'utilizzo dei pannelli sandwich a disposizione del Laboratorio Musp fosse possibile, in quanto in grado di fornire risultati confortanti dal punto di vista dell'assorbimento di energia, in relazione alle richieste di specifica.

In precedenza è stato detto che l'utilizzo di pannelli sandwich realizzati tramite adesione metallurgica sarebbe stato preferibile.

Presso il Laboratorio era disponibile una tipologia di pannelli di questo tipo, che si è deciso di utilizzare dopo aver verificato che garantissero buoni risultati.

Ciò ha permesso di svolgere test su questi pannelli, in quanto si aveva la certezza che sarebbero stati utilizzati.

L'idea di svolgere questi test nasce dal fatto che, come detto al paragrafo 4.4, i dati fino ad ora a disposizione erano relativi a un'altra tipologia di schiuma, differente da quella utilizzata.

E' presumibile che il comportamento delle due schiume, essendo morfologicamente e materialmente simili, non sarebbe stato molto diverso, ma non ci si può esimere dal verificarlo.

Per questo sono stati eseguiti test in trazione e compressione quasi-statica, che verranno raccontati al paragrafo 5.1.

Inoltre si è pensato di effettuare test su torre di caduta anche di questi pannelli, in quanto tali test non erano ancora stati eseguiti e i loro risultati potranno essere utili anche in futuro, sia al Musp che all'azienda collaboratrice (paragrafo 5.2).

### 5.1 TEST QUASI STATICI

Prima di procedere ai test sui materiali è stato necessario realizzare i provini su cui verranno eseguiti i test.

Tali provini sono stati ottenuti dai pannelli sandwich che verranno successivamente utilizzati per realizzare la crash box.

Il pannello di partenza era di dimensione pari a  $35 \times 35 \text{ cm}^2$ .

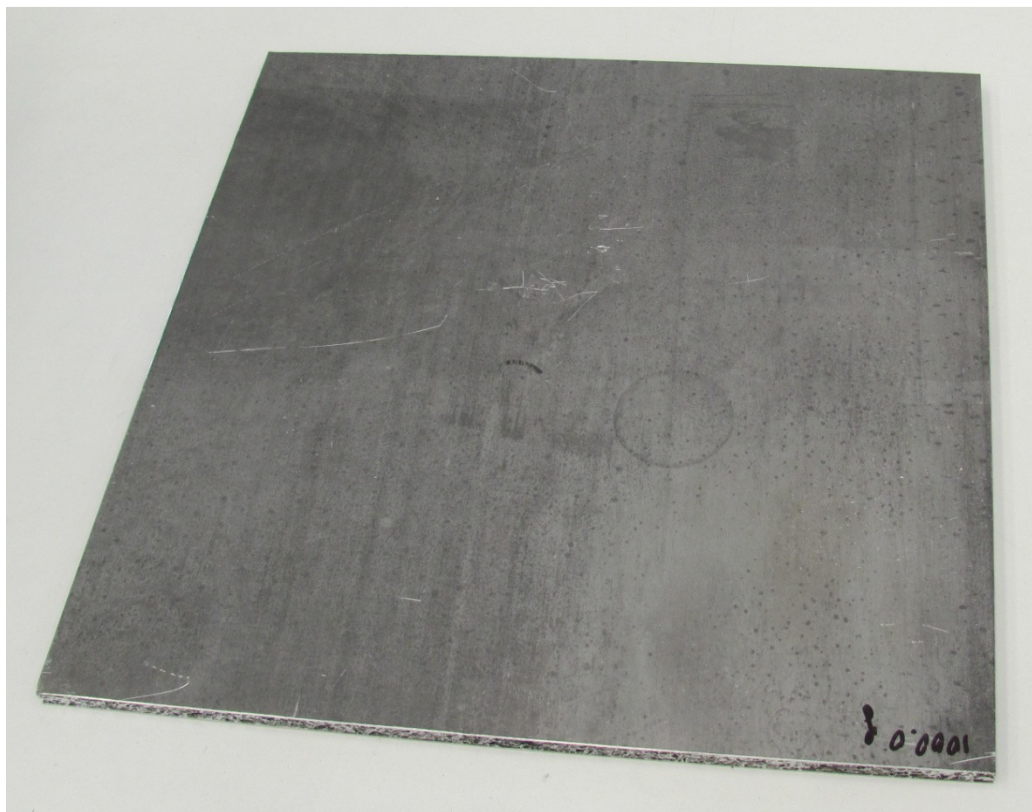


Figura 5.1: Pannello sandwich di partenza



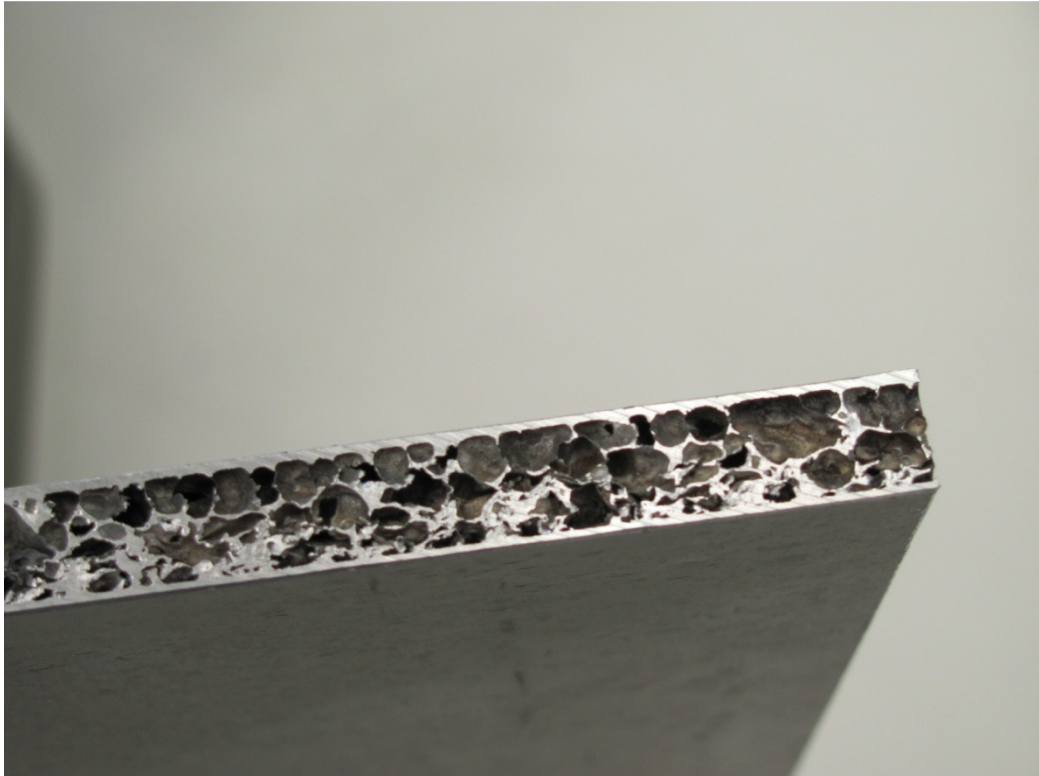


Figura 5.2: Sezione del pannello sandwich

Successivamente si è tagliato il pannello per ottenere i provini di interesse; sono stati realizzati 5 provini per la prova di compressione (dimensione all'incirca pari a  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ) ed altrettanti per quella di trazione (dimensione circa  $175 \times 25 \text{ mm}^2$ ).

Per ottenerli si è fatto ricorso alla tecnologia del taglio WaterJet con utilizzo di abrasivo; ciò ha consentito di ottenere un taglio estremamente pulito, che non producesse alterazioni termiche sul materiale.

Il pannello è stato fissato sulla griglia della macchina attraverso dei bloccaggi a vite, in modo da evitare imprecisioni nel taglio, che avviene a pressioni elevate.



Figura 5.3: Attrezzatura per taglio AWJ

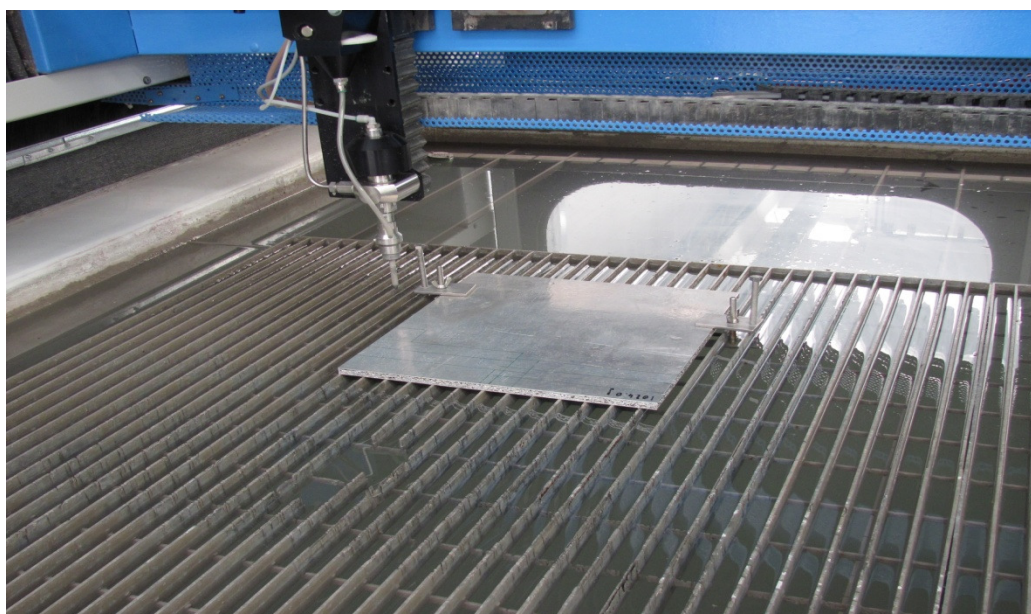


Figura 5.4: Bloccaggio del pannello su macchina per taglio AWJ



Figura 5.5: Provini per prova trazione e compressione

Successivamente, i provini che erano stati destinati alla prova di trazione sono stati fresati tramite una fresa di diametro 8 mm, per eliminare una parte di pelle che consentisse di testare la resistenza a trazione della sola schiuma. Si è ritenuto sufficiente asportare 20 mm di materiale in modo simmetrico rispetto all'asse trasversale.

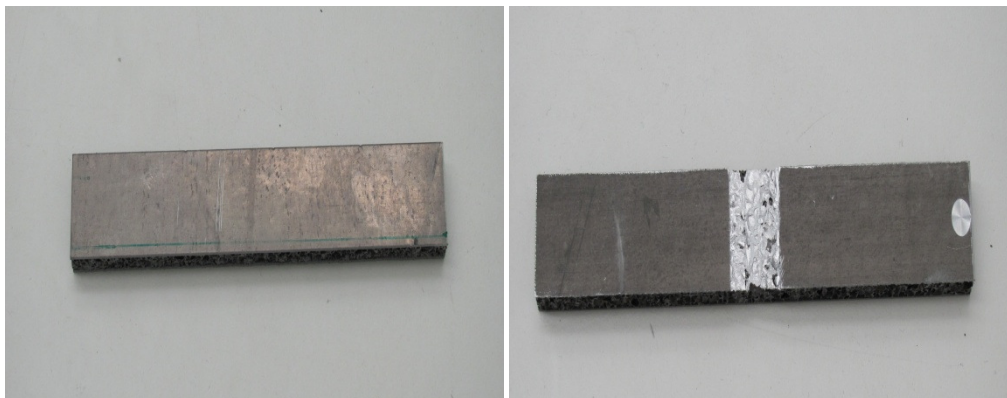


Figura 5.6: Provini per la prova di trazione prima (immagine a sinistra) e dopo (destra) la fresatura



Figura 5.7: Fresatrice

L'ultimo passaggio di preparazione è stato quello di effettuare alcune misure riguardanti i provini realizzati.

Tramite una bilancia elettronica sono stati pesati tutti i provini riportando i seguenti risultati (i valori sono in grammi):

N° Provino	Da utilizzare per prova di compressione	Da utilizzare per prova di trazione
1	12.44	33.65
2	13.34	33.48
3	12.95	34.91
4	13.01	33.70
5	12.59	35.62

Tabella 5.1: Risultati della pesatura dei provini

Con l'ausilio di un calibro cinquantalesimale e di una riga millimetrata è stato possibile determinare le dimensioni effettive della sezione dei provini realizzati

(tabella 5.2); è stato necessario ricavarle poiché occorre tenere conto della variabilità dei risultati ottenuti dalle lavorazioni meccaniche.

N° Provino	Da utilizzare per prova di compressione	Da utilizzare per prova di trazione
1	38.9x40 mm <sup>2</sup>	24.9x174 mm <sup>2</sup>
2	39.9x40 mm <sup>2</sup>	25x175 mm <sup>2</sup>
3	39.8x40.05 mm <sup>2</sup>	24.9x175 mm <sup>2</sup>
4	39.9x39.95 mm <sup>2</sup>	24.9x174 mm <sup>2</sup>
5	39.8x39.95 mm <sup>2</sup>	25x175 mm <sup>2</sup>

Tabella 5.2: Sezioni dei provini

L'ultima misurazione effettuata è relativa allo spessore della parte di provino per la prova di trazione costituita solamente da schiuma.

L'obiettivo dell'operazione di "pelatura" eseguita tramite la fresa era quella di eliminare la pelle del sandwich lasciando solamente la schiuma metallica AlMgSi.

Si è pensato di misurare lo spessore della schiuma residua per meglio stimare il carico di rottura seguente alla prova di trazione; tale spessore è variabile da provino a provino, in funzione della variabilità della schiuma e delle condizioni di taglio.

La misura è stata realizzata tramite un micrometro centesimale in grado di misurare un range compreso tra 0 e 25 mm.

N° Provino	Spessore della schiuma [mm]
1	7.84
2	7.94
3	7.95
4	7.89
5	8.05

Tabella 5.3: Spessore della schiuma nei provini a trazione

Come si vede, il valore dello spessore della schiuma ottenuto non si discosta particolarmente da quello previsto dal costruttore, che lo indicava pari a circa 8.1 mm.

Per completezza, si è provveduto a misurare lo spessore dei pannelli tagliati da quello originale; il valore ottenuto in media in quasi tutti i provini è pari a 9.6 mm, molto vicino a quello fornito dal costruttore (9.5 mm).

Avendo pesato i provini, è stato possibile infine stimare la corretta densità della schiuma.

$$m = \rho * V \quad (5.1)$$

Dove  $\rho$  è la densità della schiuma che si vuole determinare e  $V$  il volume della schiuma stessa.

In realtà, essendo il provino un sandwich, è stato necessario sottrarre alla massa totale ( $m_{tot}$ ) la massa delle pelli ( $m_{all}$ ), calcolata tramite l'equazione 5.1 considerando una densità pari a  $2700 \text{ kg/m}^3$ :

$$m = m_{tot} - m_{all} \quad (5.2)$$

I valori ottenuti sono stati i seguenti:

Provino N°	Densità [ $\text{kg/m}^3$ ]
1	487.16
2	532.19
3	502.66
4	507.3
5	501.37

Tabella 5.4: Calcolo densità della schiuma metallica

In media si ottiene una densità pari a  $501.37 \text{ kg/m}^3$ , non distante da quella inizialmente considerata ( $480 \text{ kg/m}^3$ ).

I provini considerati per il calcolo della densità della schiuma sono quelli che verranno utilizzati per la prova di compressione.

### 5.1.1 PROVA DI TRAZIONE

Entrambe le prove sono state svolte presso il laboratorio CLASD del Politecnico di Milano.

La macchina sulla quale è stata eseguita la prova è la MTS Alliance RT/100.



Figura 5.8: Macchina per la prova di trazione

La prova è stata eseguita ad una velocità di 0.25 mm/s, fino a portare alla rottura del provino.

Sono stati testati tutti e 5 i provini realizzati presso il Laboratorio Musp.

La macchina utilizza due afferraggi per bloccare il provino; quello superiore è mobile, mentre quello inferiore rimane in posizione.

Sulla macchina è stato montato un estensimetro di tipo MTS 634.12F-54 ed una cella di carico di capacità pari a 10 KN.

Lo scopo dell'estensimetro è quello di misurare lo spostamento che avviene durante la prova ( e conseguentemente la deformazione della schiuma), mentre quello della cella di carico quello di misurare la forza cui è soggetto il provino durante la prova.

I valori registrati da cella di carico ed estensimetro, insieme allo spostamento della traversa, sono visibili in diretta sul display durante la prova di trazione.



Figura 5.9: Provino pronto per la prova di trazione; si nota l'estensimetro MTS





Figura 5.10: Cella di carico utilizzata per la prova di trazione

La procedura utilizzata per realizzare la prova è stata la seguente:

- Montaggio della cella di carico da 10 KN
- Inserimento del provino
- Chiusura degli afferraggi
- Collegamento dell'estensimetro
- Applicazione del carico
- Smontaggio estensimetro
- Smontaggio provino
- Azzeramento traversa

A questo punto la procedura è stata ripetuta per tutti i provini.

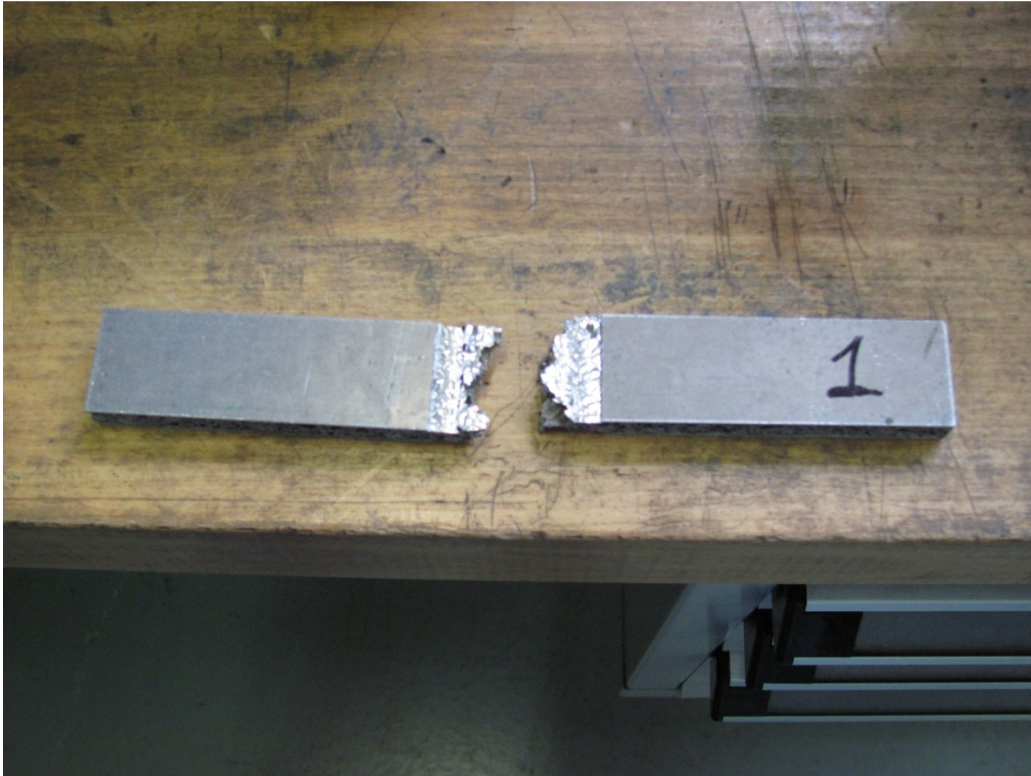


Figura 5.11: Provino dopo rottura a trazione

Si è deciso di scartare i risultati relativi al secondo provino testato, in quanto l'afferraggio inferiore ha esercitato una pressione eccessiva sul provino, portando a uno schiacciamento locale e a risultati anomali della prova.



Figura 5.12: Schiacciamento locale del secondo provino

I risultati della prova di trazione, sono stati poi rielaborati in modo da ottenere il seguente grafico riassuntivo espresso in Sforzo-Deformazione, anziché Forza-Spostamento (grafico 5.1).

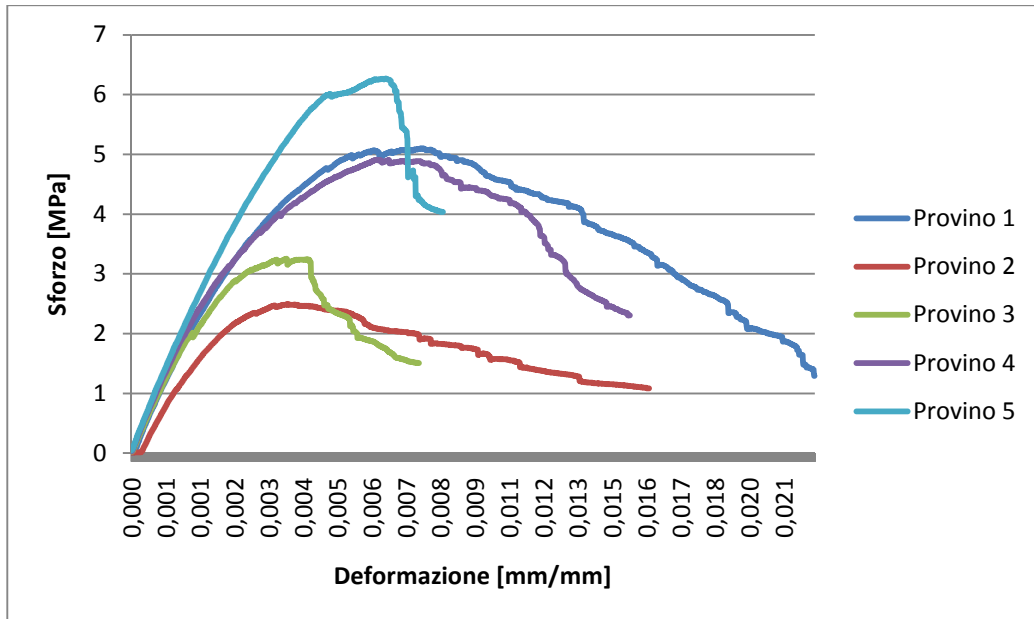


Grafico 5.1: Risultati prova di trazione

Come detto in precedenza, è meglio non prestare attenzione ai risultati ottenuti dal provino n°2, in quanto in quel caso l'afferraggio non era stato corretto.

Per definire la resistenza a trazione della schiuma, si valuta il valore del carico di rottura nei vari provini (carico di picco registrato):

Provino N°	Carico di rottura [MPa]	Modulo di Young [MPa]
1	5.1	1362
2	2.49	695
3	3.25	801
4	4.91	1194
5	6.27	2256

Tabella 5.5: Risultati prova di trazione

Escludendo i valori relativi al secondo provino, mediando i risultati delle altre prove è possibile determinare un valore di carico di rottura pari a 4.88 MPa e un modulo di Young pari a 1403.25 MPa.

La forte diversità tra i risultati ottenuti non appare strana, in quanto la variabilità della schiuma è forte anche da zona a zona del pannello stesso.

Per tale motivo si è ritenuto utile eseguire un certo numero di prove.

### 5.1.2 PROVA DI COMPRESSIONE

La prova di compressione è stata eseguita su una macchina simile ma non uguale a quella della prova di trazione; essa è la MTS Alliance RF/150.



Figura 5.13: Macchina prova di compressione

In questo caso non vi era la presenza dell'estensimetro, ma solo della cella di carico (in questo caso con capacità pari a 150 KN), in quanto rispetto al caso della trazione, erano previsti carichi più elevati.

I provini sono stati schiacciati su una base di diametro 110 mm con una velocità di spostamento della piastra superiore imposta pari a 1 mm/min. In questa prova il provino non deve essere “afferrato”, perciò gli afferraggi sono sostituiti da piastre, quella superiore mobile e quella inferiore fissa.

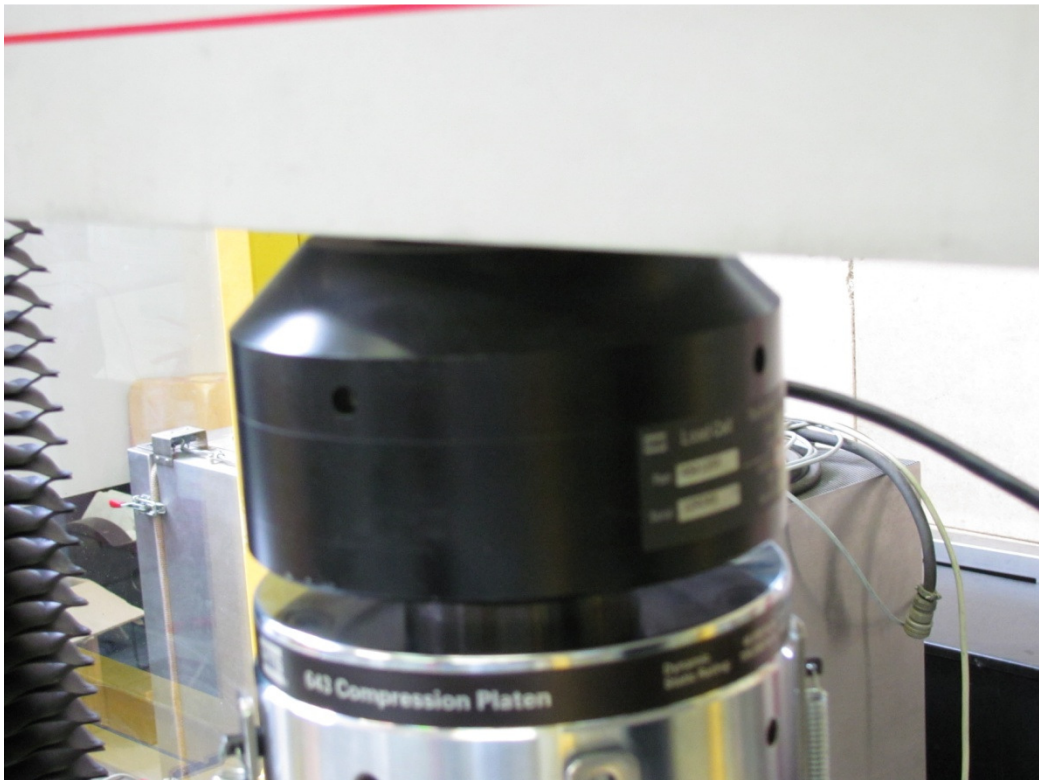


Figura 5.14: Cella di carico prova di compressione

La procedura adottata nel test è stata la seguente:

- Montaggio cella di carico
- Centraggio provino sulla base
- Avvicinamento della piastra in rapido
- Applicazione precarico 50 N
- Carico fino a snervamento con velocità 1 mm/min
- Scarico fino a 50 N
- Secondo carico con velocità 1 mm/min

La procedura viene ripetuta per tutti i provini dopo aver azzerato la traversa. Dal display del computer collegato alla macchina di prova è possibile leggere lo spostamento della traversa e il valore misurato dalla cella di carico.

La fase di scarico viene svolta per consentire di apprezzare il valore di modulo elastico (o di Young) della schiuma.

La compressione è stata eseguita fino a una distanza di circa 5 mm, corrispondente all'incirca a metà provino.

Avendo notato che, durante la prima prova, il carico di snervamento era circa pari a 8.5 KN, si è deciso di scaricare anche i provini successivi al raggiungimento di tale valore.

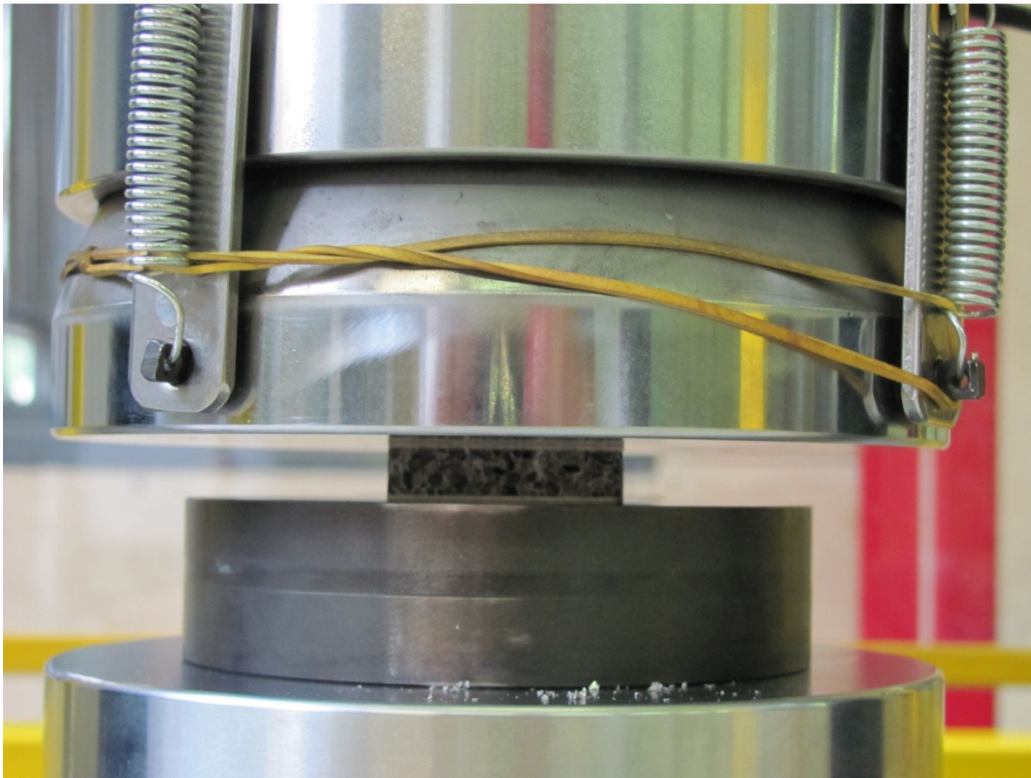


Figura 5.15: Provino pronto per la prova di compressione

La frequenza di acquisizione dei dati era in questo caso pari a 20 Hz.

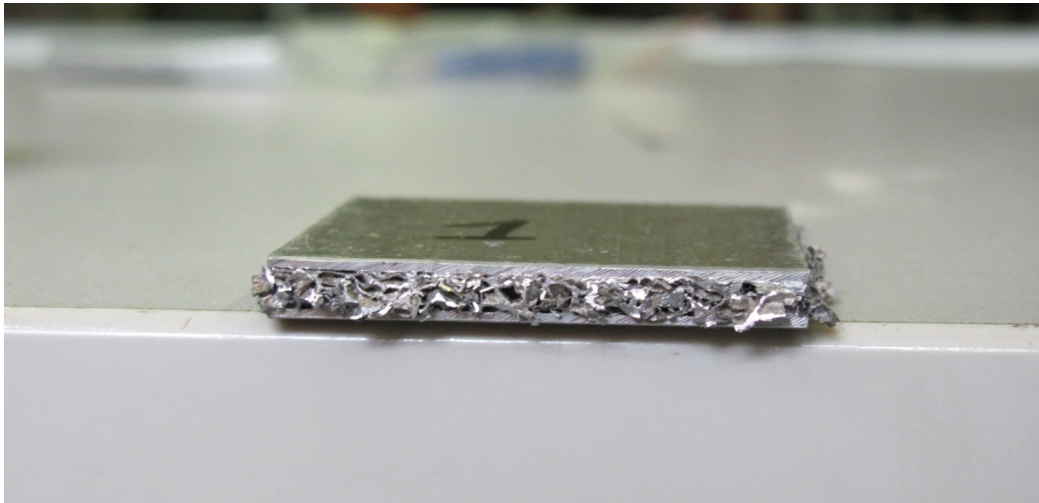


Figura 5.16: Risultato della prova su un provino

Questo l'esito della prova di compressione (i valori forniti dalla cella di carico sono stati trasformati in sforzi e gli spostamenti in deformazioni):

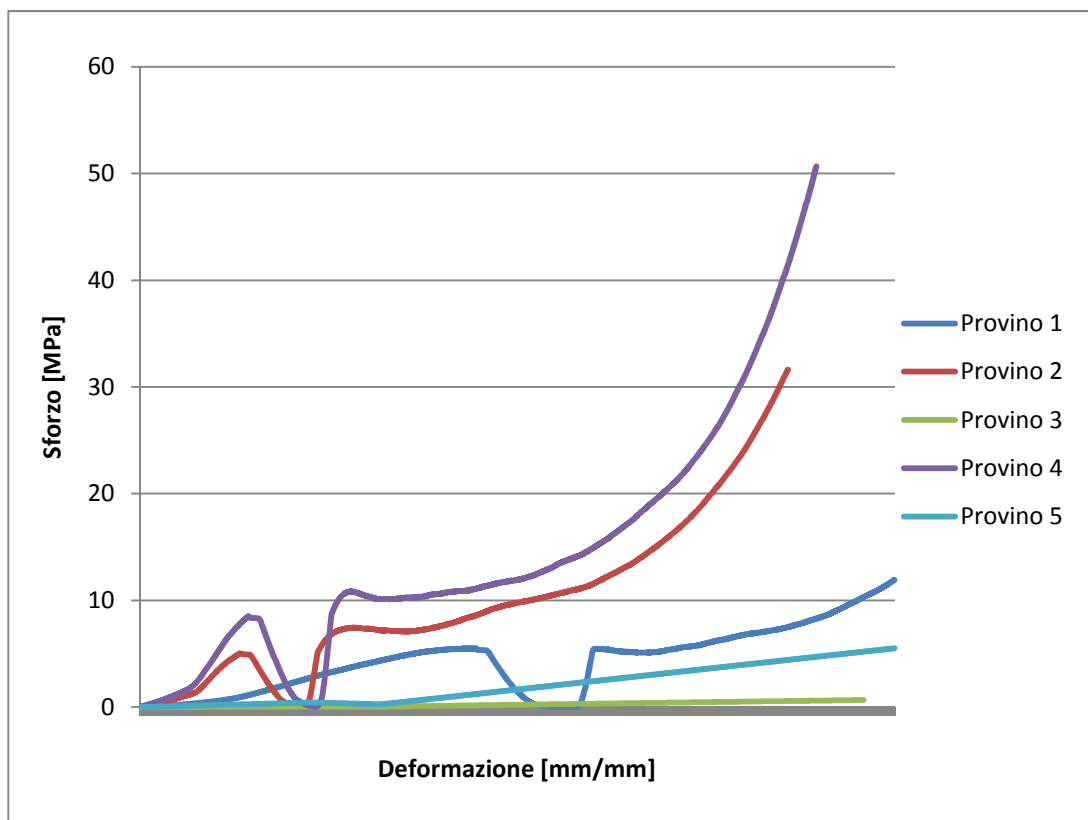


Grafico 5.2: Risultati prova di compressione

Dal grafico 5.2 si può notare il comportamento caratteristico delle schiume, se caricate a compressione.

E' da notare come vi sia una zona in cui vi è calo della deformazione e dello sforzo, che successivamente riescono a risalire; corrisponde alla fase di scarico e carico per determinare il modulo elastico.

L'andamento della curva del primo provino è fortemente discordante rispetto agli andamenti degli altri provini, in quanto il primo provino è servito come prova per comprendere il comportamento del materiale (per esempio il suo carico di snervamento).

Per tale motivo, i valori ricavati dal primo test non sono stati considerati.

I risultati emergenti dagli altri provini sono stati mediati per essere utilizzati nei modelli fem.

Un'ultima considerazione; per valutare l'effetto della presenza delle pelli di alluminio sui provini in compressione, si è pensato di considerare la deformazione totale composta nel modo seguente (essendo il pannello una struttura "in serie" soggetta a sforzo pari per tutte le componenti):

$$\epsilon = 2\epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (5.3)$$

Dove  $\epsilon_1$  rappresenta la deformazione di una pelle ed  $\epsilon_2$  quella della schiuma.

Poi, conoscendo il modulo elastico di tale materiale (68900 MPa) e lo sforzo punto a punto, è stato possibile ricavare la quota parte della deformazione imputabile alla presenza delle pelli:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \quad (5.4)$$

Da tali calcoli è emerso come la presenza dell'alluminio fosse trascurabile, in quanto influiva per un valore pari a circa lo 0.1 %.

Tutti questi calcoli sono stati possibili considerando che l'alluminio restasse in campo elastico (realistico, essendo lo sforzo massimo della prova al di sotto del carico di snervamento).

### 5.1.3 MISURAZIONE AL MICROSCOPIO OTTICO

Durante le prime analisi fem, per iniziare ad ottenere qualche risultato indicativo, sono stati utilizzati anche valori approssimati.

In precedenza è stato citato il fatto che le prime analisi sono state svolte utilizzando i valori di una schiuma utilizzata in un altro lavoro di tesi.

Inoltre, si è preso atto dalle indicazioni del fornitore che i pannelli utilizzati avessero pelli di spessore 0.7 mm e spessore complessivo pari a 9.5 mm.



Essendo difficile misurare lo spessore della pelle (a causa della presenza della schiuma), si è deciso di procedere ad una misura ottica per verificare se i valori forniti fossero corretti.

Va detto che la tolleranza su questo tipo di pannelli è solitamente piuttosto larga, perciò ricorrere alla misura ottica è sembrato un modo per essere maggiormente cautelativi.

E' stato preso uno dei provini utilizzati per la prova di trazione e visionato tramite il microscopio ottico LEICA MZ 75, dotato di videocamera.

Sono state acquisite 8 immagini del provino (4 della parte superiore e 4 di quella inferiore) in posizioni diverse, per avere un'idea concreta del reale spessore del provino.

Successivamente tramite un altro software è stato possibile misurare lo spessore della pelle con sufficiente accuratezza (sicuramente migliore di quella ottenibile tramite un calibro o una riga).

La media dei valori ottenuti porta a dire che esiste un lato del sandwich dove la pelle ha spessore di circa 0.8 mm e un altro lato dove la pelle era spessa 0.7 mm.

La differenza tra le due pelli era visibile già osservando con attenzione le pelli, ma logicamente non sarebbe stato possibile quantificarne l'entità.

A questo punto appare utile stabilire se c'è influenza nel fatto di avere lo spessore minore sulla pelle interna o su quella esterna; anche questo può essere determinato tramite analisi fem.



Figura 5.17: Microscopio LEICA MZ 75

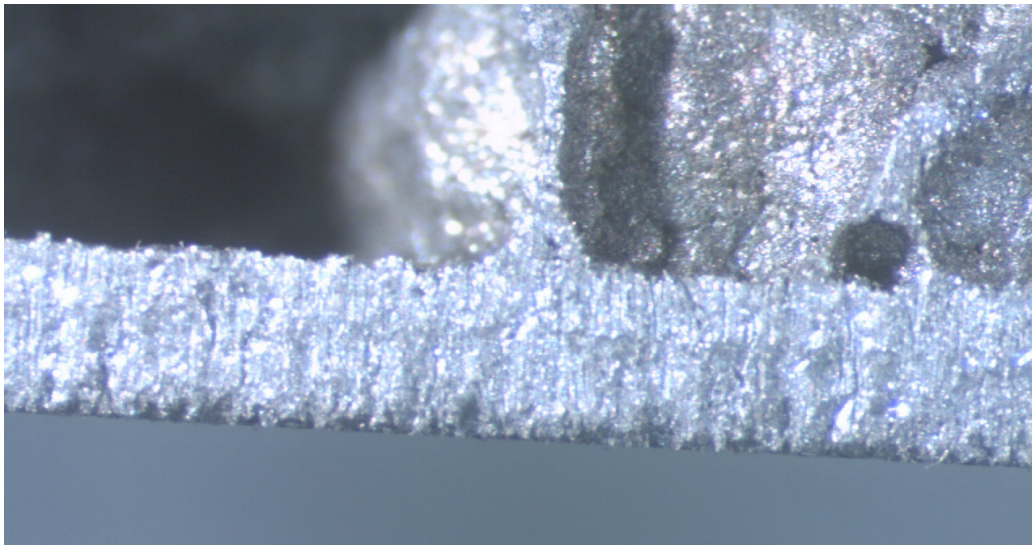


Figura 5.18: Fotografia al microscopio ottico; si nota la pelle e, appena sopra, le prime bolle

## 5.2 TEST DINAMICI

Questo tipo di test viene eseguito al fine di avere un'idea di massima del comportamento dei pannelli sandwich rispetto ad un urto.

Il test viene eseguito per questo motivo su torre di caduta verticale.

I provini sono stati realizzati tramite la macchina per il taglio WaterJet con abrasivo, e sono di dimensione  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  con uno spessore pari a quello della lastra da cui sono ricavati, ovvero 9.6 mm.

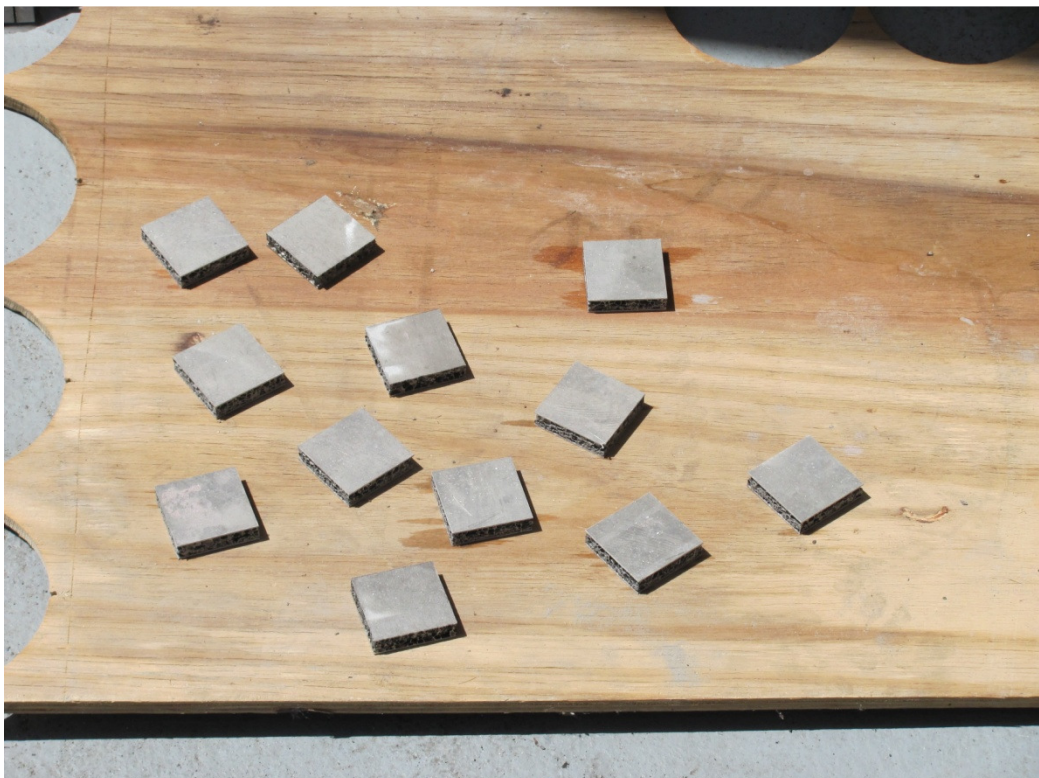


Figura 5.19: Provini quadrati

Questi provini sono stati testati utilizzando la torre di caduta verticale dell'azienda Picchio S.p.a, che ha collaborato per la realizzazione della tesi.

Per avere una descrizione completa della macchina di prova e della modalità di prova si può fare riferimento al capitolo 8, dove è presente una spiegazione esaustiva.

L'idea era quella di valutare il comportamento dei pannelli sandwich sottoposti ad un impatto dinamico; le condizioni di prova erano le seguenti:

- Distanza di impatto 0.5 m

- Peso massa impattante 294 kg
- Velocità di impatto 3.13 m/s

La velocità di impatto è funzione dell'altezza di sgancio e della massa impattante scelte, che sono regolabili.

Sono state scelti valori bassi sia di carico che di altezza, poiché la dimensione dei pannelli era estremamente ridotta.

Inoltre si è scelto di incollare cinque pannelli uno sull'altro a formare una piccola torre, in modo da evitare che il maglio potesse andare a contatto con il terreno.

Si è scelto di non utilizzare delle basi per fissare i pannelli in quanto l'altezza da cui il maglio veniva sganciato era molto ridotta e si pensava che non ci sarebbe stato uno slittamento laterale della pila di pannelli.

Sono stati testati due provini, entrambi costituiti da cinque pannelli sovrapposti.



Figura 5.20: Provino pronto per la prova su torre di caduta

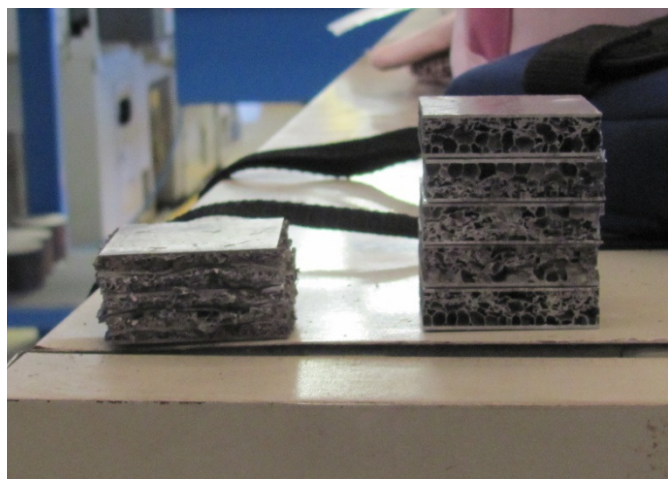


Figura 5.21: Confronto tra provino compresso (a sinistra) e non (destra)



Figura 5.22: Provino dopo la prova di compressione

L'altezza iniziale dei provini era pari a 48 mm, e quella finale pari a 19 mm. Nonostante lo spessore ridotto, la schiuma metallica ha fornito una buona resistenza alla compressione e il provino non ha subito uno slittamento laterale durante la prova.

Tramite una scheda di acquisizione è stato possibile ricavare i dati provenienti dall'accelerometro, che, elaborati dal software *Labview* hanno consentito di ricavare i grafici tempo-decelerazione.

I dati ricavati sono poi stati filtrati attraverso una routine Matlab applicando un filtro detto CFC 60, previsto dal regolamento FIA.

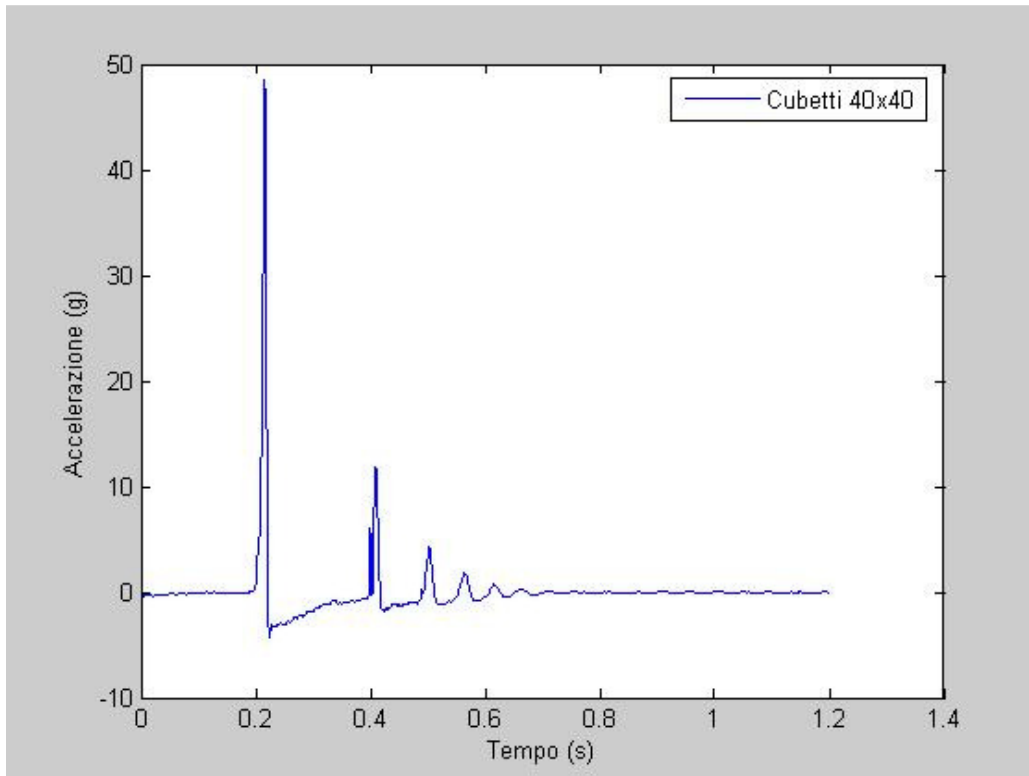


Figura 5.23: Andamento dell'accelerazione nel tempo

Il grafico si riferisce solamente al secondo provino testato, in quanto nel primo caso non si ha avuto un corretto rilevamento dei dati.

Come si nota dalla figura 5.23 l'impatto è avvenuto in modo estremamente rapido nel tempo, infatti si nota che dopo circa 20 ms l'accelerazione diventa negativa, ovvero si ha un ritorno del maglio, che inizia a subire "rimbalzi" impercettibili a vista fino a fermarsi.

Si nota un unico picco elevato in quanto non era previsto che si formassero pieghe.

## 6 ANALISI FEM DELLA SOLUZIONE IDEATA

La creazione di un modello fem (finite element method) è un passo fondamentale nella progettazione di un particolare, poiché consente di valutare un numero elevato a piacere di soluzioni progettuali e di limitare i costi per la realizzazione di prove sperimentali.

Nel caso degli assorbitori d'urto tale esigenza è particolarmente sentita; il costo necessario per realizzare il provino e il tempo speso per studiare i parametri di schiumatura in forno e per realizzare dei provini accettabili non è da trascurare. L'operazione di schiumatura in effetti, non è banale, in quanto la qualità della schiuma ottenuta dipende da molti fattori e il processo può diventare instabile e dare risultati diversi da quelli sperati.

Nell'operazione di schiumatura c'è una difettosità abbastanza elevata, perciò il dover realizzare materialmente soluzioni differenti, porterebbe ad aumentare in modo esponenziale il numero di provini realizzati (ed eventualmente testati). Molto meglio allora cercare di comprendere tramite l'analisi ad elementi finiti, quale soluzione sia la migliore.

L'utilizzo degli elementi finiti è inoltre una utile opzione per effettuare delle scelte in fase di progettazione.

Il programma ad elementi finiti utilizzato (in questo caso *Abaqus* versione 6.7), per quanto in grado di permettere la descrizione accurata della situazione reale, deve la sua precisione all'abilità dell'essere umano che realizza il modello.

Tale modello, per essere accurato, deve essere stato tarato in base a dati sperimentali, poiché l'accuratezza del modello è la capacità dello stesso di ricalcare con meno errore possibile il risultato che si ottiene dall'analisi sul campo.

Per ottenere un modello accurato, la prima fase del mio studio si è basata sull'analisi dei modelli esistenti realizzati con lo stesso software, in quanto al momento non disponevo di prove sperimentali.

Tali modelli erano già stati tarati su prove sperimentali eseguite dai ricercatori, per tale motivo sono da considerarsi validi.

Il modello ottenuto però, potrebbe distaccarsi anche di un valore considerevole dai risultati ottenuti sperimentalmente, a causa delle variabili di processo della schiuma, della variabilità della prova di impatto e di tutte quei particolari che sono stati trascurati o stimati con errore nella fase numerica.

Se fosse necessario, occorrerà tarare il modello effettuando un confronto tra i dati sperimentali e quelli numerici.

## 6.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO

### 6.1.1 STUDIO MODELLI ESISTENTI E SOLUZIONI ADOTTATE

In generale, i modelli esistenti prevedono la modellazione dell'impatto attraverso l'utilizzo di 3 elementi:

- Superficie di impatto
- Assorbitore
- Supporto o base

L'assorbitore viene modellizzato attraverso elementi *shell* 3D di tipo S4R (perciò deformabile), mentre per quanto riguarda la base e la superficie di impatto, esse vengono definite come elementi di tipo *analytical rigid*, perciò non necessitano di essere meshate e non sono deformabili.

E' possibile anche definire queste ultime come strutture di tipo *discrete rigid*, le quali possono essere suddivise in elementi finiti; entrambe le scelte sono valide e i risultati ottenuti sono gli stessi, a meno di trascurabili differenze.

L'unica differenza che sussiste tra *analytical* e *rigid* è la possibilità di definire soltanto alcune geometrie oppure avere a disposizione un campo illimitato di geometrie da realizzare.

Nel nostro caso, la geometria da realizzare è estremamente semplice, perciò ognuna delle due possibilità è senz'altro corretta.

Se è previsto il riempimento in schiuma, come nel caso in esame nella tesi, viene aggiunto un elemento supplementare nella modellazione, la schiuma; Abaqus presenta il modello *Crushable Foam*, che si adatta abbastanza bene alle nostre esigenze, a patto di inserire dati corretti riguardanti il comportamento della schiuma metallica.

Tale modello consente di definire le proprietà della schiuma in campo plastico; se la scelta cade su di esso, il programma impone l'utilizzo di elementi finiti *solid* 3D (nel mio caso ho scelto elementi C3D8R, che presentano integrazione ridotta e controllo del fenomeno dell'hourglass); non è possibile utilizzare elementi *shell*.

In generale la dimensione dell'elemento finito della schiuma dovrebbe essere circa due volte quella dell'elemento finito della *shell* che modella il tubo esterno(16), perciò tale vincolo di massima verrà considerato.

Le mesh sia del tubo che della schiuma vengono realizzate con una disposizione di tipo *sweep*, in quanto è quella che consente di evitare elementi finiti distorti o quantomeno di ridurne il numero.



Un ulteriore elemento che può far parte del modello è l'adesivo; esso può esserci o meno a seconda del tipo di interazione che si vuole creare tra schiuma e involucro dell'assorbitore.

Esistono due modalità in cui è possibile realizzare il sandwich con cuore in schiuma; è possibile unire le pelli al cuore tramite un adesivo, oppure "schiumare" direttamente il precursore tra le pelli in modo che si crei un legame metallico, detto *adesione metallurgica*, che consenta di ottenere un legame più efficiente tra pelle e schiuma.

Un'altra parte del modello dove l'adesivo può avere un ruolo attivo è la giunzione tra gli angolari e le pelli del sandwich.

Si è deciso di considerare diverse possibilità di giunzione, e di valutarle attraverso la modellazione numerica.

Per cercare di ottenere dei modelli che dessero risultati sensati senza avere a disposizione delle prove sperimentali ho eseguito una ricerca bibliografica dei lavori svolti da alcuni ricercatori.

Uno dei modelli che ho studiato è quello di Hao(17), il quale ha modellato la compressione di due tubi concentrici circolari basandosi sui dati sperimentali della prova eseguita da Gameiro (18).

Tale modello presenta anch'esso gli elementi citati precedentemente ma, in particolare, prevede l'aggiunta di un vincolo aggiuntivo alla base dei cilindri, il quale obbliga l'assorbitore a deformarsi in un modo diverso da quello immaginato e perciò particolare.

Tale deformazione inizia a partire dall'estremità del tubo a contatto con la base e prosegue poi simultaneamente alle due estremità, mentre da altri studi si notava come la modalità di deformazione fosse differente, ovvero a partire dall'estremità impattata; in quel caso però non vi era alcun vincolo al cilindro.

Lo stesso risultato si ottiene vincolando il tubo alla base lungo tutte le direzioni (ovvero incastrandolo).

Da ciò si può capire come il tipo di vincolo scelto per l'assorbitore porti a variare in modo significativo il suo comportamento.

Per tale motivo risulta utile analizzare un numero maggiore di modelli per comprendere la logica in base alla quale viene vincolato l'assorbitore e leggere le norme che regolamentano le prove in torre di caduta, in quanto il modello fem deve cercare di riprodurre nel modo più fedele possibile tale tipo di impatto.

Lo studio dei lavori di Shahbeyk et al.(19) e di Hanssen et. al.(20) permette di vedere un altro tipo di vincolo, che è rappresentato da un dispositivo di bloccaggio alla base del provino, e che può essere rappresentato nel modello fem tramite un fondello a "bicchiere" oppure bloccando gli spostamenti che tale fondello inibirebbe.

Tale vincolo si avvicina molto a quello utilizzato nel caso del lavoro di tesi. In effetti, anche nella prova su torre di caduta prevista dalla Picchio S.p.a., si prevede di utilizzare un fondello anti-slittamento dell'altezza di circa 10 mm, che garantisca il non slittamento del provino a causa dell'impatto.

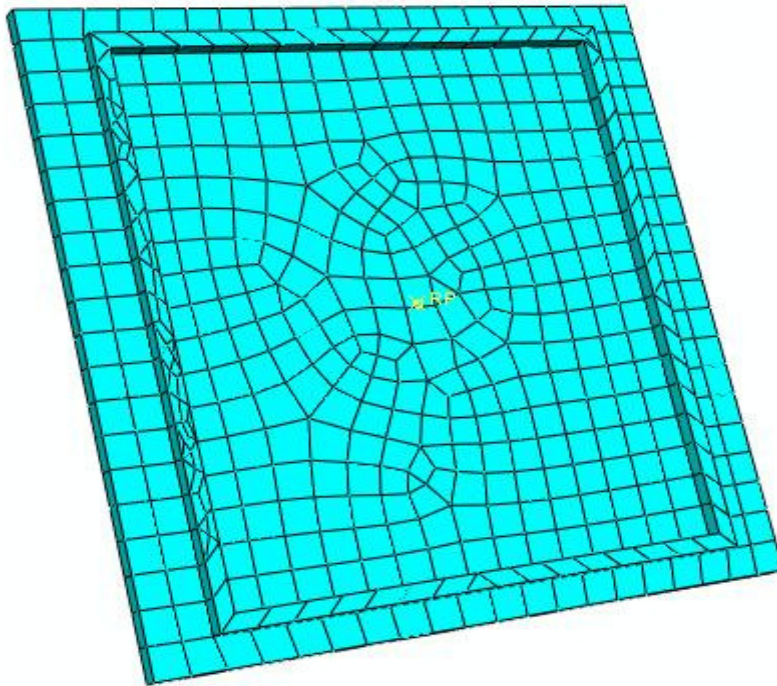


Figura 6.1: Fondello anti-slittamento

Anche Zarei et al.(21) prevedono di bloccare la base dell'assorbitore attraverso un dispositivo di bloccaggio e a ciò corrisponde la realizzazione di un vincolo nel modello per simulare questo bloccaggio; anche questa configurazione è simile a quella della macchina a disposizione.

Altri vincoli che vanno imposti sono quelli relativi alla base e alla massa impattante l'assorbitore.

La base deve essere incastrata, per evitare che l'assorbitore nella compressione la sposti (nelle prove sperimentali e in esercizio ciò non deve accadere).

Il vincolo viene applicato ad un *reference point*, in quanto la base è stata definita in modo *discrete rigid* e perciò non ha nodi.

La massa impattante invece deve muoversi, per simulare il movimento in fase di impatto, ma deve essere vincolata a farlo solamente in una direzione, in linea con l'asse dell'assorbitore.

Anche in questa caso il vincolo viene applicato ad un *reference point*.

Una menzione particolare meritano i contatti.

In un'analisi dinamica di compressione, la definizione delle interazioni tra le diverse parti in gioco e delle interazioni che una parte deformabile ha con sé stessa (per evitare compenetrazioni) è fondamentale.

Viene definito un contatto tra l'assorbitore e la base, uno tra l'assorbitore e la massa impattante, ed infine uno riguardante soltanto le superfici dell'assorbitore (*self contact* di Abaqus).

Se è previsto il riempimento in schiuma, occorre anche tener conto delle interazioni esistenti tra schiuma e parte esterna dell'assorbitore; tali interazioni possono essere modellizzate tramite un contatto *surface to surface*.

Tali contatti possono essere definiti imponendo un attrito o meno; dagli studi di Qiao et.al.(22) è risultato che considerare l'attrito esistente tra le superfici consente di ottenere risultati più vicini alla realtà.

Un'altra modalità più semplificata, corretta se si decide di imporre le stesse condizioni di contatto a tutta la struttura è quella di imporre un solo *general contact*, il quale può essere applicato a tutte le superfici del modello (*all with self*), oppure solo ad alcune di esse, opportunamente selezionate.

Nel nostro caso questa ultima soluzione è sembrata in grado di fornire risultati validi, perciò essendo la più semplice, si è scelto di utilizzarla.

Altro discorso non facile da affrontare è quello relativo al contatto tra schiuma e tubo metallico.

Inizialmente, non avendo ancora deciso come realizzare materialmente l'assorbitore, si è deciso di imporre un vincolo di tipo *tie*, che simula un incollaggio ideale, perfetto, tra le due superfici.

Tale vincolo prevede che la superficie *master* (ovvero quella su cui vengono proiettati i nodi) sia quella del tubo, mentre quella *slave* sia quella della schiuma.

Per definire al meglio questa interazione è necessario decidere come si intende interfacciare le due superfici (con adesivo oppure libere).

A questo punto, se necessario, verrà modellato l'adesivo.

Trattandosi di analisi dinamiche di impatto (per le quali si utilizza il modulo *explicit* di Abaqus), occorre poi definire la dinamica dell'impatto.

A seconda della ricerca analizzata, il modo di descrivere l'impatto è differente.

Occorre però tenere in considerazione il fatto che l'impatto che si vuole rappresentare nel modello deve ricalcare il più fedelmente possibile quello che avviene in fase sperimentale, se si ha intenzione di procedere con un confronto tra risultati numerici e sperimentali.

Per tale motivo, come detto in precedenza per i vincoli, la scelta delle condizioni di impatto dipende essenzialmente da come esso avviene in torre di caduta.

Nelle prime analisi che sono state eseguite durante questo lavoro di tesi l'obiettivo era solamente quello di apprendere come modellare al meglio gli impatti e di confrontare alcune soluzioni differenti per comprendere quali configurazioni dessero risultati migliori.

Per questo motivo si è deciso di svolgere le analisi tutte nelle medesime condizioni, impostando valori tipici individuati nelle prove sperimentali eseguite in letteratura.

Si è impostato un valore di velocità per la massa impattante pari a  $12.5 \frac{m}{s}$  e un valore di massa pari a 800 kg.

Tali valori non sono però definitivi, in quanto il valore della velocità della massa è legato all'altezza della torre di caduta e il peso della massa è quello utilizzato in torre di caduta.

Le analisi sono state eseguite con degli step di durata pari a 40 ms, sufficienti ad osservare la compressione dell'assorbitore e il ritorno elastico dello stesso; in effetti, anche nella realtà, durante gli incidenti il tempo di impatto è molto basso.

Il passo finale, una volta eseguita l'analisi, è quello di analizzare i dati per trarre le dovute conclusioni progettuali.

In particolare, sono di interesse la forza e l'accelerazione sviluppate durante l'impatto e lo spostamento che subisce l'estremità libera del provino sottoposta al carico della massa impattante.

Per calcolarli, occorre definire alcuni *History Output*.

Viene calcolata la reazione vincolare esistente nel reference point della base (che corrisponde alla forza sviluppata nell'impatto), lo spostamento del reference point della massa impattante (che corrisponde alla compressione subita dal provino) e l'accelerazione del reference point della massa impattante (che rappresenta la decelerazione che subisce la vettura nell'impatto).

Il modello così definito presentava però un problema, ovvero l'elevato costo computazionale, che si traduceva in tempi di analisi particolarmente lunghi.

Per questo motivo è stato modellato solamente metà assorbitore, ponendo un vincolo di simmetria per rappresentare anche la metà non modellata.

I risultati ottenuti sono concordi con quelli ottenuti con modello intero.

### 6.1.2 MODELLO NUMERICO DELLA SOLUZIONE IDEATA

Nel paragrafo 6.1.1 sono state elencate quali sono le caratteristiche tipiche dei modelli relativi agli assorbitori d'urto, ai quali mi sono ispirato.

Ho cercato di ricostruire nella tesi il modello dell'assorbitore da progettare nel modo più preciso possibile, cercando di introdurre tutti i particolari che lo portassero ad essere il più vicino possibile alla soluzione reale.

Dopo aver realizzato le parti, si è posto il problema di definire in maniera corretta il comportamento del materiale.

Per la pelle e gli angolari, si è trattato di definire le proprietà della lega Al5005. Dalla bibliografia è stato possibile ricavare la densità, il modulo elastico e il coefficiente di Poisson.

Per quanto riguarda il comportamento plastico, dalla bibliografia è stato individuato un grafico sforzo-deformazione del materiale.

A questo punto, con l'ausilio del software *Datathief*, è stato possibile approssimare in modo più o meno corretto la curva.

Infine, sono stati introdotti i due coefficienti relativi alla legge di *Cowper-Symonds* previsti dal programma (che consentono di considerare l'effetto dello strain rate), che per le leghe di alluminio sono noti(23) essere pari a 6500 (coefficiente moltiplicativo) e 4 (coefficiente esponenziale).

Per la schiuma il caso è stato leggermente diverso, in quanto, come accennato in precedenza, esiste un materiale definito nel programma Abaqus, detto *Crushable Foam*, che consente di definire le proprietà plastiche della schiuma.

Le altre proprietà del materiale che sono state definite sono ancora una volta modulo elastico, coefficiente di Poisson e densità.

Per acquisire tali dati ci si è basati su una tesi precedentemente svolta presso il Laboratorio Musp(24), relativa allo studio delle schiume metalliche.

La schiuma utilizzata in quella tesi era leggermente differente da quella che si intende utilizzare in questo caso, ma per avere dei primi dati indicativi, nei modelli iniziali sono stati utilizzati tali dati, riservandosi di utilizzare quelli della schiuma effettiva, dopo la sua caratterizzazione (descritta al capitolo 5).

Un commento particolare riguarda la definizione delle sezioni, in particolare di quelle associate alle parti meshate con elementi shell.

Per evitare interferenze, è necessario porre attenzione a come viene definita la sezione di tali parti.

Trattandosi di shell, lo spessore non è visibile effettivamente, ma viene conteggiato dal solutore al momento in cui l'analisi viene fatta funzionare.

E' possibile definire la direzione in cui viene fatto sviluppare lo spessore; se si lascia il valore di default (pari a zero), lo spessore viene distribuito in maniera simmetrica attorno alla feature.

E' possibile però associare ad esso un valore pari a 0.5 se si vuole che si sviluppi internamente, oppure di -0.5 se si desidera che esso si sviluppi all'esterno rispetto alla sezione visualizzata.

Nel caso in esame era indispensabile definire tali sezioni correttamente, in quanto si trattava di una struttura di tipo sandwich.

Si è deciso perciò di associare un valore pari a -0.5 alla pelle esterna e di 0.5 a quella interna.

Come accennato, nel modello sono stati inseriti degli angolari, in quanto la soluzione migliore è sembrata essere quella di utilizzare quattro pannelli sandwich connessi da angolari in alluminio.

Essi sono stati modellati con elementi shell analoghi a quelli utilizzati per le pelli, utilizzando una mesh di tipo sweep nel caso senza rivetti (le analisi iniziali) e *structured* nel caso con rivetti.

In generale l'utilizzo di una mesh di tipo sweep porta a risultati migliori, ma la presenza dei rivetti non lo rendeva possibile, in quanto la qualità della mesh risultava essere insufficiente.

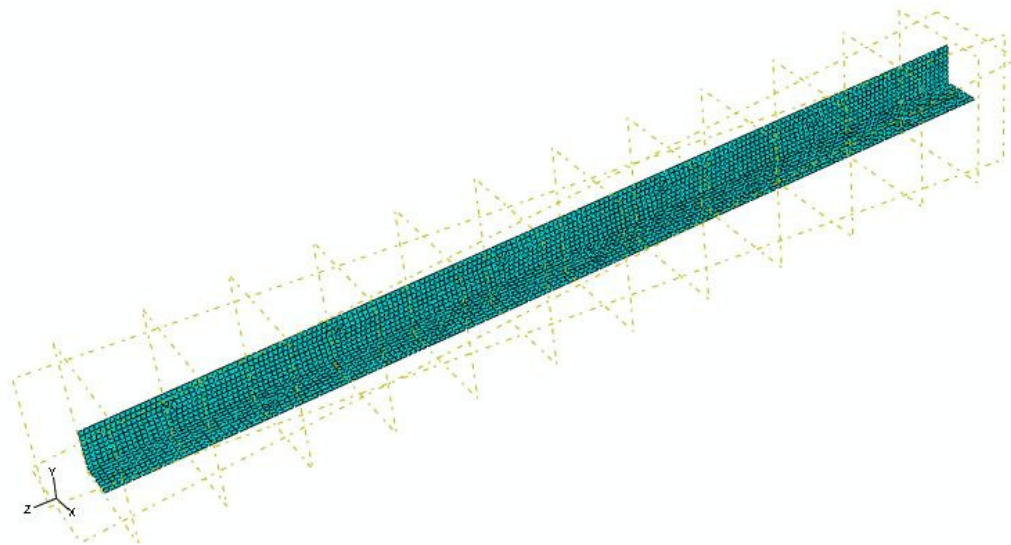


Figura 6.2: Uno dei quattro angolari inseriti nel modello

Per gli angolari interni ed esterni è stato fatto lo stesso ragionamento applicato alle pelli in termini di sezioni, in quanto anch'essi sono stati modellati tramite elementi finiti shell.

A questo punto, era necessario verificare quale fosse il modo migliore per connettere angolari e pannelli; si è passati così alla modellazione dell'adesivo.

Inizialmente si è deciso di utilizzare le tecniche previste da Abaqus per modellare l'adesivo; esse sono sostanzialmente due.

La prima consiste nel creare un elemento *solid*, dello spessore e della forma dell'adesivo, e assegnare ad esso alcune proprietà.

Innanzitutto occorre creare una sezione ad hoc di tipo *cohesive*; questa sezione poi può avere caratteristiche diverse, a seconda del comportamento che si prevede debba avere l'adesivo.

Un comportamento di tipo *continuum* è quello tipico degli adesivi che hanno uno spessore consistente, e caratteristiche di forza e rigidità valutabili.

Il comportamento è di tipo *traction-separation* se invece lo spessore è molto sottile, tanto che non è possibile definire le caratteristiche suddette, ma occorre caratterizzarlo in funzione delle capacità emerse dalla prova *lap shear* oppure dal *peel test*.

Infine, occorre dare proprietà coesive anche agli elementi finiti della mesh con cui si è discretizzato l'adesivo.

Una seconda possibilità che viene offerta dal software è quella di modellare l'adesivo come un layer di elementi solidi.

La procedura da adottare è la seguente; creare una parte di tipo *shell*, realizzare la mesh e, a partire da essa, creare una *orphan mesh*.

Su di essa è poi possibile creare un layer di elementi solidi (con la funzione *create solid layers* all'interno di *edit mesh*), ai quali si può assegnare una sezione di tipo coesivo ed elementi di tipo coesivo, come sopra.

Il problema che si è principalmente riscontrato è il fatto che i dati esistenti si sono rilevati inadeguati allo scopo.

I dati sugli adesivi che si hanno solitamente a disposizione derivano da prove quasi-statiche, oppure da prove dinamiche che però sono state realizzate a velocità nettamente inferiori rispetto a quelle dell'impatto.

E' così estremamente difficile approssimare con efficacia il comportamento di un adesivo a tali velocità di impatto.

In effetti si è notato dal modello come l'aggiunta dell'adesivo lo rendesse particolarmente rigido; ciò ha portato a pensare che il modello considerasse l'adesivo come un elemento aggiuntivo che avesse un ruolo importante nella reazione al carico imposto.

Ciò è sembrato alquanto improbabile, in quanto la funzione dell'adesivo nell'impatto è quella di giunzione tra le parti della crash box.

La soluzione pensata è stata quella di fare un'altra approssimazione per modellare il comportamento dell'adesivo, che fosse plausibile anche nel caso di adesione metallurgica e che inoltre avrebbe presentato il vantaggio di non richiedere l'esecuzione di test particolari (che avrebbero comunque fornito un risultato approssimato).

Si è deciso di modellare l'unione tra le parti attraverso il vincolo cinematico *tie*, che rappresenta una sorta di adesione ideale.

Tale approssimazione è maggiormente realistica nel caso del giunto con adesione metallurgica, mentre è un'approssimazione più forte se si pensa ad una giunzione con adesivo.

Anche il collegamento degli angolari alle pelli è stato definito tramite il vincolo *tie*; in questo caso però si è pensato di "spuntare" l'opzione *exclude shell element thickness*, allo scopo di evitare interferenze nell'assieme.

Un'altra particolarità del modello è la necessità di rappresentare i rivetti che vengono montati sull'assorbitore per collegare i pannelli.

Per realizzarli occorre definirli attraverso il menu *interaction*.

Per prima cosa si definisce la sezione della connessione; vi è la possibilità di definire sezioni semplici oppure complesse (che raggruppano nella stessa sezione le caratteristiche di due sezioni semplici).

Il modo migliore per realizzare il rivetto, è sembrato quello di modellarlo come una struttura rigida.

Ciò è stato possibile farlo dando ad esso la proprietà di tipo *beam*.

Poi occorre creare un *wire*, ovvero un filamento al quale si assegna la sezione definita in precedenza.

Esso deve collegare le sezioni che devono essere unite dal rivetto, e tale collegamento viene ottenuto assegnando la connessione definita in precedenza al wire creato.

I punti che rappresentano le estremità del wire vengono definiti attraverso la creazione di specifici *reference point*.

Tale procedimento si ripete per ogni rivetto da realizzare.

Ad ogni serie di wire creati occorre assegnare un sistema di riferimento locale, che consenta di comprendere come siano orientati i gradi di libertà assegnati al filamento.

Un altro modo possibile, alternativo alla creazione del wire, sarebbe stato quello di modellare direttamente elementi di tipo *beam* nel modello, che fungessero da rivetti.

Nel modello è possibile poi definire la dimensione dei rivetti, in modo sufficientemente realistico.

Ciò è possibile creando un vincolo di tipo *coupling* che assume come punto di controllo il reference point cui è collegato il wire e come superficie quella definita dall'utente.

Tale superficie viene definita attraverso la creazione di una partizione circolare della dimensione della testa del rivetto.

Il coupling permette di accoppiare il comportamento del reference point a quello della superficie cui è collegato, in modo tale da rappresentare la presenza del rivetto.



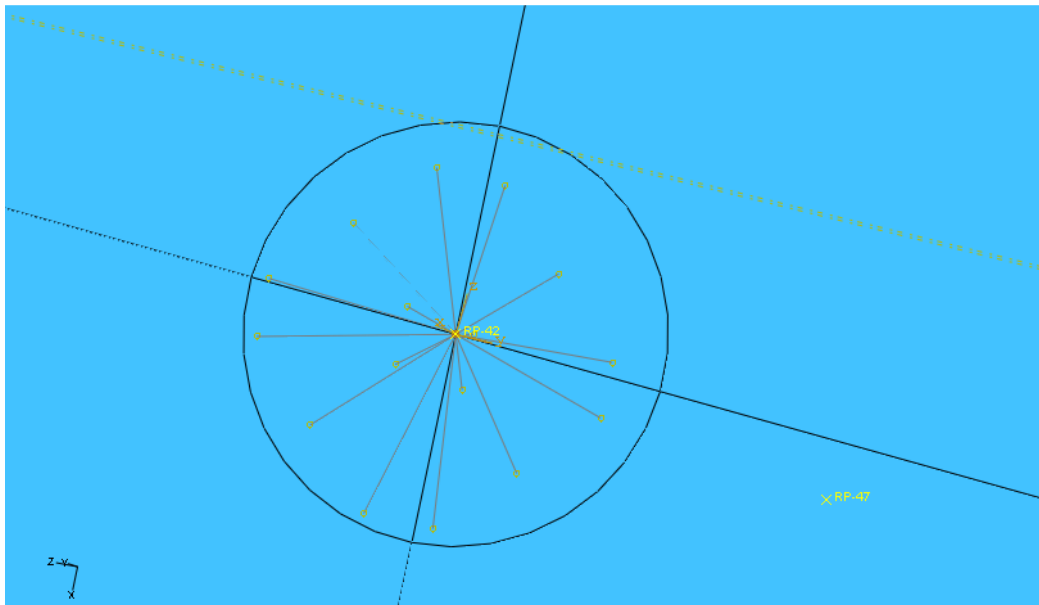


Figura 6.3: Coupling realizzato per rappresentare l'estremità del rivetto

Le condizioni di prova sono diverse rispetto a quelle descritte al paragrafo 6.1.1.

Il motivo è legato al fatto che ora sono a disposizione dati precisi riguardo alle sollecitazioni cui deve resistere la crash box.

Nella prova su slitta orizzontale il carico cui è soggetto è pari a 610 kg e la velocità di impatto è pari a  $12 \frac{m}{s}$ , mentre nella prova su torre di caduta verticale il carico è pari a 294 kg e la velocità di impatto  $8.25 \frac{m}{s}$ .

La progettazione viene basata sulla prova su slitta orizzontale, in quanto sarà quella che l'assorbitore dovrà superare per essere omologato.

In ogni caso, vengono però eseguite prove numeriche anche con la configurazione relativa alla torre di caduta verticale, in quanto in realtà durante la tesi l'assorbitore verrà testato solo su tale dispositivo.

Per effettuare un confronto tra i risultati sperimentali e numerici è quindi indispensabile avere a disposizione anche tali dati.

### 6.1.3 PROBLEMATICHE INCONTRATE

Durante le analisi dinamiche di impatto frontale sono occorse alcune problematiche, alle quali si è cercato di porre rimedio.

Tali problematiche venivano annunciate tramite *warning* (non sempre risolti, in quanto legati anche alla naturale imprecisione del modello) ed *errors*, ai quali

era indispensabile porre rimedio, perché non permettevano di portare a termine l'analisi.

Il problema principale in una analisi di questo genere è stata la forte deformazione cui vengono sottoposti gli elementi finiti.

Per questo motivo più di una volta si è verificato il seguente warning: "*The ratio of deformation speed to wave speed exceeds 1.000 in at least one element.*"

Tale avvertimento sta a significare che la velocità di deformazione è talmente elevata che lo sforzo non riesce a propagarsi nell'elemento.

Per risolvere questo problema è stato individuato un metodo efficace; per gli elementi solidi (come la schiuma), esiste un parametro della mesh che è possibile impostare, chiamato *distortion control* che, variato entro un range compreso tra 0 e 1, consente di controllare la distorsione di elementi soggetti ad urto.

Questo comando consente agli elementi finiti di non distorcersi in maniera esagerata, cosa che porterebbe a risultati irrealistici e perciò al blocco dell'analisi.

Tale problema accade più spesso nel caso di mesh più grossolane, e appare più di rado se si raffina la mesh.

Va detto però che i tempi per realizzare queste analisi sono particolarmente elevati, perciò è stato preferibile utilizzare lo strumento del *distortion control* piuttosto che raffinare ulteriormente la mesh e aumentare così i tempi di calcolo in maniera esponenziale.

Tale parametro ha come valore di default quello di 0.1; nelle analisi eseguite durante il lavoro di tesi si è scelto di impostare un valore pari a 0.2, e ciò ha permesso di completare le analisi con successo.

Un'altra problematica riscontrata, legata alla presenza della schiuma, era la precisione di calcolo.

Essendo la schiuma costituita da elementi finiti di tipo solido, il programma consiglia l'utilizzo di una doppia precisione di calcolo.

Lo svantaggio dell'utilizzo della doppia precisione è quello di allungare ulteriormente i tempi di analisi, già di durata rilevante a causa dell'elevato numero di elementi finiti necessario per rappresentare la schiuma.

Anche per questo motivo si è preferito evitare di ricorrere a mesh troppo spinte.

Infine, è stata incontrata un'ultima problematica nella modellazione finale.

Si è notato come l'aggiunta dei rivetti portasse a creare delle zone dove gli elementi finiti fossero eccessivamente distorti; per questo motivo è stato necessario infittire ulteriormente la mesh per poter portare a termine gli impatti.

Tale soluzione però, al posto di migliorare le cose, le ha peggiorate portando le analisi ad andare in crash dopo tempi ancora più ridotti.

Si è cercato allora di rendere la mesh più grossolana per vedere se potesse sortire un effetto positivo.

Ciò ha permesso di prolungare le analisi ma non di portarle a termine.

Il motivo è presto detto: per definire la superficie del coupling sono stati disegnati cerchi (uno per ogni rivetto) che rappresentassero la testa del rivetto, che hanno consentito di partizionare la superficie.

La mesh, di fronte a una discontinuità tale, è andata in crisi, non riuscendo a generare una mappatura che consentisse di contenere la distorsione e la rotazione degli elementi entro un limite accettabile.

L'unica soluzione possibile a questo punto è stata quella di definire il coupling con una modalità diversa.

Le superfici che dovevano partecipare al coupling sono state definite partizionando gli angolari in modo più semplice (tramite piani passanti per l'angolare), per evitare di creare mesh distorte.

Da tali partizioni sono nate superfici che sono state scelte per essere le superfici del coupling, in sostituzione dei cerchi precedenti.

A questo punto era però fondamentale definire la zona di influenza del rivetto, in modo da riuscire a quantificare la sua dimensione.

Per fare ciò si è selezionato all'interno del menu del coupling l'opzione *Influence radius*, specificando che esso dovesse essere pari a quello della testa del rivetto.

In generale, per risolvere i problemi incontrati e per avere informazioni utili sulla modellazione si è fatto ricorso al manuale di Abaqus(25).

## 6.2 RISULTATI OTTENUTI

Le analisi fem hanno lo scopo di fornire le risposte più o meno precise alle domande che il progettista si pone.

Nel caso in esame lo scopo non è mutato.

L'idea dell'azienda Picchio S.p.a. è stata quella di mantenere il più possibile simile l'assorbitore progettato rispetto a quello già esistente.

La prima mossa è stata quella di valutare se la riproduzione della stessa geometria e delle stesse dimensioni (compreso lo spessore) con la schiuma potesse dare risultati convincenti.

L'impressione era che ciò non sarebbe successo (in quanto l'honeycomb ha densità molto inferiore alla schiuma), ed è stato confermato dalle analisi fem.

La schiuma è più densa e rigida dell'honeycomb, e ciò lascia un ampio spazio di manovra per ottenere buoni risultati.

In particolare, a disposizione del Laboratorio Musp vi erano dei pannelli con le seguenti caratteristiche:

- Pelle in Al5005 con spessore 0.7 mm
- Schiuma in AlSiMg con spessore 8.1 mm
- Adesione metallurgica tra pelli e schiuma

La possibilità di avere a disposizione questi pannelli era molto interessante, in quanto la pelle è costituita di un materiale che ha minore resistenza rispetto a quella utilizzata per il sandwich in honeycomb, ed è realizzato per adesione metallurgica.

Questo è un altro vantaggio poiché solitamente i giunti in adesione metallurgica lavorano meglio rispetto a quelli uniti tramite adesivo; ciò è dovuto al fatto che trattandosi di un legame tra pelle e schiuma di tipo metallico (reso più forte dal fatto che sia la pelle che la schiuma contengano alluminio), è infinitamente più resistente di quello che può garantire un adesivo.

In effetti, solitamente, la rottura per giunti collegati in questo modo sopraggiunge non per distacco delle pelli dalla schiuma, ma per la rottura delle bolle del primo fronte di schiuma.

Avendo valutato tali vantaggi, si è pensato di costruire i primi modelli definitivi con queste caratteristiche, riservandosi di modificarle nel caso in cui i risultati fossero insoddisfacenti.

La prima domanda alla quale si è cercato risposta è la seguente: Come è possibile unire i pannelli che costituiscono la crash box?

Le modalità che si è deciso di prendere in considerazione sono due: 1) unione tramite angolari incollati ai pannelli e 2) unione tramite angolari incollati e rivettati ai pannelli.

Le differenze in termini di peso non sono molto rilevanti, ma è rilevante il modo in cui collassa l'assorbitore e la decelerazione media che consente di ottenere.

Una seconda domanda a cui si intende rispondere deriva invece dalle prove sperimentali eseguite sui materiali.

Come si è potuto vedere al capitolo 5, le dimensioni dei pannelli non erano esattamente uguali a quelle indicate dal fornitore.

Si è notato che lo spessore è leggermente differente (9.6 mm anziché 9.5 mm), ma non è questo il particolare più interessante.

Dal microscopio ottico si è avuta conferma di quanto si era già notato ad occhio nudo; lo spessore delle due pelli che costituiscono il sandwich non è lo stesso. Allora si è voluto capire attraverso i modelli se il fatto di montare il pannello da un lato oppure l'altro del sandwich può avere una certa influenza oppure no.

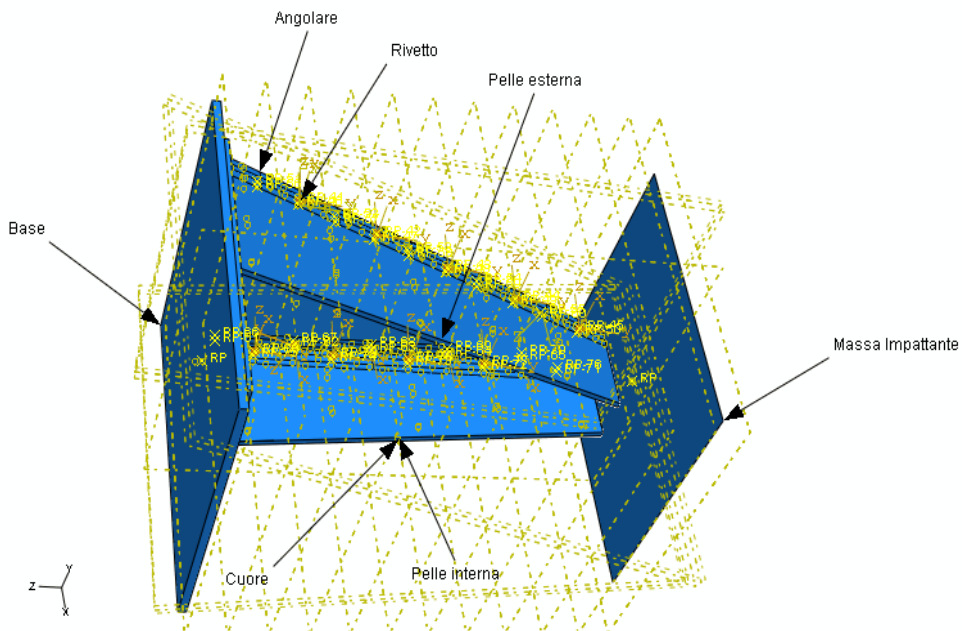


Figura 6.4: Modello FEM della crash box

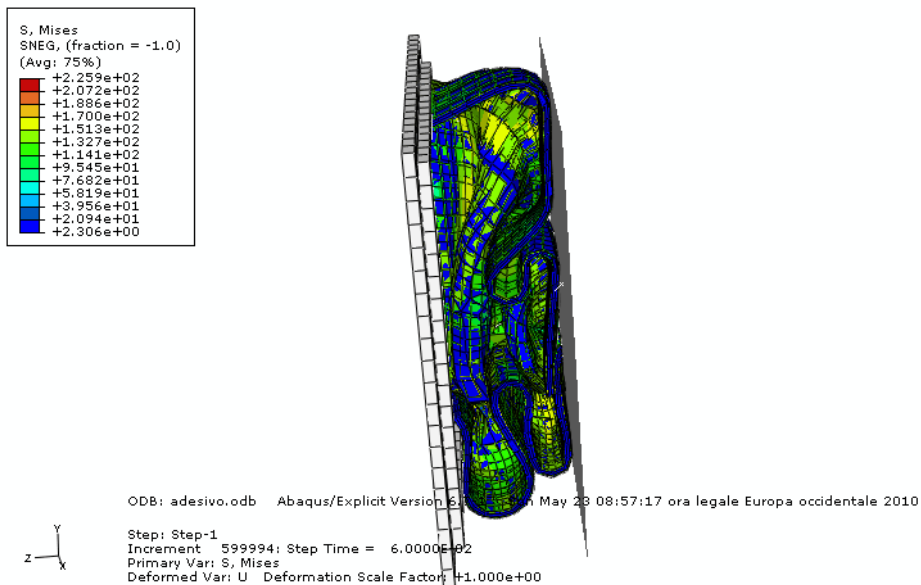


Figura 6.5: Crash box dopo la compressione

### 6.2.1 ANALISI DELL'INFLUENZA DELLA POSIZIONE DELLA PELLE PIU' SOTTILE

Come accennato al paragrafo 6.2 si è notato che lo spessore delle pelli superiore ed inferiore non è lo stesso.

Si vuole allora conoscere se il fatto che la pelle più sottile sia disposta all'interno della crash box oppure all'esterno abbia un'influenza sui risultati ottenuti.

Se avesse un'influenza, è utile conoscere su quale lato è bene disporre il sandwich per ottenere i risultati migliori.

È la prima analisi che viene fatta, e il motivo è che la conoscenza del lato su cui disporre la pelle più sottile è indispensabile per realizzare i pannelli.

Tali pannelli infatti sono tagliati a 45°, e quindi occorre conoscere la direzione in cui tagliarli.

Sono state realizzate due analisi, non inserendo i rivetti in quanto in questo caso non era di interesse vedere la loro influenza e con lo scopo di avere un'analisi più veloce, in quanto la presenza dei rivetti contribuisce ad allungarne i tempi.

Nella prima analisi, denominata *adesivo esterno 0.7* si è considerato che la pelle con spessore 0.7 mm fosse all'esterno nella crash box, mentre in quella denominata *adesivo esterno 0.8* si è considerato che all'esterno ci fosse la pelle di alluminio con spessore 0.8 mm.

Si è deciso di valutare i risultati in termini di decelerazioni medie, in quanto la specifica di progetto numero uno riguarda proprio tale caratteristica.

	Decelerazione media [ $m/s^2$ ]	Decelerazione media [g]
Adesivo esterno 0.7	185.56	18.92
Adesivo esterno 0.8	186.67	19.03

Tabella 6.1: Decelerazioni medie con spessore pelle esterna variabile

Un appunto: il termine "adesivo" sta a significare che gli angolari sono uniti alle pelli solamente tramite adesivo, senza l'utilizzo di rivetti.

Il valore di decelerazione media è stato espresso anche in termini di accelerazione di gravità, poiché la decelerazione ottenuta dal sandwich con cuore in honeycomb e quella indicata dal regolamento FIA sono entrambe espresse con tale unità di misura.

Per ottenerlo è stato sufficiente suddividere la decelerazione in  $m/s^2$  per il valore dell'accelerazione di gravità, ovvero  $9.81 m/s^2$ .

Dalla tabella 6.1 si nota come in realtà non ci sia una influenza considerevole nel fatto di avere la pelle più sottile internamente o esternamente.

Si nota però che il valore di decelerazione ottenuto dalla crash box con pelle più sottile all'esterno è inferiore.  
Essendo questo l'obiettivo, si procederà alla realizzazione dell'assorbitore seguendo questa configurazione.

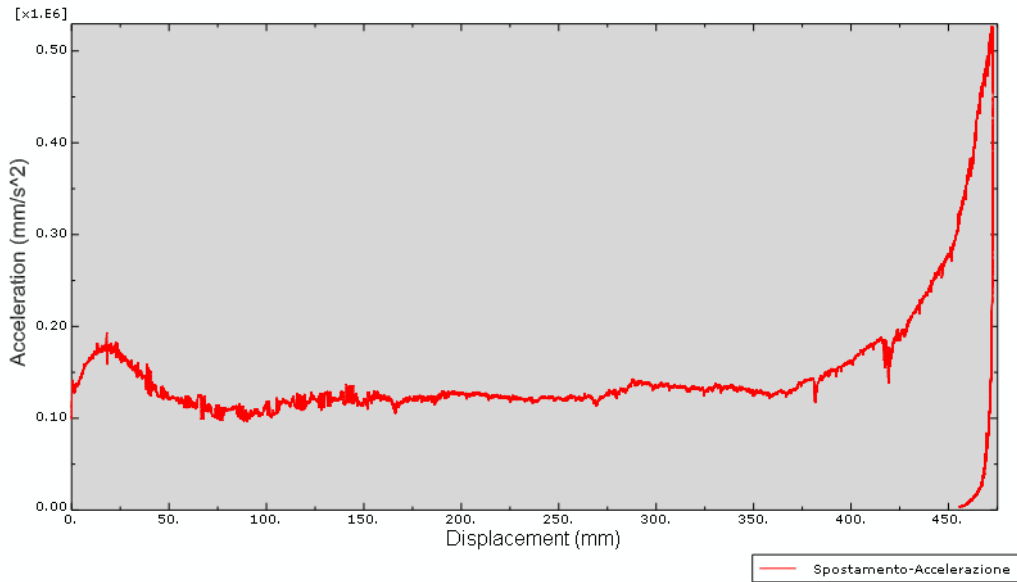


Figura 6.6: Grafico Spostamento-Accelerazione adesivo esterno 07

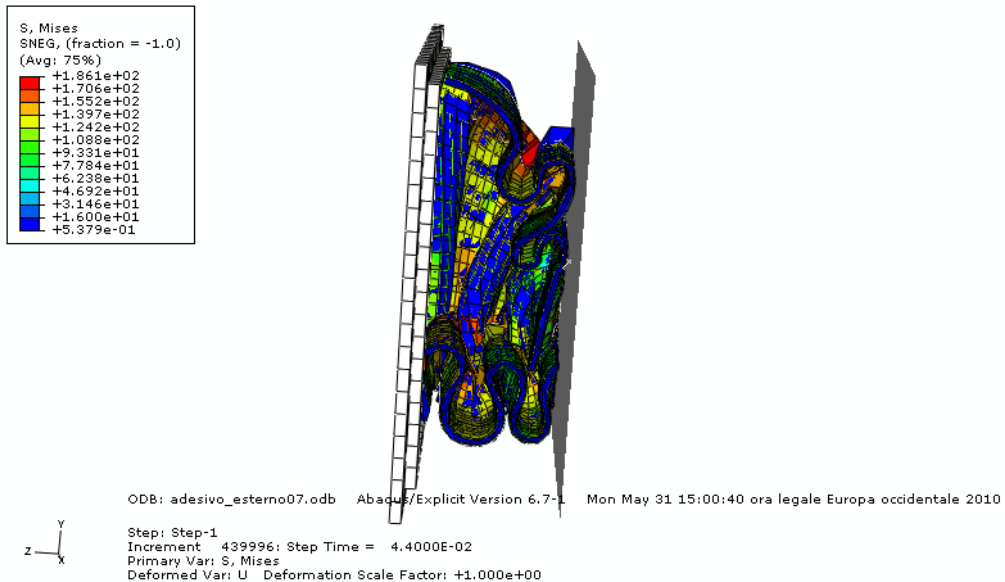


Figura 6.7: Fase di compressione della crash box non ancora completa; si nota la formazione di due pieghe di folding e la nascita di una terza piega appena al di sotto di esse

Anche la figura 6.7 è riferita al caso che si è ritenuto essere il migliore. Si ricorda che queste analisi sono state eseguite nella configurazione con la quale gli assorbitori vengono testati su slitta orizzontale. Una volta eseguite tutte le analisi e recepite tutte le informazioni che si ritengono essere utili sulla crash box, si procederà ad una analisi singola che avrà la configurazione esatta della prova eseguita su torre di caduta verticale. In sintesi si tratterà di modellare una crash box con le dimensioni scalate della metà (a parte lo spessore del sandwich), con una velocità di caduta di 8.25 m/s e un peso di 294 kg. Questo verrà fatto per avere un confronto realistico tra i risultati del modello e quelli sperimentali.

### 6.2.2 ANALISI DELL'INFLUENZA DELLA MODALITA' DI COSTRUZIONE

Un altro possibile utilizzo dell'analisi numerica è quello di comprendere se la modalità di costruzione del provino possa influenzare le sue prestazioni.

Si è operato nell'ottica di voler analizzare tutte le soluzioni possibili tra quelle pensate, in quanto si aveva la possibilità di creare un numero di modelli elevato a piacere a livello numerico.

E' noto che l'azienda Picchio costruisce la crash box unendo i pannelli con cuore in honeycomb tramite angolari di alluminio, chiudendo poi il tutto attraverso l'utilizzo di rivetti.

Quello che si è cercato di capire è se fosse possibile ottenere risultati migliori collegando i pannelli agli angolari solo tramite adesivo, senza utilizzare giunzioni come i rivetti.

A tal proposito sono stati creati due modelli distinti:

- Collegamento di angolari e pelli tramite adesivo
- Collegamento di angolari e pelli tramite adesivo e rivetti

Per realizzare i modelli si è considerato la configurazione determinata al paragrafo 6.2.1 come la migliore, ovvero quella che considera lo strato di pelle più sottile disposto all'esterno nel pannello sandwich.

	Decelerazione media [ $m/s^2$ ]	Decelerazione media [g]
Adesivo	185.56	18.92
Rivetti con adesivo	182.49	18.60

Tabella 6.2: Decelerazioni medie con modalità di collegamento diverse



Come si può notare dalla tabella 6.2, l'introduzione dei rivetti provoca un leggero miglioramento nelle prestazioni.

Ciò probabilmente è legato al fatto che la presenza del rivetto è letta dalla struttura come una discontinuità locale che provoca appunto un cedimento locale.

Ciò porta ad ottenere cedimenti localizzati che possono essere vantaggiosi per un assorbitore, in quanto consentono di ottenere un cedimento più graduale.

Non a caso, alcuni ricercatori(26) hanno studiato la possibilità di inserire delle lamelle oppure delle indentature (*trigger*), che consentano di far cedere la struttura nel modo desiderato.

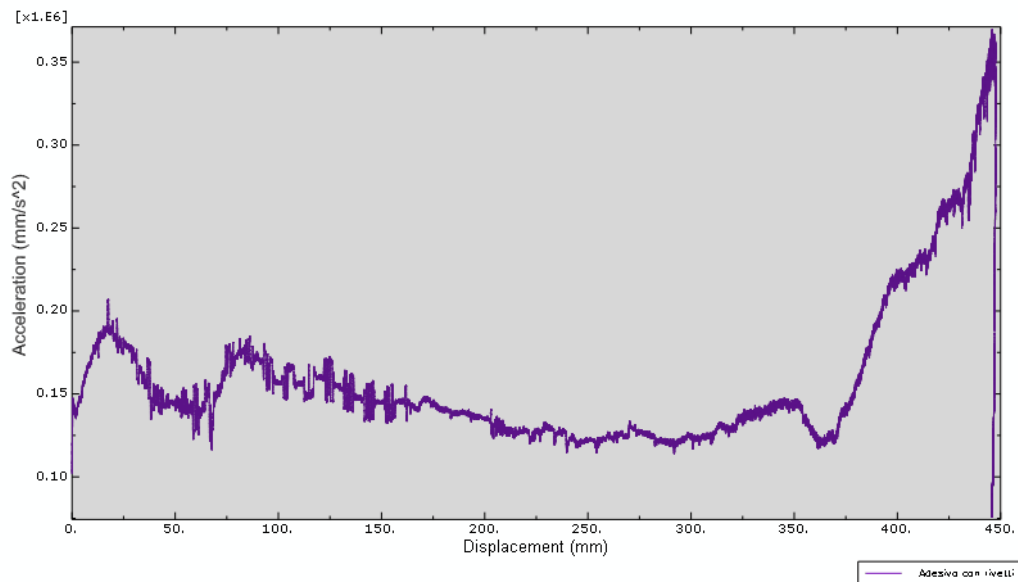
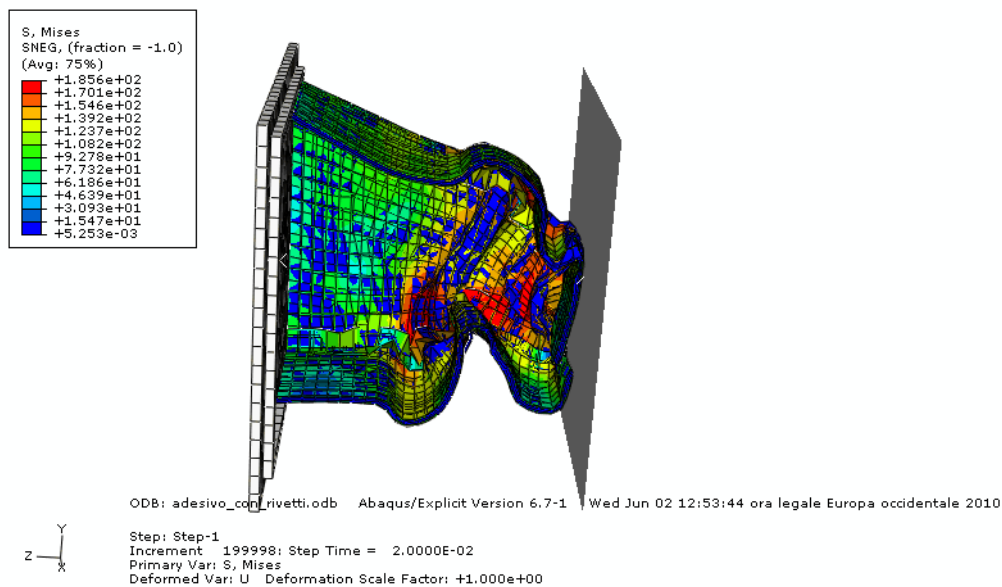


Figura 6.8: Grafico Spostamento-Accelerazione con utilizzo di adesivo e rivetti



**Figura 6.9: Cedimento durante la compressione della crash box con rivetti; si nota come stavolta il cedimento locale sia più impulsivo**

### 6.2.3 ANALISI DI ALTRE CONFIGURAZIONI DELL'ASSORBITORE

Il passo finale dell'analisi fem dell'assorbitore ideato è quello di studiare l'effetto che avrebbe l'introduzione di alcune modifiche nella realizzazione dello stesso.

E' assodato che l'utilizzo di sandwich realizzati con adesione metallurgica sia la soluzione più conveniente.

Come indicato al paragrafo precedente, tale scelta consente di rispettare le specifiche progettuali perciò è da considerarsi sufficiente.

Ciò non toglie che non si possa fare un gioco di fantasia per vedere che risultati si potrebbero ottenere cercando soluzioni alternative.

Nel caso di applicazioni differenti potrebbe infatti accadere che le prestazioni fornite dalla crash box studiata non siano accettabili, e quindi appare sensato tenere aperte soluzioni alternative da poter applicare in tempi brevi.

Inoltre, dalla letteratura è noto come l'utilizzo di assorbitori con riempimenti parziali (ovvero con parte del cuore vuoto) oppure con densità di schiuma variabile possa fornire risultati interessanti.

Le soluzioni che si intendono studiare sono:

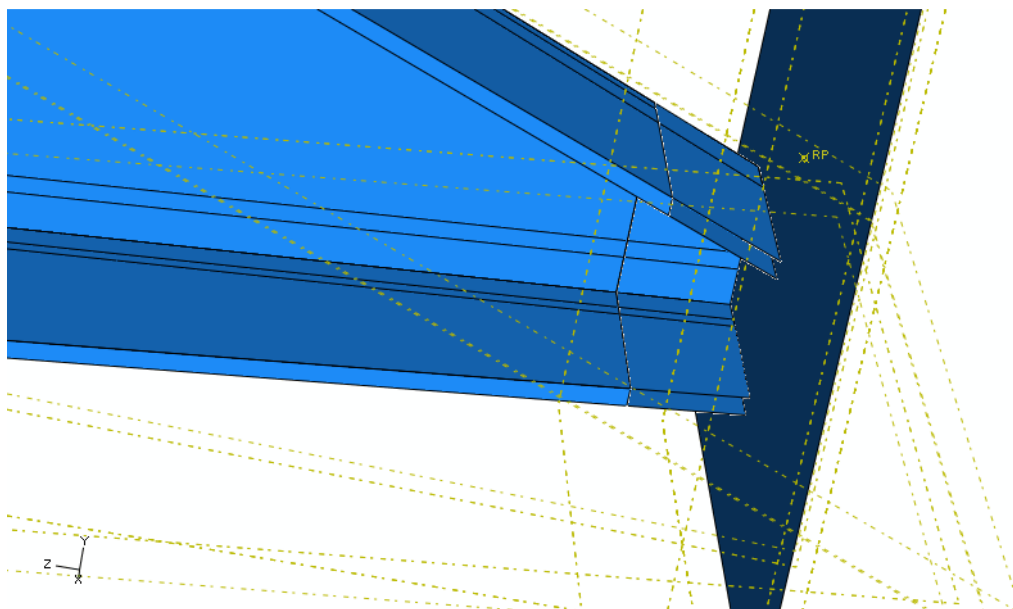
- Riempimento parziale con 50 mm di spazio vuoto
- Riempimento parziale con 100 mm di spazio vuoto
- Riempimento parziale con 150 mm di spazio vuoto

- Densità variabile con zona di densità minore di lunghezza 150 mm
- Densità variabile con zona di densità minore di lunghezza 270.5 mm
- Densità variabile con zona di densità minore di lunghezza 350 mm

La scelta di una lunghezza pari a 270.5 mm nel quinto campione non è casuale ma è esattamente la metà della lunghezza dell'assorbitore (circa 541 mm).

Per la parte di assorbitore di densità diversa, si è deciso di inserire una schiuma con le stesse proprietà di quella realmente utilizzata e una densità inferiore (pari a  $300 \text{ kg/m}^3$  in quanto solitamente è quella minima ottenibile per le schiume metalliche).

Lo spazio vuoto nel caso di riempimento parziale è da intendersi a partire dall'estremità che viene impattata (figura 6.10).



**Figura 6.10: Assorbitore con riempimento parziale 50 mm; si noti che a contatto con la massa impattante di destra la parte del cuore è cava**

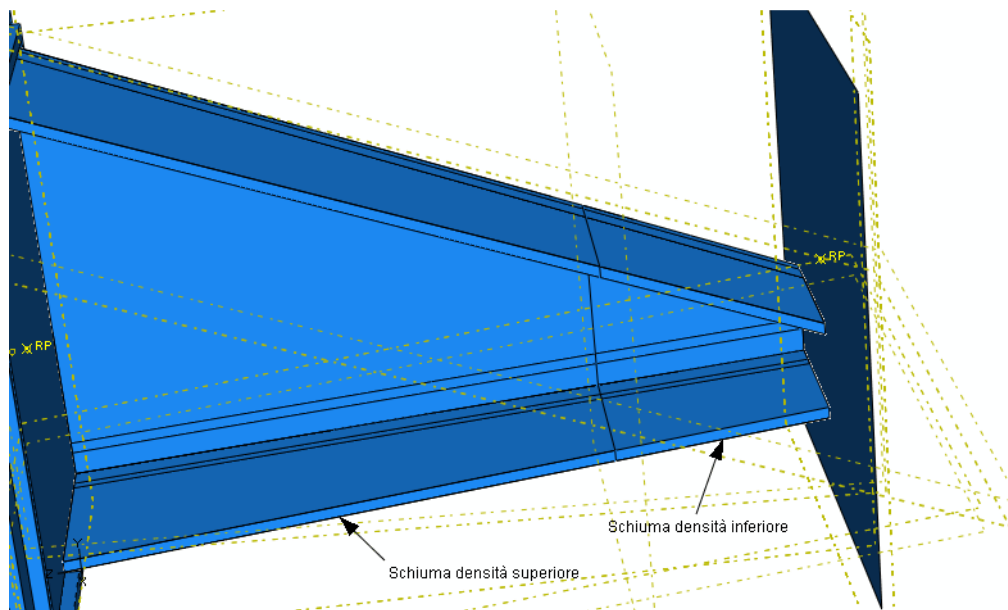


Figura 6.11: Assorbitore con densità variabile; si può notare la partizione trasversale che permette di assegnare due proprietà diverse

Le analisi con queste configurazioni particolari sono state svolte mantenendo la pelle più sottile all'esterno e usando come giunzione degli angolari solo l'adesivo, in quanto l'inserimento dei rivetti porta a tempi computazionali molto superiori.

Non è un problema in quanto l'unica cosa che si vuole testare è se il fatto di eseguire un riempimento parziale o di variare la densità può essere utile, e ciò è indipendente dal tipo di giunzione utilizzata.

Nelle tabelle seguenti vengono fornite delle sintesi dei risultati ottenuti:

	Decelerazione media [ $m/s^2$ ]	Decelerazione media [g]
Riempimento parziale 50 mm	193.45	19.72
Riempimento parziale 100 mm	198.74	20.26
Riempimento parziale 150 mm	201.30	20.52

Tabella 6.3: Decelerazioni medie con riempimenti parziali

Da ciò che si vede in tabella 6.3 si nota come non ci sia stato un miglioramento rispetto alla condizione di partenza (decelerazione media pari a 18.92 g).

Probabilmente il motivo è legato al fatto che già durante la compressione dell'assorbitore completamente riempito in schiuma si raggiungeva la fase di densificazione.

Per l'appunto, si nota come un assorbitore con cuore sempre più cavo porta a decelerazioni medie ancora più elevate.

Un vantaggio si potrebbe forse ottenere da un miglior rapporto energia assorbita/peso, ma in questo caso non è di interesse, perché lo scopo è di ridurre la decelerazione media durante l'urto.

La condizione ideale sarebbe stata quella di mantenersi nella zona di plateau, ma in questo caso ho potuto sorvolare su questo aspetto in quanto la crash box rispettava comunque le specifiche richieste.

Un vantaggio di tale soluzione, riscontrato anche in letteratura, è però la diminuzione del picco iniziale legato all'impatto, che consente di ridurre la decelerazione che subisce il pilota all'impatto.

Sfortunatamente, l'elevata densificazione vanifica questo vantaggio.

Si potrebbe però prendere in considerazione questo tipo di costruzione nel caso in cui la velocità e il carico di impatto fossero inferiori.

	Decelerazione media [m/s <sup>2</sup> ]	Decelerazione media [g]
Densità variabile 150 mm	185.85	18.945
Densità variabile 270.5 mm	185.81	18.941
Densità variabile 350 mm	183.75	18.73

Tabella 6.4: Decelerazioni medie con variazione di densità

Il caso con densità variabile dà risultati migliori rispetto a quello con riempimento parziale.

addirittura aumentando la quota parte del cuore con schiuma di densità inferiore si riescono ad ottenere risultati addirittura migliori di quelli con una schiuma di densità costante.

Utilizzando schiume di densità variabili si riesce a ridurre il picco di forza all'impatto, a patto di porre all'estremità che subisce l'impatto la schiuma con densità inferiore.

Essendo essa meno resistente, sarà anche meno "rigida" di fronte all'impatto.

Contemporaneamente, utilizzando anche porzioni di schiuma con densità inferiori, si riesce anche a ridurre il peso dell'assorbitore.

Ancora una volta, però, in questo caso l'interesse non era tanto quello di ridurre il peso, ma di rendere l'assorbimento d'urto ancora più graduale.

Il valore di decelerazione media si avvicina a quello ottenuto con riempimento totale, e in più comporta maggiori vantaggi, perciò sembrerebbe essere molto interessante.

In realtà, a scoraggiarne per il momento l'uso (almeno nel caso in esame), è il fatto che per realizzare un sandwich composto in questo modo, la procedura è più complessa.

La possibilità più semplice è quella di realizzare separatamente le due porzioni di schiuma in forno e poi collegarle tramite adesivo.

Sempre tramite adesivo si collegherebbero le pelli al cuore.

Come detto in precedenza, però, l'adesione metallurgica dà più garanzie del collegamento con adesivo, perciò ritengo che la soluzione scelta non sia da abbandonare a meno che non sia realmente necessario.

Ritengo che, se in grado di rispettare le specifiche richieste, sia giusto scegliere la soluzione più semplice e che dia maggiori garanzie.

Per tale motivo verranno utilizzati sandwich con adesione metallurgica e cuore totalmente in schiuma.

In ogni caso si è dimostrato come l'uso di assorbitori d'urto che prevedano parti non riempite in schiuma oppure di densità inferiore consenta di ridurre i picchi di forza all'impatto.

#### **6.2.4 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI**

Per mostrare quanto espresso al paragrafo precedente in modo ancora migliore è stato preparato un grafico riassuntivo.

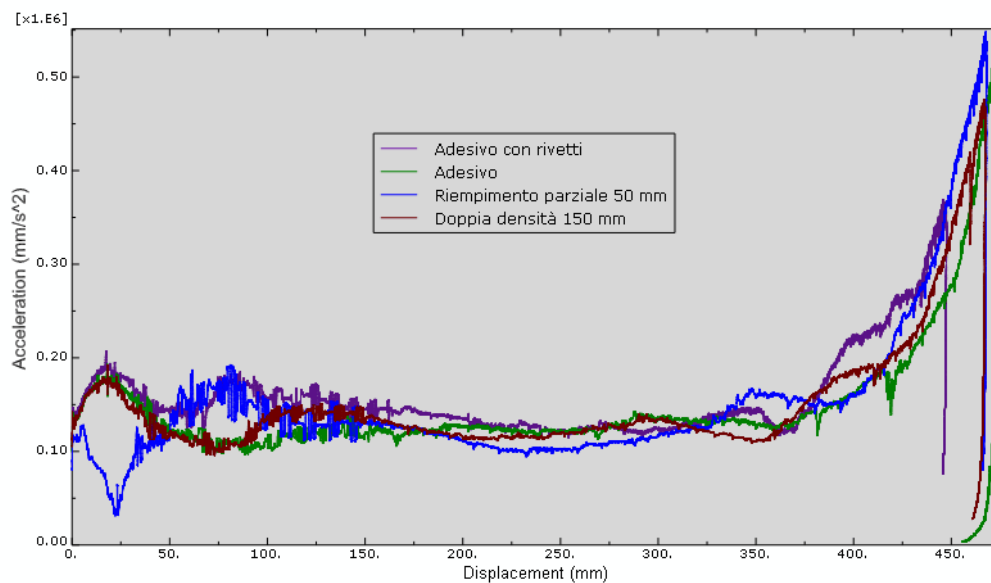


Figura 6.12: Confronto tra diverse configurazioni di crash box

Dalla figura 6.12 si può avere conferma di quanto detto in precedenza.

Il picco di decelerazione all'impatto è molto inferiore nel caso di riempimento parziale rispetto al caso di riempimento totale, mentre la densità variabile non porta vantaggi evidenti.

Nel caso in cui la massa impattante sia inferiore, l'utilizzo di un accorgimento quale il riempimento parziale può servire a ridurre anche la decelerazione media.

Dalla figura 6.13 si può invece comprendere il motivo per cui la riduzione della decelerazione iniziale non porta a una riduzione della decelerazione media.

Ciò è legato al fatto che l'assenza di schiuma in parte del cuore porta ad aumentare la lunghezza del tratto di densificazione, che ha un peso importante nel calcolo dell'accelerazione media.

Maggiore è il tratto cavo, maggiore sarà il tratto di densificazione, in quanto la struttura risulta più cedevole.

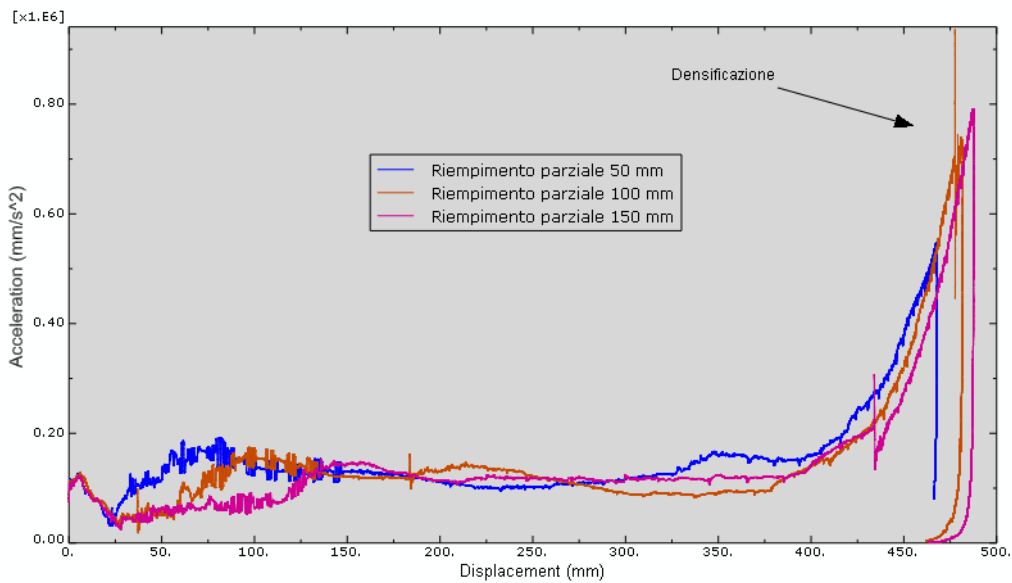


Figura 6.13: Confronto tra 50 mm,100 mm e 150 mm di cavità

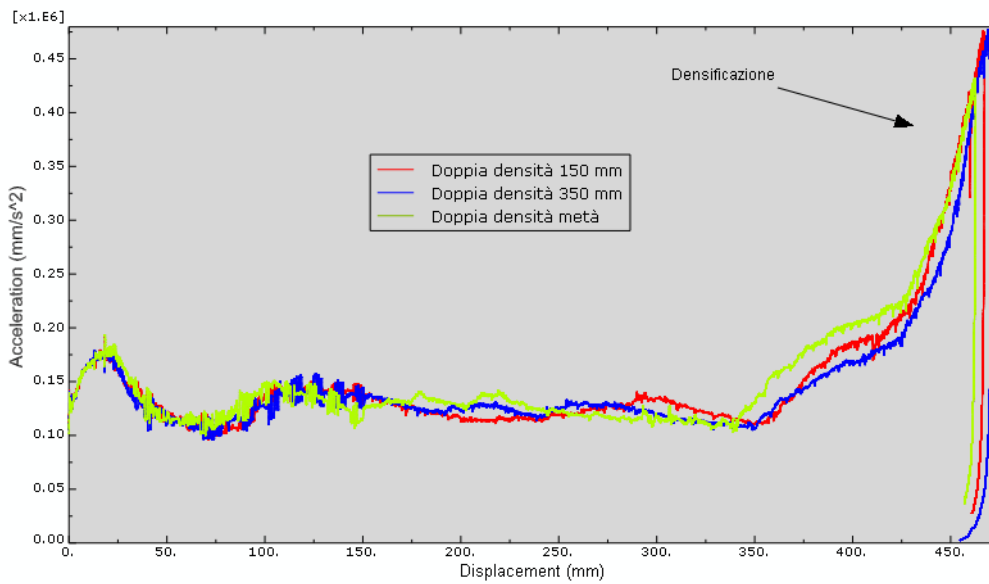


Figura 6.14: Confronto tra varie modalità di densità variabili

Dalla figura 6.14 si nota come anche in questo caso ci sia elevata densificazione; nonostante ciò, il caso più cedevole (quello con maggiore quota parte di schiuma con densità inferiore) è quello che dà i risultati migliori (migliori addirittura del caso con schiuma di densità costante).



Ciò è probabilmente legato al fatto che tale configurazione consenta di rendere il cedimento più graduale rispetto agli altri casi (in effetti lo spostamento, ovvero la lunghezza di compressione, è maggiore).

L'utilizzo di riempimento parziale, anche se in grado di dare un picco di forza/decelerazione inferiore, porta invece a maggior densificazione, perciò nel caso in esame non è vantaggioso.

Nel capitolo 3 si è parlato degli indici di prestazione.

Uno di questi era il SEA (acronimo di Specific Energy Absorbed), che consente di valutare la capacità di assorbire energia in relazione al proprio peso.

Tale indice non è stato utilizzato come criterio per valutare il rispetto delle specifiche di progetto, in quanto non presenta la decelerazione come parametro di confronto.

Può essere però utilizzato per trarre alcune conclusioni sui risultati ottenuti.

	Adesivo	Rivetti con adesivo
Forza media (kN)	112.52	110.04
Energia assorbita (kJ)	53.2	49.24
Massa (kg)	4.09	4.09
SEA (kJ/kg)	13	12.04

Tabella 6.5: Indice SEA per cuore con schiuma di densità costante

	Riempimento parziale 50 mm	Riempimento parziale 100 mm	Riempimento parziale 150 mm
Forza media (kN)	117.15	120.8	122.73
Energia assorbita (kJ)	54.82	58.28	59.86
Massa (kg)	3.9	3.71	3.52
SEA (kJ/kg)	14.06	15.71	17

Tabella 6.6: Indice SEA casi con parziale riempimento del cuore

	Densità variabile 150 mm	Densità variabile 270.5 mm	Densità variabile 350 mm
Forza media (kN)	113.98	112.69	112.64
Energia assorbita (kJ)	53.26	52.14	53.07
Massa (kg)	3.86	3.67	3.05
SEA (kJ/kg)	13.8	14.21	14.95

Tabella 6.7: Indice SEA casi con densità variabile

Da queste tabelle si vede come la soluzione che presentava i risultati migliori dal punto di vista della decelerazione media, è quella che ha l'indice SEA più basso.

Ciò è legato al fatto che essa riesce a mantenere una forza media durante l'impatto inferiore agli altri casi, e di conseguenza consente di avere una decelerazione media inferiore.

L'energia assorbita, infatti è l'area sottesa alla curva forza-spostamento che si registra durante l'impatto.

Un modo analitico per ricavarla è il seguente:

$$E_a = \int_0^L F * s ds \quad (6.1)$$

Dove  $s$  è lo spostamento che subisce la crash box e  $L$  la compressione totale.

Per il calcolo della massa ci si è invece basati sui valori di densità della pelle e del cuore e sul calcolo del volume di competenza, considerando che si tratti nel complesso di una forma tronco piramidale e che perciò il volume è determinabile nel modo seguente:

$$V = \frac{h}{3}(A + a + \sqrt{A * a}) \quad (6.2)$$

Dove  $A$  è l'area maggiore,  $a$  quella minore e  $h$  l'altezza del tronco di piramide.

Nel calcolare la massa si è trascurato il peso di adesivo, angolari e rivetti, in quanto presenti in tutte le configurazioni, compresa quella realizzata tramite pannelli in honeycomb.

A tal proposito, è stato calcolato allo stesso modo il peso di questa soluzione, che è risultato essere pari a 3.46 kg, ovvero non distante da quello ottenuto tramite schiuma metallica.

Il valore dell'indice SEA, in questo caso, non dice moltissimo sulle reali capacità di un assorbitore o dell'altro di assorbire più o meno energia.

Un valore elevato di indice SEA, per alcuni di essi, è dovuto solamente al raggiungimento di una lunga fase di densificazione, che è un fenomeno negativo.

Si può dire che in questo caso il fatto che raggiungano la densificazione fa riflettere sul loro utilizzo, che è probabilmente più indicato nel caso di configurazioni di impatto meno gravose.

Molto più indicativi sono stati i risultati relativi alla presenza o meno di picchi di forza iniziali; si nota come soprattutto l'utilizzo di un riempimento parziale porti a ridurli e a garantire così un beneficio ulteriore.

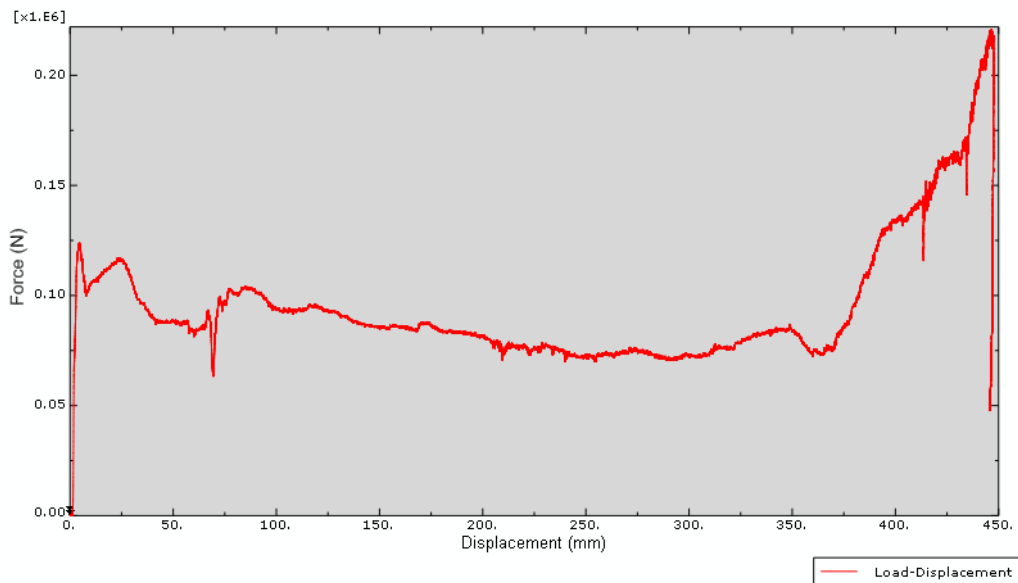


Figura 6.15: Grafico Load-Displacement della soluzione che prevede unione degli angolari con adesivo e rivetti

Per la comprensione dei risultati ottenuti, è utile analizzare anche un secondo indice prestazionale, citato anch'esso nel capitolo 3.

Si tratta della stroke efficiency, ovvero del rapporto tra la compressione subita dall'assorbitore nell'impatto e la sua lunghezza iniziale.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Stroke efficiency	0.874	0.827	0.865	0.890	0.901	0.864	0.855	0.871

Tabella 6.8: Indice stroke efficiency per le diverse configurazioni

Legenda tabella 6.8:

- A = Adesivo
- B = Adesivo con rivetti
- C = Riempimento parziale 50 mm
- D = Riempimento parziale 100 mm
- E = Riempimento parziale 150 mm
- F = Densità variabile 150 mm
- G = Densità variabile 270.5 mm
- H = Densità variabile 350 mm

Come si può notare il valore più basso è quello che prevede l'utilizzo dei rivetti assieme all'adesivo per unire le pelli agli angolari.

Solitamente un buon assorbitore dovrebbe avere questo indice del valore più alto possibile, perché significherebbe che è stata sfruttata quasi tutta la lunghezza disponibile e che quindi la deformazione è stata distribuita quanto più possibile nel tempo.

In realtà, nel caso della tesi, avere un valore troppo elevato di questo indice non è soddisfacente.

I motivi sono due: 1) una compressione troppo "lunga" porta ad avere una zona di densificazione più lunga e quindi decelerazioni medie più elevate e 2) per la sicurezza del pilota è necessario che restino liberi almeno 7-8 cm.

Facendo tale considerazione si può dire che l'assorbitore non dovrebbe comprimersi per una lunghezza maggiore dell'85% della propria lunghezza, e si può vedere come l'unico che rispetti tale vincolo sia proprio quello che prevede l'utilizzo di rivetti.

### 6.3 SOLUZIONE CON GEOMETRIA DIFFERENTE

Come ulteriore spunto progettuale, si è pensato di studiare qualche soluzione alternativa a quella di forma piramidale.

Si è pensato di indagare a livello esclusivamente numerico, in quanto le richieste dell'azienda partner erano di tipo differente.

L'idea di base era quella di cercare una soluzione che consentisse di sfruttare al meglio le proprietà della schiuma metallica e che permettesse eventualmente di inserire una quantità di schiuma variabile a seconda dell'applicazione prevista.

Inizialmente, ero rimasto favorevolmente colpito dall'effetto che aveva l'interazione tra due tubi metallici concentrici relativamente all'assorbimento di energia.

Per tale motivo sono state svolte alcune analisi fem per valutare se l'inserimento di schiuma metallica tra le due tubazioni potesse portare a dei risultati interessanti.

In effetti è emerso che l'interazione tra i due tubi e la schiuma aumenta la capacità di assorbire energia, ed essa è tanto maggiore quanto maggiore è lo spazio esistente tra i due tubi cilindrici.

Nel caso in esame, però, era necessario tener conto del fatto che l'assorbitore avrebbe dovuto essere particolarmente snello, in quanto la lunghezza doveva essere elevata (come si è visto pari a 541 mm) e il diametro ridotto, per riuscire a rispettare gli ingombri disponibili sulla vettura.

Ciò portava ad instabilità se soggetto a carico frontale.

Era necessario quindi utilizzare un numero superiore di elementi nell'insieme, che consentissero di avere parti di lunghezza inferiore e quindi meno snelle.

Per questo motivo si era pensato di introdurre tubi di lunghezza variabile e diametro crescente a partire dall'estremità impattata in modo da avere strutture meno snelle.

Da analisi numeriche è però emerso che nemmeno questa soluzione fosse corretta, in quanto i cilindri tendevano a compenetrare quelli sottostanti a causa della presenza della schiuma, meno rigida dell'alluminio.

Per questo motivo si avevano dei collassi indesiderati.

Per risolvere entrambi i problemi citati e rispettare gli obiettivi di progetto è stata studiata allora una soluzione differente.

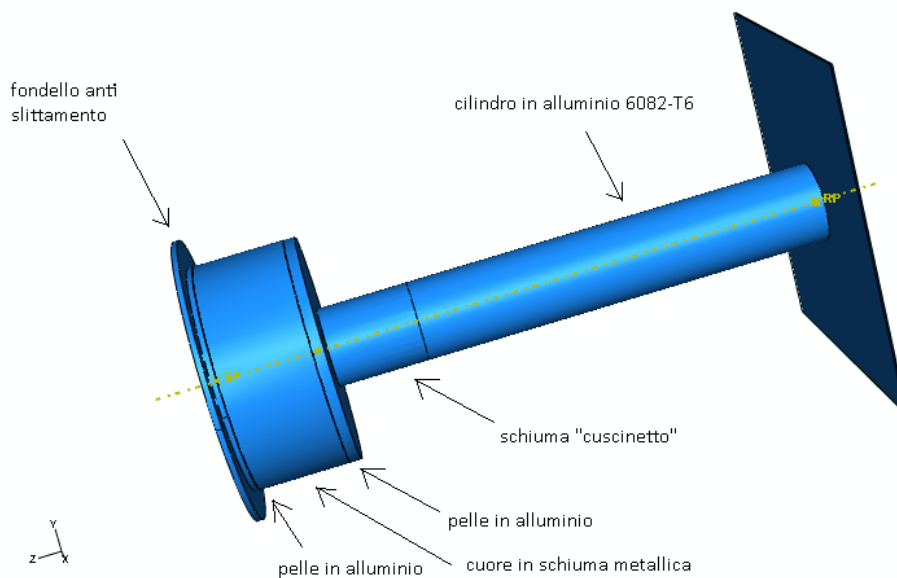


Figura 6.16: Soluzione con geometria differente

Tale soluzione è costituita da diverse parti:

- Un sandwich di fondo costituito da pelli in alluminio e cuore in schiuma metallica
- Un cilindro di alluminio
- Un cilindro di schiuma metallica

Il sandwich di fondo consente di ridurre la lunghezza del tratto di diametro “piccolo” dell’assorbitore quel tanto che basta per renderlo sufficientemente tozzo.

Inoltre, non a caso, l’altezza del sandwich è pari a 100 mm.

Questo valore rappresenta, secondo regolamento FIA, la distanza minima che dopo l’impatto deve esserci rispetto alla pedaliera.

Si può dire quindi che il sandwich rappresenta il limite oltre il quale l’assorbitore non deve comprimersi durante la prova di omologazione, ed è una ulteriore sicurezza per il pilota nel caso tale evento dovesse verificarsi in circuito.

Tale distanza può essere variata aumentando o riducendo lo spessore del cuore in funzione dell’applicazione di interesse.

La schiuma “cuscinetto” ha la funzione di aumentare la capacità di assorbimento di urto della crash box, che non sarebbe sufficiente se si utilizzasse solamente il cilindro di alluminio.

In base a quanto detto prima, sono state fatte analisi anche riguardanti l’utilizzo di due tubi cilindrici con un cuore in schiuma in sostituzione del cilindro in alluminio e della schiuma cuscinetto, ma i risultati non sono stati incoraggianti.

La schiuma cuscinetto consente di assorbire la quantità di energia desiderata, variandone la lunghezza a seconda del caso.

Bisogna pensare che nel campo dell’assorbimento di energia, non è sufficiente che un materiale non collassi, ma deve anche essere in grado di cedere nel modo più graduale possibile.

Una struttura troppo rigida, che si comprime poco sotto l’urto, sarebbe più dannosa che utile perché porterebbe a decelerazioni fortissime che potrebbero rivelarsi letali.

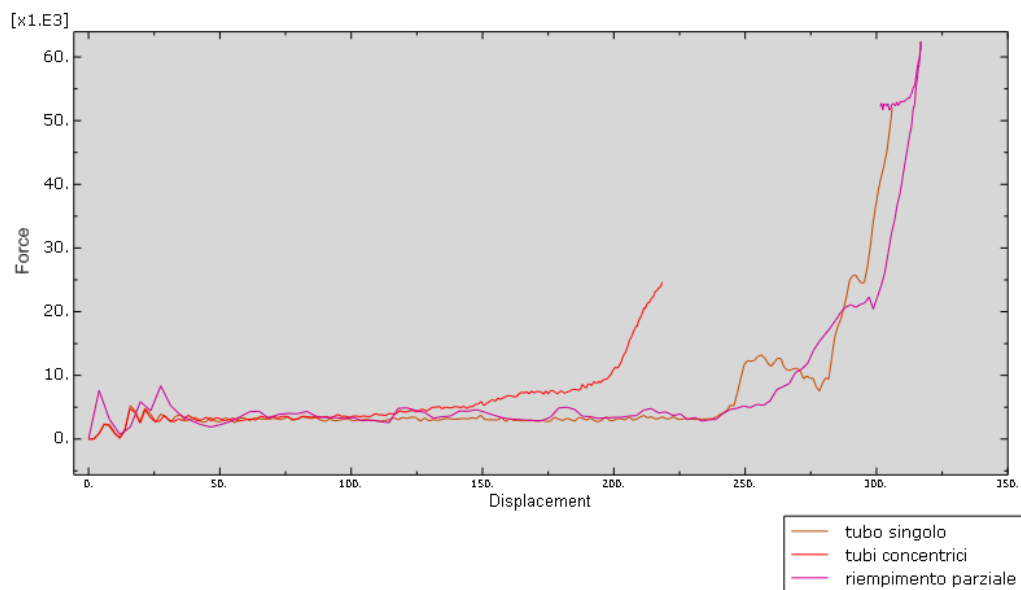


Figura 6.17: Comportamento di varie configurazioni dell'assorbitore testate

Come si vede dalla figura 6.17, i risultati migliori si ottengono nel caso in cui ci si affida al cuscinetto di fondo (riempimento parziale), mentre si nota bene che lo spostamento causato dall'urto nel caso in cui si utilizzino tubi concentrici è troppo ridotto.

Ciò è negativo perché uno spostamento ridotto comporta la necessità di assorbire la stessa energia ma in un tempo inferiore, e ciò significa certamente decelerazioni maggiori.

Tale soluzione però deve essere ancora migliorata, in quanto da analisi effettuate su impatti di tipo inclinato si è verificato come la reazione dell'assorbitore sia quella di subire una flessione netta, assolutamente da evitare.

Al contrario la forma tronco-piramidale consente di reagire meglio ad impatti di tipo inclinato e per tale motivo al momento è da preferire.

Non è da escludere che però una soluzione di questo genere in futuro non possa essere applicata comunque, imponendo alcuni irrigidimenti per evitare collassi laterali, o che comunque non possa trovare altri tipi di applicazioni.

Al momento comunque, i risultati nel caso di urto perfettamente frontale sono interessanti, in quanto la decelerazione media era pari a circa 14 g.

Il peso di questa soluzione era stimato intorno a 3.48 kg, perciò in linea con la soluzione a tronco di piramide.





---

## 7 REALIZZAZIONE DELLA CRASH BOX

Dopo aver eseguito le analisi fem è stato possibile realizzare materialmente l'assorbitore d'urto.

Si è scelto di realizzare due prototipi, uno utilizzando pannelli con cuore in schiuma metallica, ed uno utilizzando pannelli con cuore in honeycomb.

Questo per avere un confronto sia tra modello numerico e analisi sperimentale, che per confrontare le due soluzioni testate.

La crash box è costituita da quattro pannelli con dimensioni e inclinazioni al montaggio differenti, che vengono tagliati nell'angolo a 45° in modo da realizzare un incastro.

Tali pannelli vengono poi chiusi da una sorta di "tappo", anch'esso realizzato dello stesso materiale.

La prima mossa da eseguire è stata quindi quella di tagliare i pannelli singoli a partire da lastre di sandwich, e ciò è stato possibile tramite l'uso della tecnologia AWJ, utilizzando la stessa macchina già usata per realizzare i provini per le prove quasi-statiche e dinamiche.

Per fissare le piastre sulla griglia della macchina si è fatto uso di apposite staffe. Inizialmente si è provveduto a realizzare i pannelli con cuore in schiuma metallica AlMgSi.

Tramite due piastre è stato possibile realizzare tutti i pannelli con riempimento in schiuma sfruttando la possibilità di assegnare alla macchina utensile un percorso predefinito che prevedesse tale possibilità.

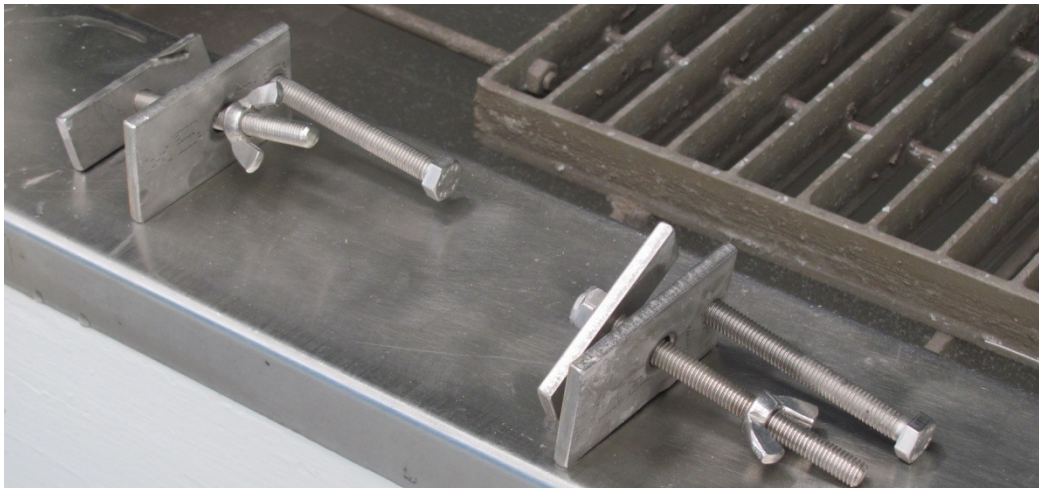


Figura 7.1: Staffe di fissaggio



Figura 7.2: Pannelli sandwich con cuore in schiuma AlMgSi tagliati tramite AWJ

Una volta realizzati i pannelli, occorre smussarne i vertici in modo da favorirne l'incastro.

Per fare ciò è stata realizzata una attrezzatura apposita che consentisse di inclinare il pannello della gradazione desiderata.

L'asportazione è stata eseguita tramite l'operazione di fresatura.



Figura 7.3: Attrezzatura per realizzare smussi

Successivamente, è stato necessario smussare sia la superficie a contatto con la massa impattante che quella a contatto con il telaio della vettura, per ogni pannello.

Questo perché il taglio AWJ ha permesso di ottenere pannelli con spessori a 90° rispetto ai lati, ma, essendo ogni pannello montato con una leggera inclinazione, tali superfici non risultavano essere piane.

Allora è stato necessario lavorarle secondo un angolo che permettesse di riottenere superfici piane; ciò è stato possibile predisponendo un *divisore* sull'attrezzatura, in modo da inclinare i pannelli dell'angolo desiderato.



Figura 7.4: Divisore inserito nell'attrezzatura

Successivamente, si è provveduto a tagliare le superfici dei pannelli a contatto con la massa impattante, smussandole a 45°.

In questo modo si è riuscito a permettere l'alloggiamento del tappo, anch'esso con superfici smussate a 45°, per favorire un incastro.

Esso è stato realizzato con le stesse modalità dei pannelli suddetti.

Le stesse operazioni sono state ripetute per i pannelli sandwich con cuore in honeycomb e pelli in Al6082; una sintesi di esse è fornita nelle figure 7.6-10.



Figura 7.5: Tappo di chiusura con cuore in schiuma metallica

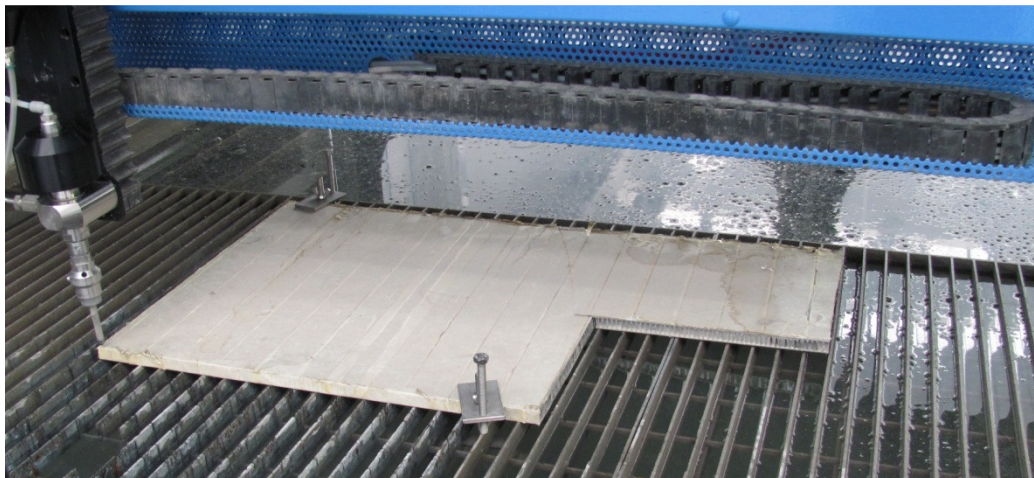


Figura 7.6: Fissaggio della lastra in honeycomb sulla griglia della macchina AWJ tramite staffe

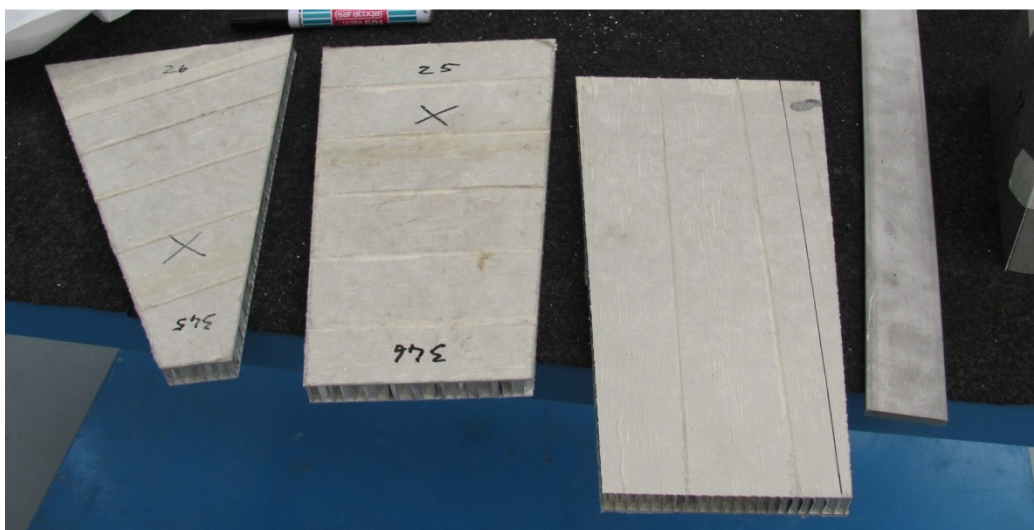


Figura 7.7: Alcuni dei pannelli realizzati tramite AWJ

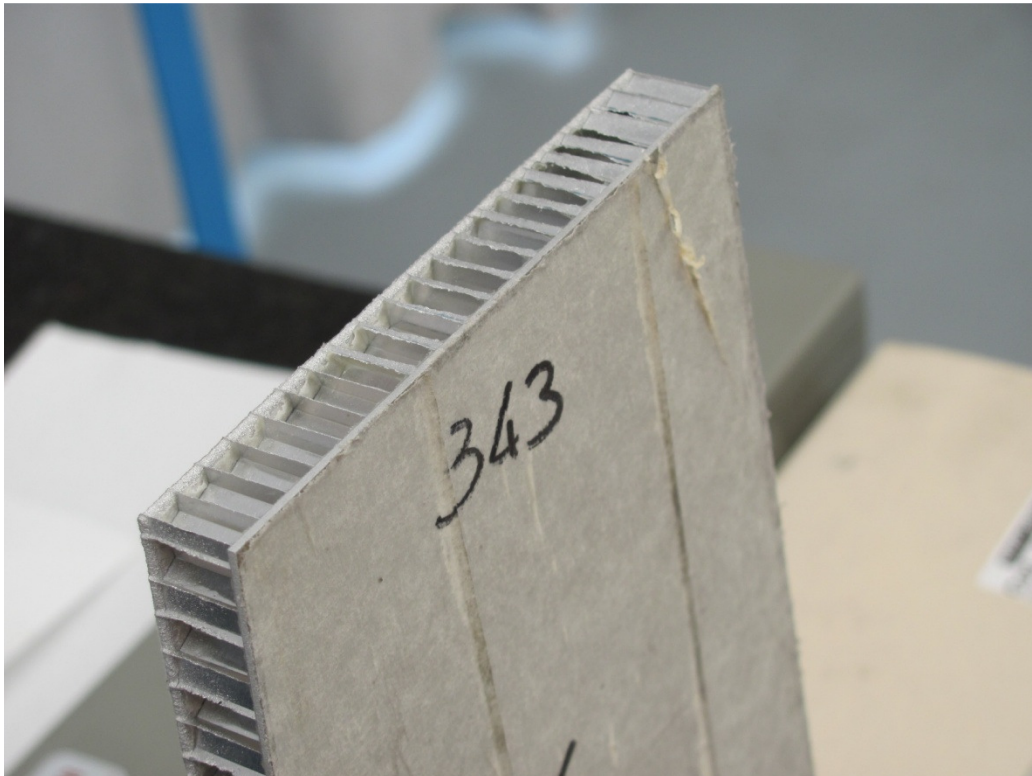


Figura 7.8: Particolare di uno dei pannelli realizzati; si noti la tipica struttura a nido d'ape del cuore

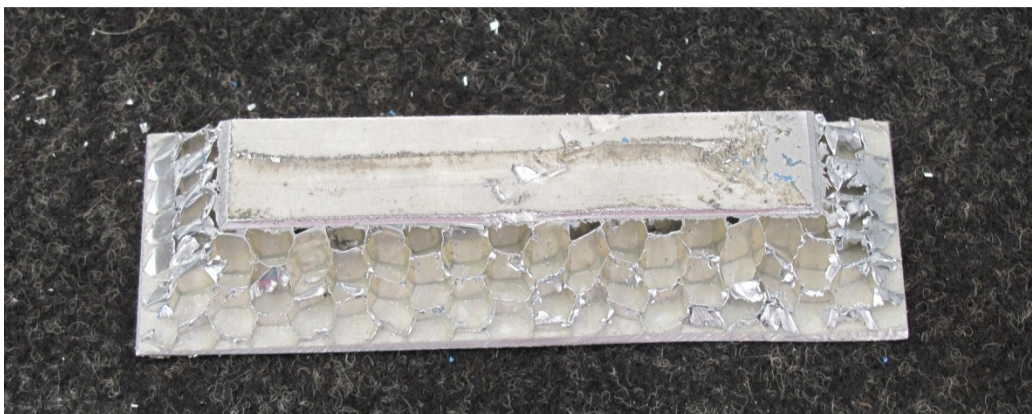


Figura 7.9: Tappo di chiusura

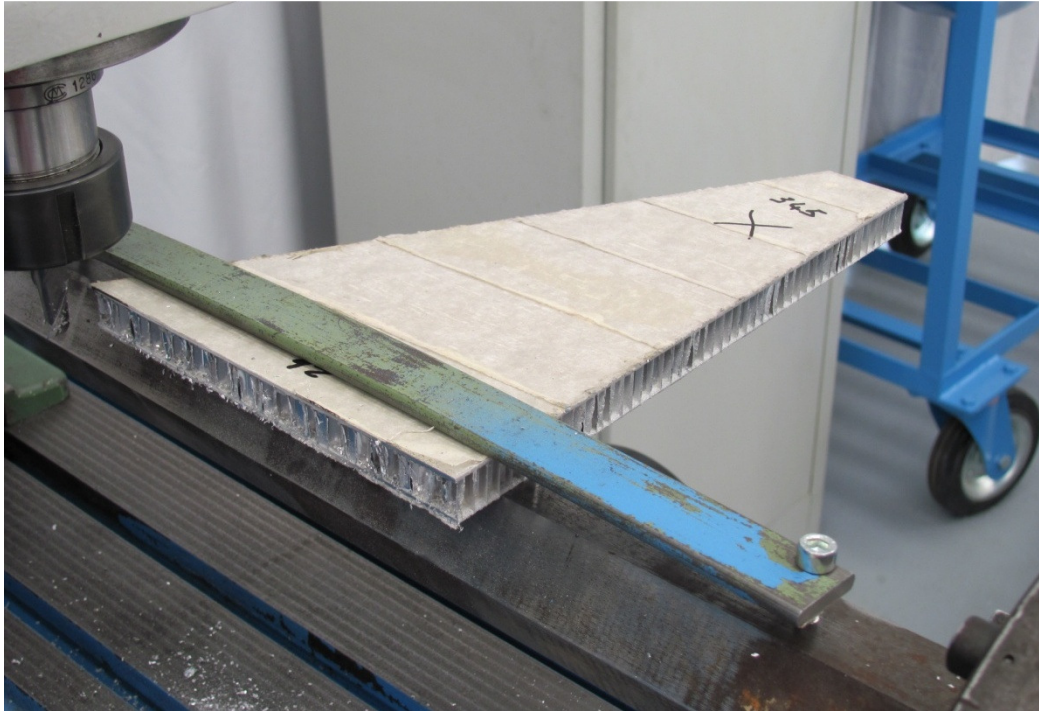


Figura 7.10: Montaggio sull'attrezzatura per realizzare gli smussi

Ecco come si presentano le due crash box dopo la realizzazione dei pannelli; viene fornito un confronto sia "con tappo" che "senza tappo".

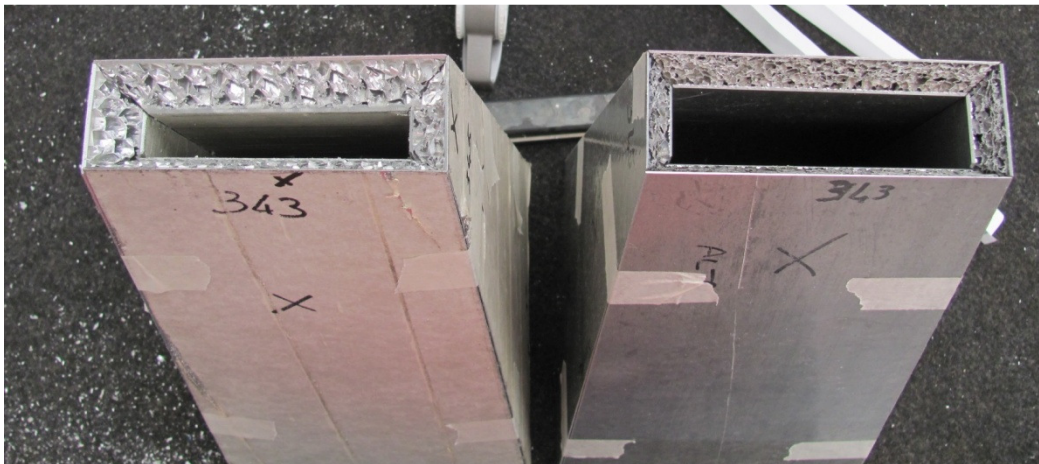


Figura 7.11: Confronto delle crash box senza tappo; sono state unite solamente tramite nastro adesivo per dare un'idea del risultato finale, ma in realtà non sono ancora complete

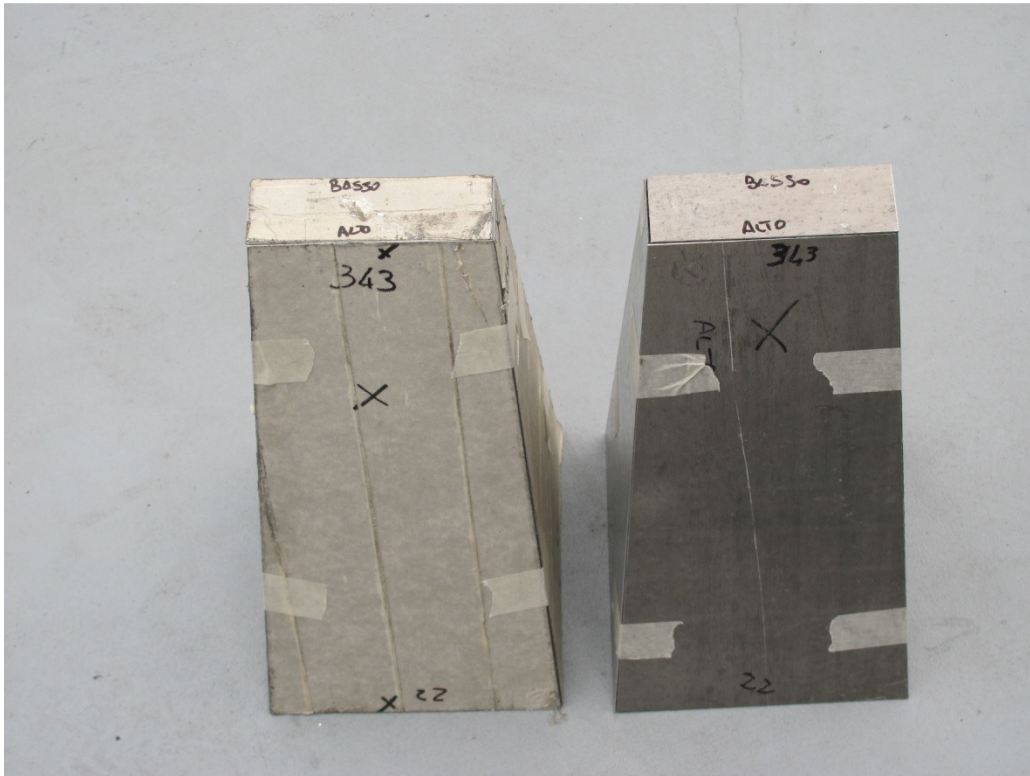


Figura 7.12: Confronto tra le due configurazioni a costruzione non ancora terminata

Successivamente, a partire da fogli di lamiera Al 6082 spessore 1.2 mm, sono state realizzate delle strisce di larghezza pari a 40 mm, che serviranno alla realizzazione degli angolari.

E' stata stimata, in base al numero degli angolari necessari e alla loro singola dimensione, la lunghezza complessiva di lamiera necessaria e, tramite il taglio WaterJet con abrasivo è stato possibile ottenerla.

Nella configurazione originale (scala 1:1) gli angolari erano di lato 25 mm, ma in questo caso, essendo stato realizzato in scala il crash box (1:2), è stato necessario ridurre anche il lato dell'angolare, portato a 20 mm.

In caso contrario ci sarebbero stati problemi di ingombro.

Dopo il taglio delle strisce di lamiera si è provveduto a limarne gli spigoli, in quanto un foglio così sottile è tagliente come una lama.



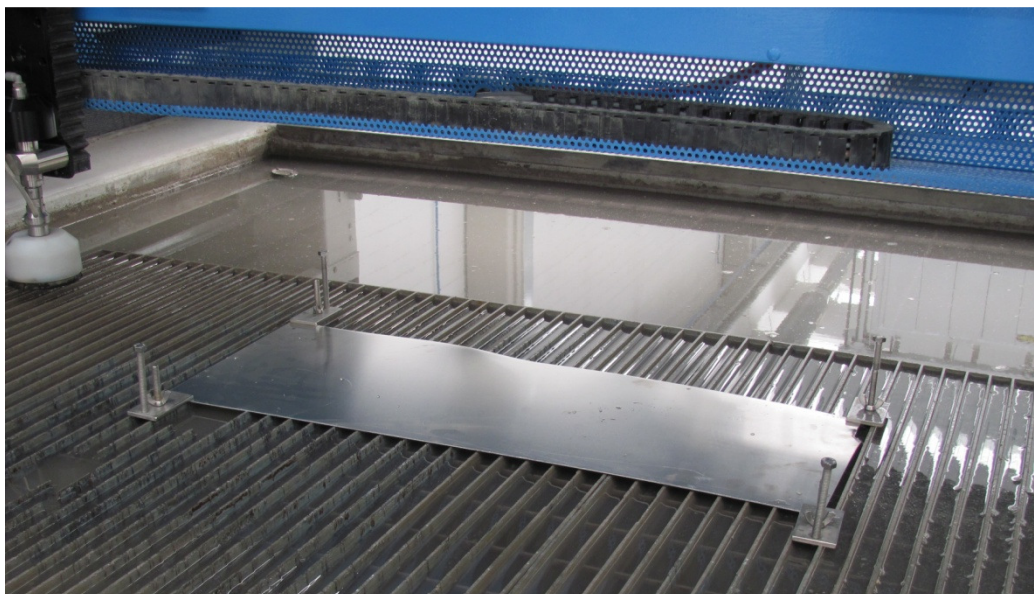


Figura 7.13: Preparazione della lamiera per taglio AWJ



Figura 7.14: Alcune delle strisce di lamiera ottenute dopo taglio AWJ

Il passo successivo è stato quello di piegare le lamiere a  $90^\circ$  rispetto alla metà della loro larghezza, in modo da ottenere degli angolari di lato 20 mm.

Per ottenere ciò si è fatto ausilio di una piegatrice manuale e si è individuata una lunghezza massima delle lamiere da tagliare (circa 350 mm), funzione della forza applicabile dalla macchina.



Figura 7.15: Piegatrice manuale

La procedura utilizzata si può descrivere brevemente.

Il primo passaggio è stato quello di attrezzare la macchina; sono state scelte delle piastre adatte a piegare questo tipo di lamiera ed è stata impostata la corsa della macchina.

Il secondo passo è stato quello di definire correttamente il posizionamento della lamiera sulla macchina, in modo da assicurarsi che la linea di piega fosse esattamente al centro della striscia (fig. 7.16).

Per fare ciò ci si è avvalsi di un fermo posizionato oltre la piastra di piegatura.

A questo punto è stata eseguita una prima prova, dalla quale è emerso che la lunghezza della striscia di lamiera era eccessiva per la forza premente della macchina.

Allora, attraverso una lama predisposta sulla piegatrice, sono state ricavate strisce sufficientemente corte, purché permettessero di realizzare l'angolare di lunghezza maggiore tra quelli da inserire nella crash box.

Tarata la macchina, sono state eseguite tutte le piegature posizionando correttamente le strisce sul macchinario.

Infine, di volta in volta, si è provveduto a verificare la correttezza degli angolari ottenuti confrontandoli con l'assorbitore assemblato in modo provvisorio.



Figura 7.16: Misura della posizione del ferma-lamiera



Figura 7.17: Piegatura delle strisce di lamiera

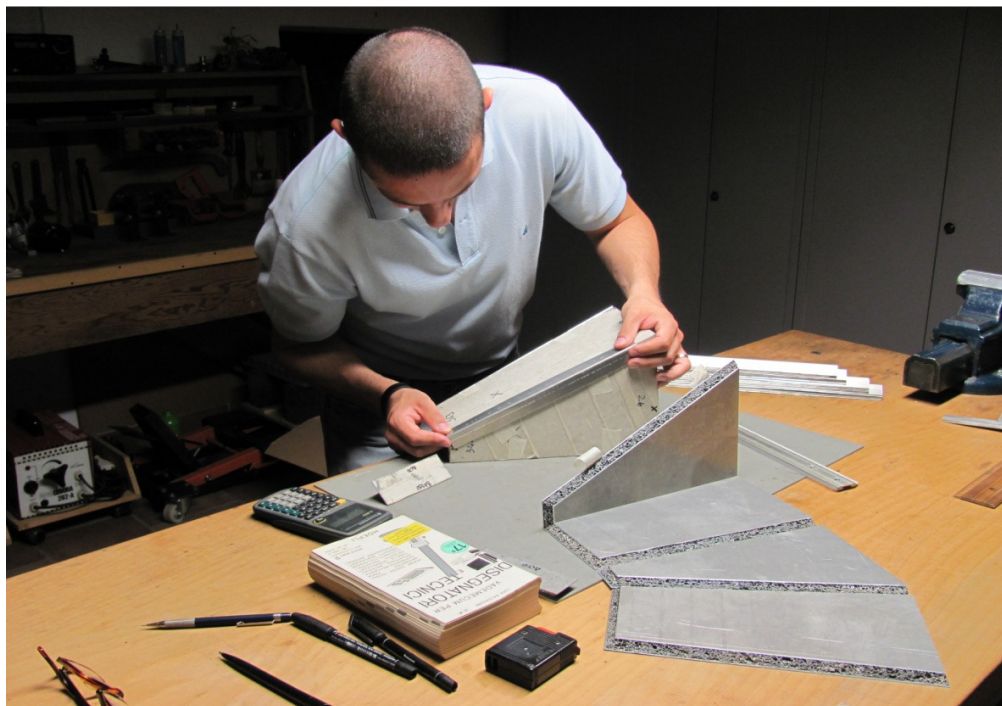


Figura 7.18: Confronto degli angolari realizzati con la crash box provvisoria

A questo punto si ha a disposizione tutto il materiale per realizzare la crash box.

In base ai disegni tecnici del crash box attualmente utilizzato dall'azienda Picchio ci si è fatti un'idea di dove erano posizionati angolari e rivetti.

A questo punto è stato studiato un nuovo posizionamento di angolari e rivetti.

Una difficoltà aggiuntiva è legata al fatto che si sta realizzando un prototipo in scala, perciò è necessario variare il numero di rivetti e la loro dimensione.

Si è deciso di utilizzare rivetti di diametro 3 mm e lunghezza 7 mm.

Dopo aver deciso a che distanza porre i rivetti, si è proceduto a segnare i pannelli con un apposito truschino per ottenere un riferimento.

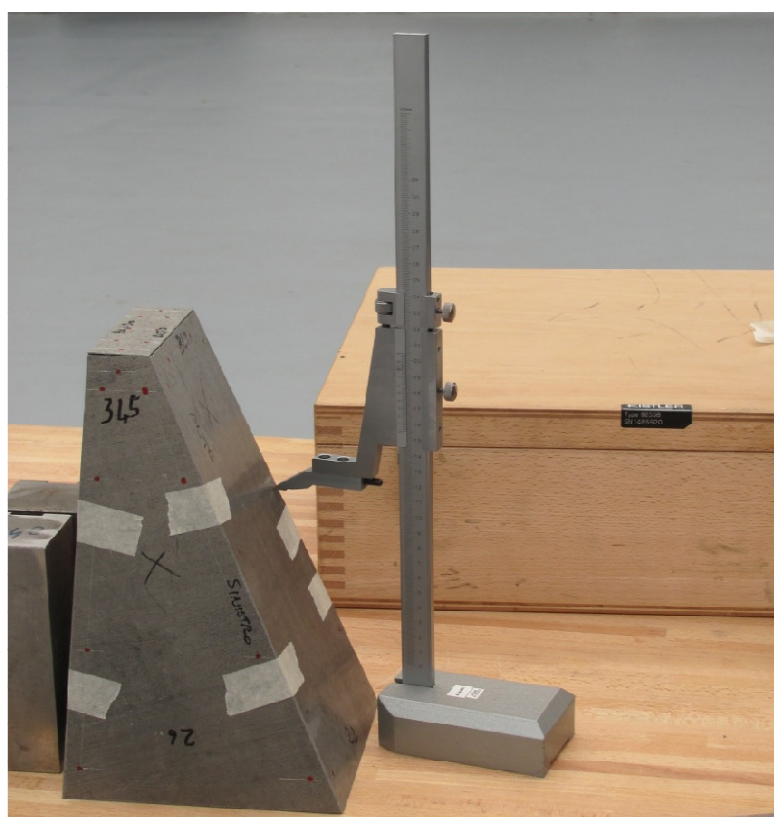


Figura 7.19: Realizzazione riferimenti con truschino

Il passo successivo è stato quello di tagliare gli angolari della lunghezza desiderata, e poi aggiustarne la forma in modo da favorirne l'incastro sul prototipo.

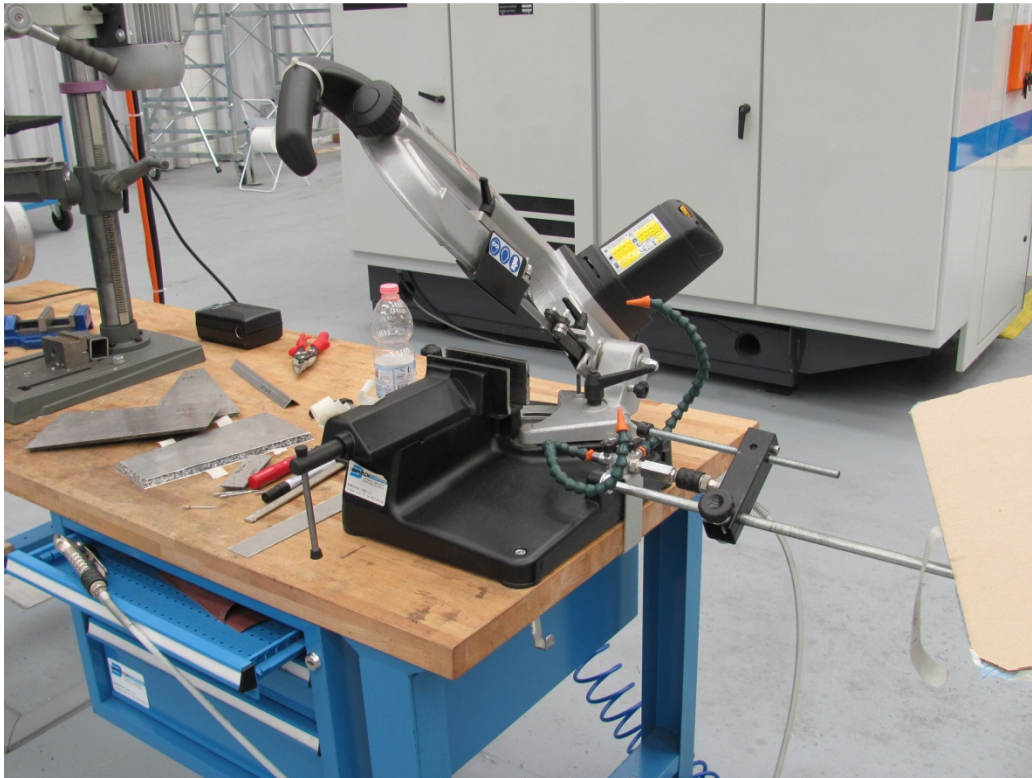


Figura 7.20: Sega elettrica per il taglio degli angolari

Dopo aver fatto ciò, angolari e pannelli sono stati forati tramite un trapano a colonna, per realizzare i fori attraverso i quali i rivetti verranno inseriti durante il montaggio.

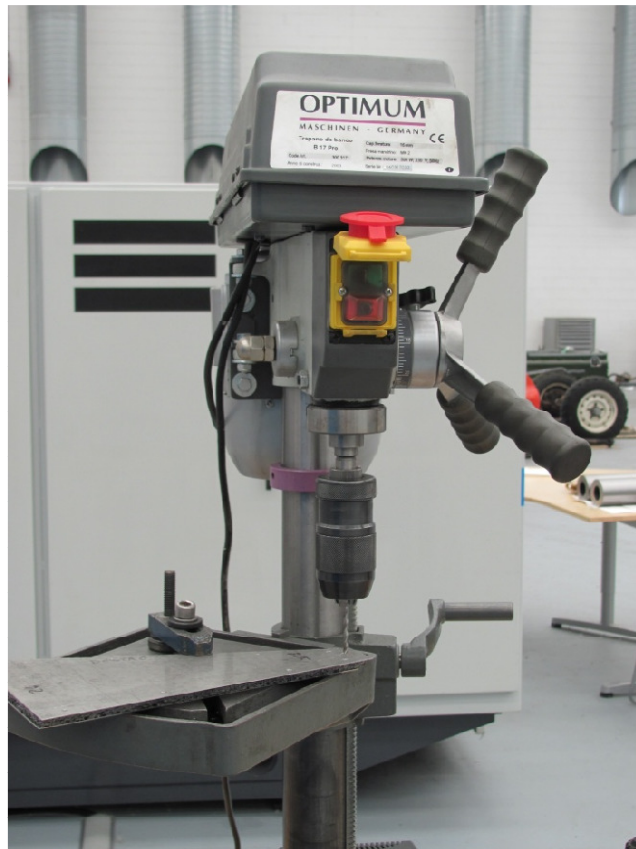


Figura 7. 21: Trapano a colonna per foratura di pannelli e angolari

Essendo la colla un monocomponente a presa rapida, è necessario che al momento del montaggio tutto sia pronto e resti solamente da siringare l'adesivo tra angolari e pannelli e inserire i rivetti di giunzione.

Dopo aver realizzato i fori esterni e sul tappo e alla fine i crash box sono stati provvisoriamente montati senza adesivo per verificare che il posizionamento dei fori per i rivetti fosse corretto.

Si è notato che ottenere una perfetta corrispondenza tra fori di pannelli diversi e tra fori di pannelli e angolari non è assolutamente cosa semplice, anche a causa delle diverse angolazioni dei pannelli.

Essendo poi nulla l'esperienza personale sulla costruzione di una crash box il compito è stato maggiormente complicato, e si è riusciti a portarlo a termine compiendo in corsa le modifiche ritenute necessarie al corretto montaggio.

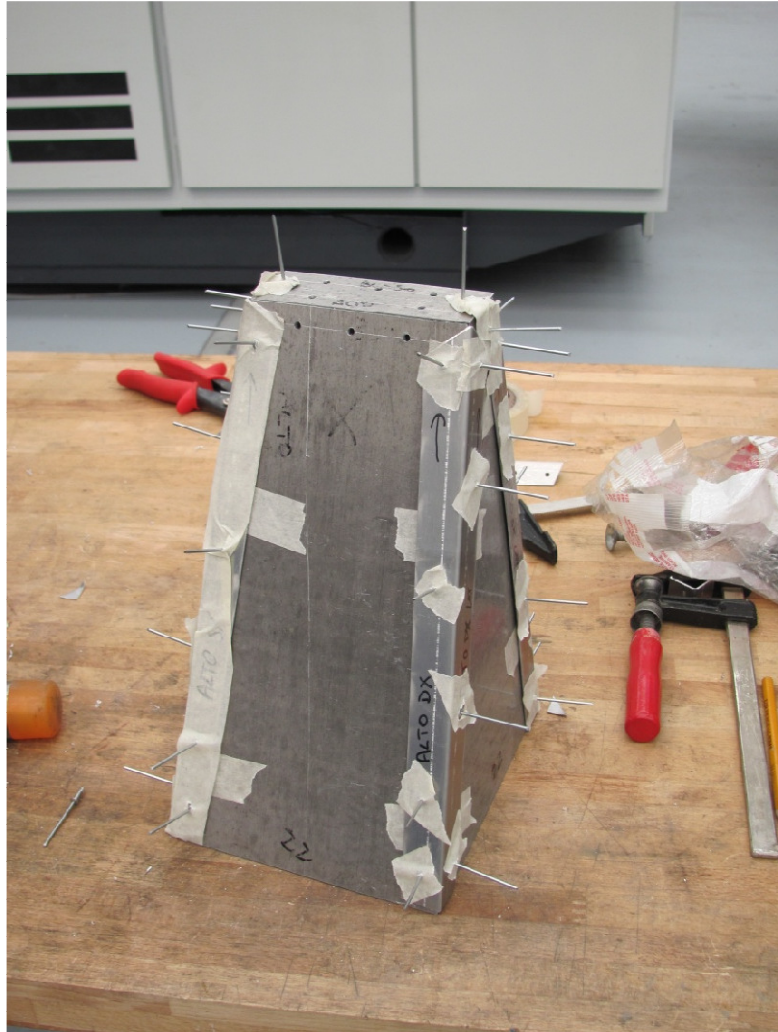


Figura 7.22: Montaggio parziale della crash box

Le operazioni di costruzione preliminari sono così concluse.

Prima di costruire effettivamente i due prototipi si procede a una preparazione dei pannelli.

In particolare, i pannelli con cuore in schiuma metallica erano esternamente in parte ossidati, e ciò poteva rendere meno efficace l'incollaggio.

Per ovviare sono stati utilizzati dei fogli di carta vetrata con i quali si è eliminato lo strato di ossido.

I pannelli in honeycomb erano stati coperti con uno strato di scotch di carta per proteggere l'alluminio, perciò è stato necessario rimuovere questo strato.

Successivamente i pannelli sono stati lavati e trattati con acetone per eliminare unto, grasso e residui vari (tra cui quelli della colla).



Terminata la preparazione si è proceduto alla realizzazione vera e propria. L'operazione è stata svolta in una stanza climatizzata, per allungare il più possibile il tempo disponibile per la prova, essendo l'adesivo a presa rapida; per lo stesso motivo, l'adesivo, i pannelli e gli angolari erano stati conservati in un frigorifero portatile.

Il materiale a disposizione era il seguente:

- Pannelli in schiuma metallica forati
- Pannelli in honeycomb forati
- Angolari sagomati in misura e forati
- Adesivo Weld-on SS 315
- Rivetti  $\phi$  3 mm e lunghezza 7 mm
- Siringa per adesivo  $\phi$  65 mm
- Pistola per rivetti

La procedura adottata è stata la seguente:

- Disposizione dell'adesivo tramite siringa sui lati da incollare
- Posizionamento angolari sui lati da incollare
- Inserimento rivetti

Queste operazioni sono state ripetute per entrambe le crash box e per ogni angolare da inserire.

Si è deciso di procedere partendo dagli angolari interni per avere maggior spazio di manovra.

Inseriti due angolari interni (che collegavano il pannello inferiore ai due laterali), è stato posizionato il pannello superiore e si è iniziato a collegare i pannelli esternamente tramite angolari.

Poi è stata la volta del pannello più piccolo, che funge da "tappo", e che viene assemblato agli altri 4 pannelli tramite alcuni angolari di dimensione ridotta.

Infine sono stati inseriti gli ultimi due angolari interni.

Si è verificato un problema di spazio nel montaggio di questi ultimi angolari.

Per questo motivo è stato necessario prendere alcune decisioni:

1. Ridurre la lunghezza degli angolari escludendo l'ultimo rivetto da inserire all'interno
2. Non inserire l'ultimo rivetto dell'angolare adiacente a quello del punto 1

La prima operazione è stata necessaria perché, essendo la crash box realizzata in scala, si è notato che era necessario ridurre la lunghezza degli angolari.

La seconda operazione è stata resa necessaria dal fatto che lo spazio a disposizione per il montaggio era a questo punto insufficiente.

Probabilmente queste problematiche non si sarebbero riscontrate se il prototipo fosse stato realizzato in scala 1:1, ma in questo caso le dimensioni del maglio della torre di caduta non lo consentivano.

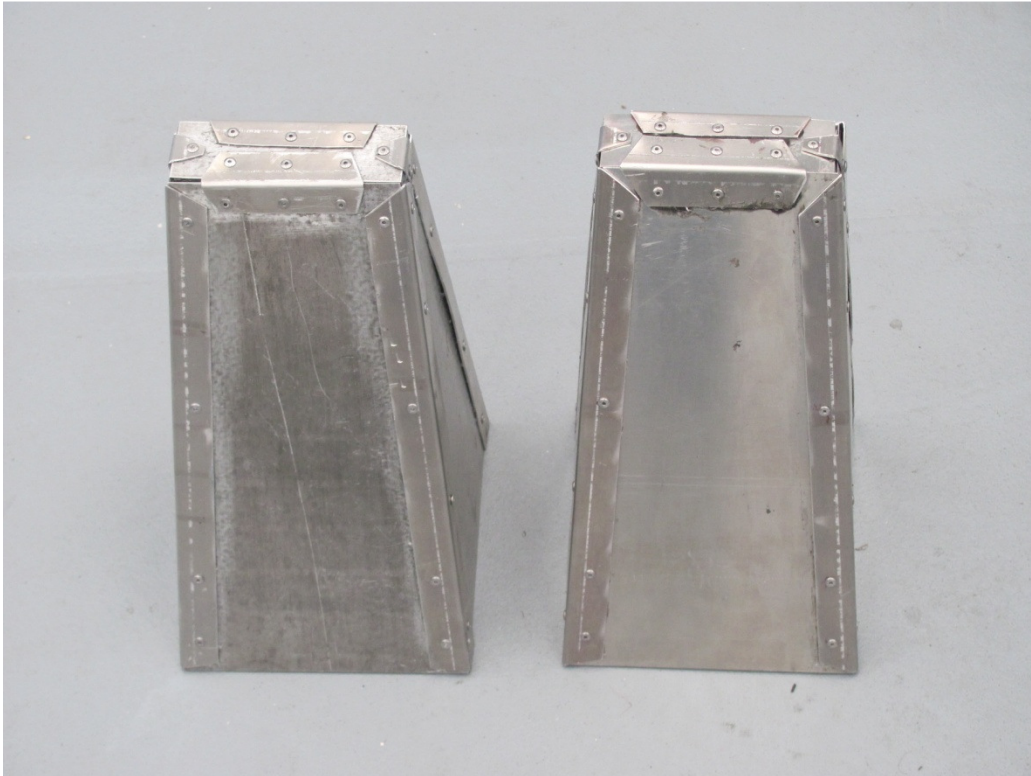


Figura 7.23: I due assorbitori realizzati; a destra quello con cuore in honeycomb e a sinistra quello con cuore in schiuma

Nella figura 7.24 vengono proposte alcune immagini degli assorbitori realizzati. Dalla vista posteriore si può notare come effettivamente lo spazio a disposizione fosse troppo poco per poter arrivare fino al fondo con i rivetti. La pistola utilizzata, pur essendo di dimensioni ridotte, non consentiva questa possibilità.

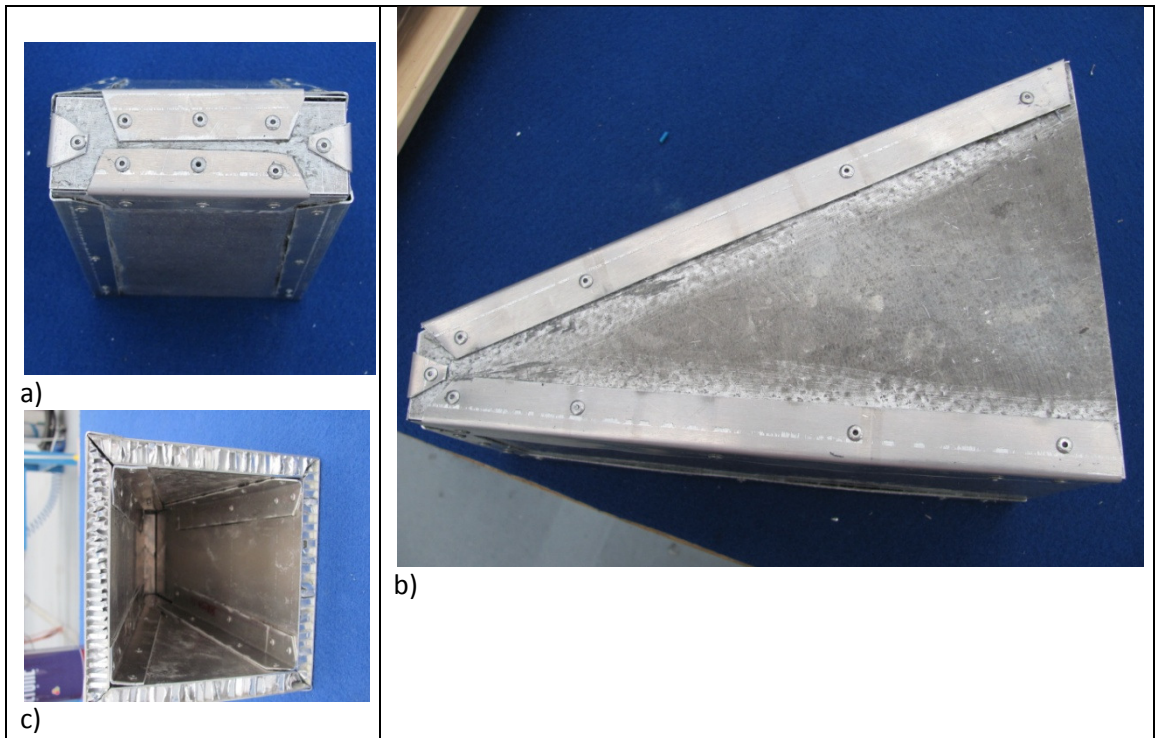


Figura 7.24: Alcune immagini delle crash box realizzate; dall'alto a sinistra in senso orario, vista frontale (a), laterale (b) e posteriore (c)

Si è deciso di pesare le due crash box per valutarne il peso finale, comprensivo di tutti i componenti:

- Peso crash box schiuma metallica 1.357 kg
- Peso crash box honeycomb 1.111 kg

L'ultima parte da realizzare non costituisce la crash box ma è indispensabile al buon funzionamento della prova.

E' necessario realizzare una base che consenta al provino colpito di non scivolare lateralmente; può andare bene una lastra di acciaio.

Essa è stata sagomata tramite taglio WaterJet con abrasivo, e la sua parte cava ricalca quella della sezione di base dell'assorbitore.

E' stato considerato un minimo di "gioco" per consentire all'assorbitore di essere posizionato all'interna della lastra sagomata.

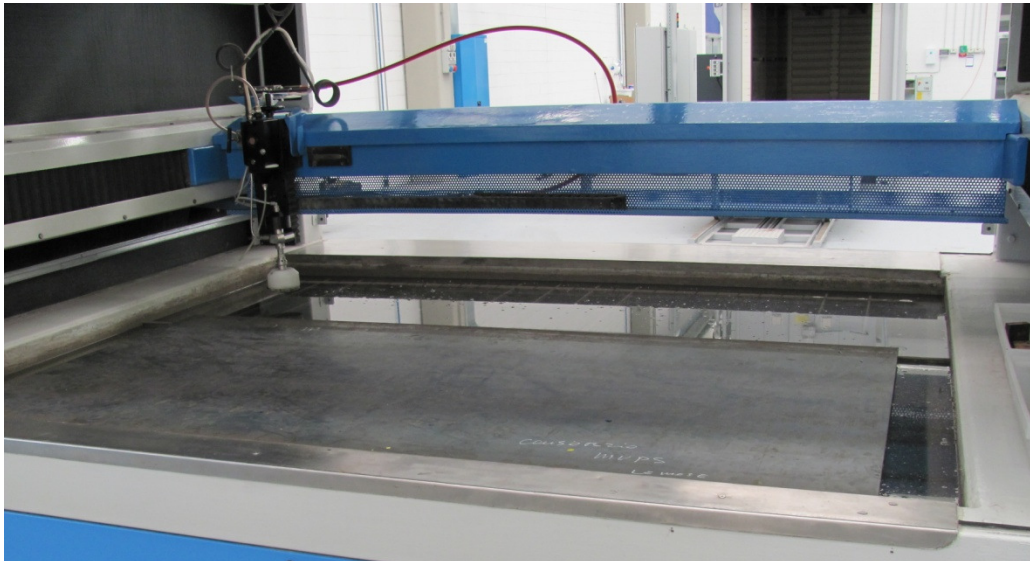


Figura 7.25: Fissaggio della piastra di acciaio su macchina per taglio AWJ

Essendo il provino più grande di quelli precedentemente testati sulla torre di caduta dell'azienda Picchio, è stato necessario realizzare la base in maniera leggermente differente.

Essa in realtà non è costituita da una lastra sola, ma da tre lastre sovrapposte; come detto, il provino era decisamente di dimensione maggiore rispetto a quelli solitamente testati, perciò i fori di fissaggio cadevano all'interno della parte cava dell'assorbitore.

Allora si è deciso di realizzare una lastra inferiore senza cavità, che consentisse di collegarsi ai fori di fissaggio del basamento, e due lastre sovrapposte uguali, che prevedevano la presenza di fori per collegarsi a quella sottostante e la cavità per inserire l'assorbitore.

Sarà senz'altro tutto più chiaro dopo aver osservato la figura 7.26.

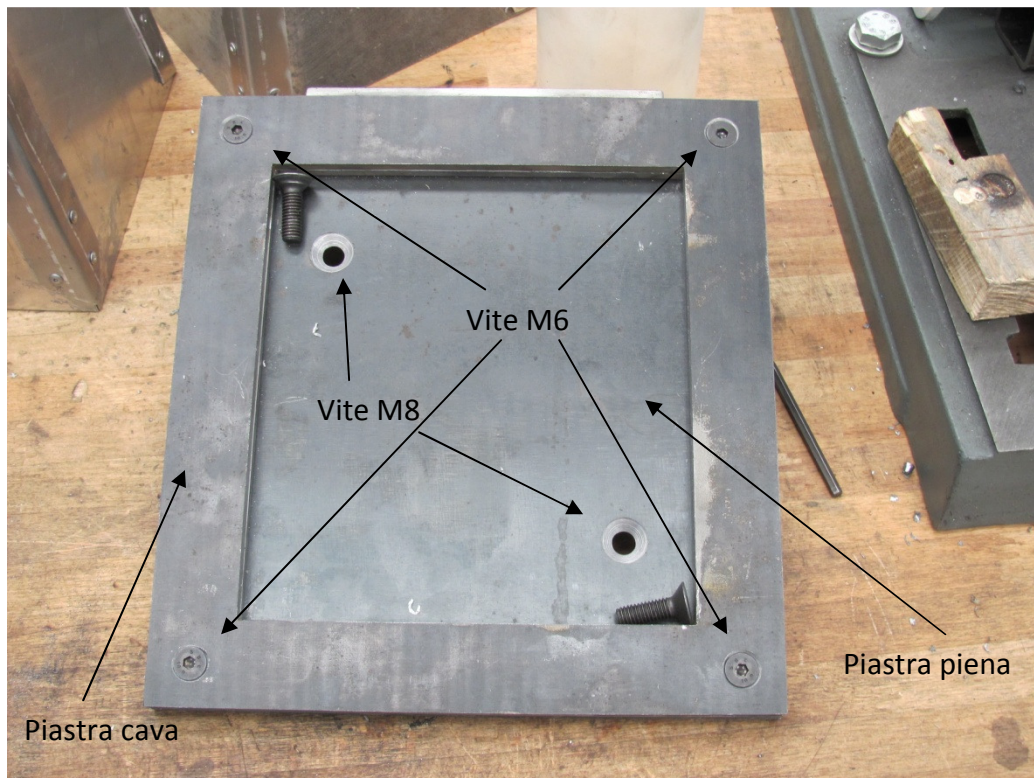


Figura 7.26: Base per fissaggio crash box



---

---

## 8 ANALISI SPERIMENTALE DELLA SOLUZIONE IDEATA

Le prove sperimentali rappresentano il punto conclusivo del lavoro di tesi. La prova sperimentale consente di comprendere qual è l'effettivo comportamento del materiale che si vuole testare.

I risultati numerici di cui si è parlato nei capitoli precedenti hanno scarso valore se non supportati da prove sperimentali che consentano una validazione.

Il modello, per sua stessa definizione, è una approssimazione della realtà, e per tale motivo non può e non deve essere considerato come un dogma incontestabile.

La prova sul campo permette di conoscere quanto il modello rappresenta bene la realtà e, se necessario, permette di intervenire su di esso con criterio per ottenere un'approssimazione sempre migliore del caso reale.

Nel caso in esame la prova da eseguire è un crash test su una torre di caduta verticale, presente presso l'azienda Picchio S.p.a.

Tale torre di caduta consente di applicare carichi da 294 a 400.4 kg ed ha una altezza massima di circa 5.5 m.

Nella figura 8.1 vengono mostrati i componenti principali della torre, ognuno dei quali ha un ruolo importante durante la prova.

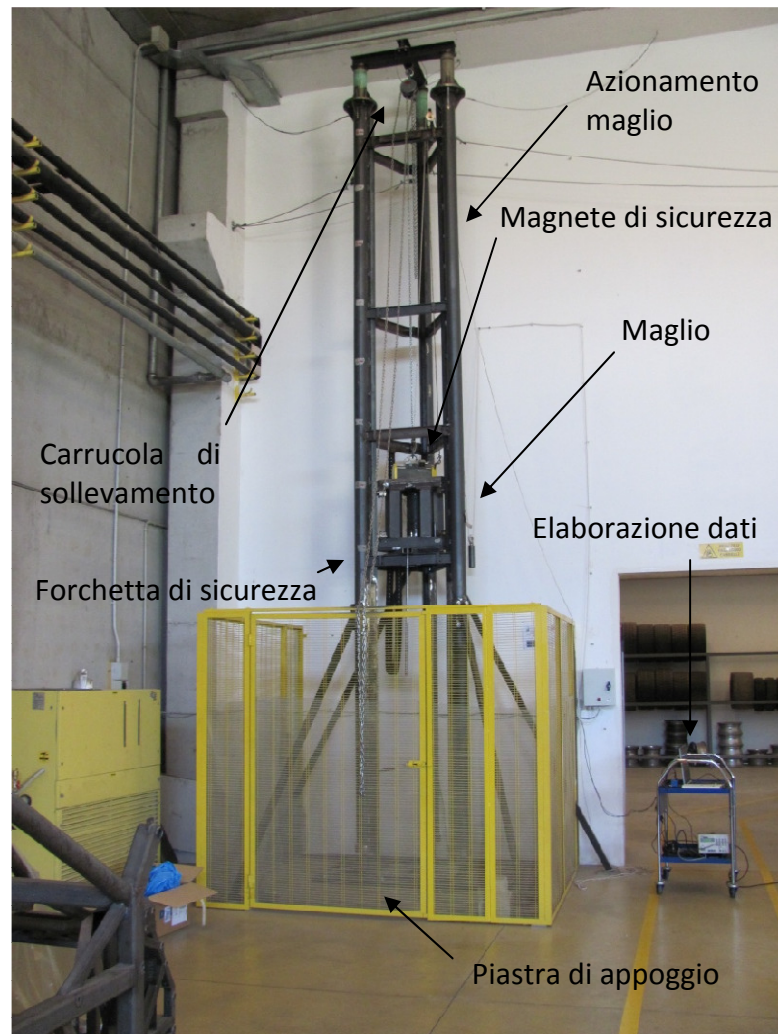


Figura 8.1: Torre di caduta verticale (Drop tower)

La prova consiste nel far cadere il maglio, impostato ad un peso di 294 kg, da un'altezza pari a 4 metri.

Tali valori sono stati scelti considerando il fatto che l'assorbitore testato è in scala 1:2 rispetto a quello reale e perciò anche le caratteristiche dell'impatto dovevano essere scalate rispetto a quelle reali.

Il peso di 294 kg è circa la metà rispetto ai 610 kg della prova di omologazione su slitta orizzontale, mentre la velocità di impatto è circa  $\frac{2}{3}$  rispetto a quella della prova suddetta (8.25 m/s contro i 12 m/s della prova orizzontale).

Tale peso è di certo accettabile per l'elettromagnete di sicurezza in quanto esso ha portata pari a 1000 kg.



Si è deciso di testare prototipi scalati rispetto alla dimensione originale, in quanto le dimensioni del maglio non consentivano di testare un assorbitore in scala 1:1.

Tutte le dimensioni dell'assorbitore sono state ridotte alla metà, tranne lo spessore dei pannelli sandwich, che sono rimaste inalterate.

Si è deciso di testare un assorbitore costituito da pannelli sandwich con cuore in schiuma metallica ed uno da pannelli sandwich con cuore in honeycomb.

Per avere una maggior ripetibilità dei risultati sarebbe stato necessario eseguire almeno tre prove per ogni tipo di assorbitore ma, per il momento, si è deciso di accontentarsi di una prova soltanto.

Il motivo è legato a molteplici fattori.

Innanzitutto la modalità di realizzazione degli assorbitori; essi sono stati realizzati all'interno del Laboratorio Musp per la prima volta, senza alcuna esperienza di base.

Va da sé che i risultati possono essere fortemente influenzati dall'abilità degli operatori.

Inoltre occorre ricordare che alcune scelte strategiche riguardanti la realizzazione del provino, quali il numero e la posizione dei rivetti e la dimensione degli angolari, sono state prese basandosi su criteri di rispetto degli ingombri e cercando di ricalcare nel modo migliore possibile la configurazione della crash box in scala 1:1 attualmente realizzata dall'azienda partner.

E' possibile ponderare tale scelta con maggior calma e criterio, ed ottenere così risultati migliori.

Come sviluppo futuro si intende realizzare prove con più ripetizioni e cercando di fissare una modalità di costruzione del provino costante, in modo da assicurare una certa ripetibilità di realizzazione.

La procedura con cui è stata eseguita la prova è la seguente:

- Rimozione forchetta di sicurezza (posizionata per motivi di sicurezza al di sotto del maglio quando la macchina è ferma)
- Posizionamento del maglio all'altezza desiderata tramite carrucola
- Rimozione della sicura (viene tolta la corrente all'elettromagnete di sicurezza)
- Inizio acquisizione tramite sistema di acquisizione
- Sganciamento del maglio
- Discesa dell'elettromagnete
- Collegamento del magnete al maglio
- Sollevamento del maglio tramite carrucola
- Posizionamento forchetta di sicurezza sotto al maglio

Gli strumenti “ausiliari” utilizzati per la prova sono una scheda di acquisizione dati (con frequenza di acquisizione pari a 50 kHz), un programma di elaborazione dati (*Labview*) e un accelerometro con fondo scala pari a  $\pm 180$  g. La velocità di impatto viene misurata tramite una fotocellula che, conoscendo la lunghezza del maglio e misurando il tempo tra il passaggio dell’inizio del maglio e quello della fine dello stesso, è in grado di determinarla con precisione accettabile.



Figura 8.2: Alcuni particolari della torre di caduta

Si è deciso di testare per primo l'assorbitore con cuore in honeycomb e successivamente quello studiato presso il Laboratorio Musp.

In precedenza erano stati eseguiti alcuni test su provini sandwich con cuore in schiuma e di sezione quadrata (si veda il paragrafo 5.2) ed erano state testati alcuni provini di forma semplice in alluminio.

Questo allo scopo di verificare se il funzionamento della macchina di prova fosse corretto nelle stesse condizioni che sarebbero state applicate per comprimere le crash box.

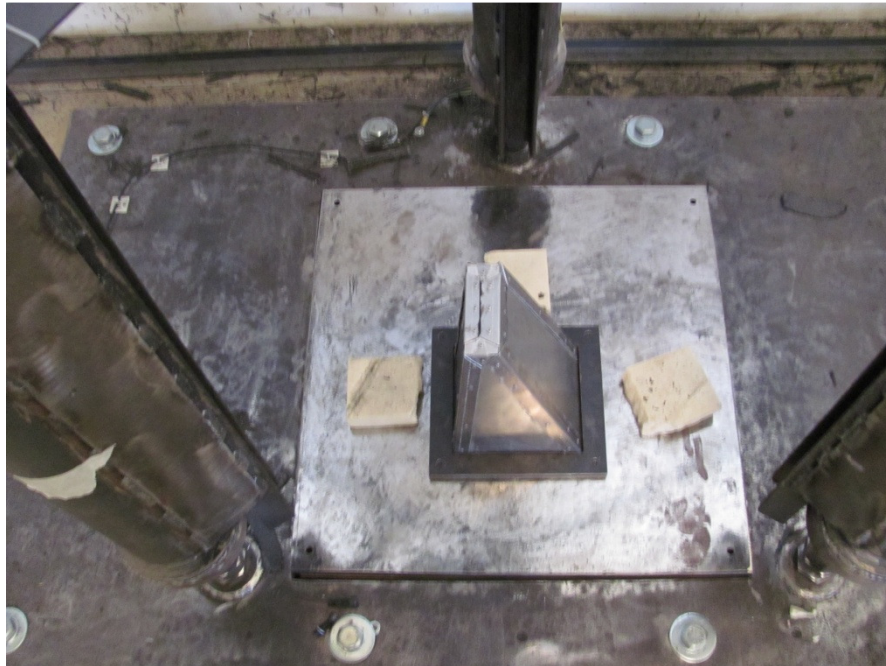


Figura 8.3: Assorbitore con cuore in honeycomb montato tramite piastra di fondo sulla torre

Il risultato della prima prova non è positivo.

Come si può vedere dalla figura 8.4, il pannello laterale dell'assorbitore si è staccato dagli altri pannelli, non partecipando così più all'urto.

Di conseguenza, l'assorbitore ha ceduto di schianto.

Come si vede in figura si sono comunque formate alcune pieghe, presumibilmente prima del distacco dell'angolare e dei rivetti che ha aperto il collegamento tra i pannelli.

Il motivo del cedimento probabilmente non è però legato al materiale, in quanto il modello in scala 1:1 testato in passato dall'azienda su slitta orizzontale non aveva subito un cedimento così impulsivo.

Il motivo si pensa sia invece legato a un cattivo comportamento dell'adesivo.

Dalla figura 8.5 si può notare come ci sia una parte dove l'adesivo si è staccato, e corrisponde alla parte dove l'adesivo non ha ben solidificato.



Figura 8.4: Assorbitore con cuore in honeycomb dopo l'urto; il pannello laterale non ha retto

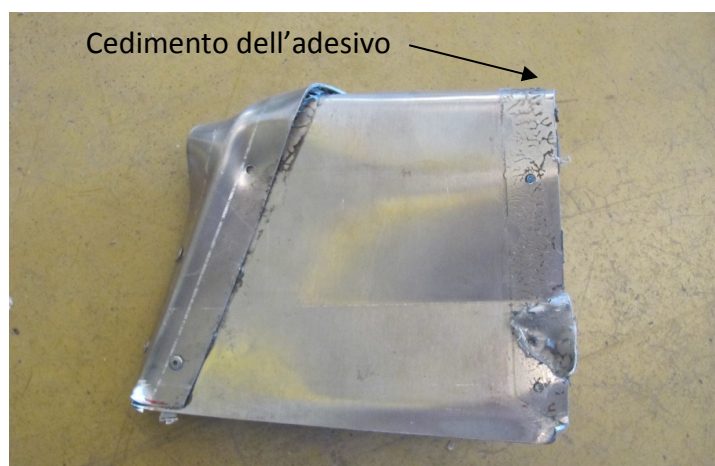


Figura 8.5: Pannello laterale della crash box dopo il cedimento

Successivamente, con le stesse modalità di prova e di fissaggio del provino, è stato testato l'assorbitore con cuore in schiuma metallica.

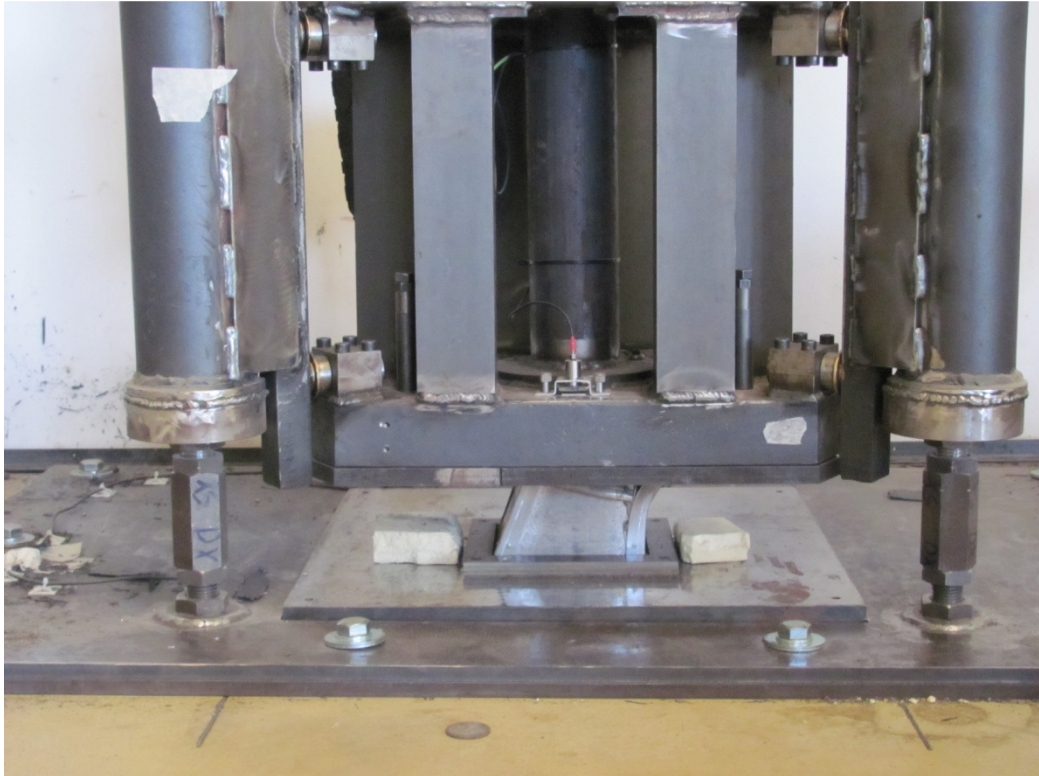


Figura 8.6: Provino al termine dell'impatto; è ancora sotto il peso del maglio ma la sua resistenza ha permesso di evitare una compressione completa

Come si può notare dalla figura 8.6 in questo caso l'assorbitore non ha subito un cedimento impulsivo, ma graduale come desiderato.

Questo è sicuramente imputabile alle ottime doti di assorbitore di energia possedute dalla schiuma metallica e contemporaneamente a un comportamento finalmente adeguato della colla.

I dati ricavati da questa prova saranno perciò confrontabili con quelli ricavati dalla modellazione numerica, mentre il confronto con l'altro provino non assume a questo punto particolare significato.

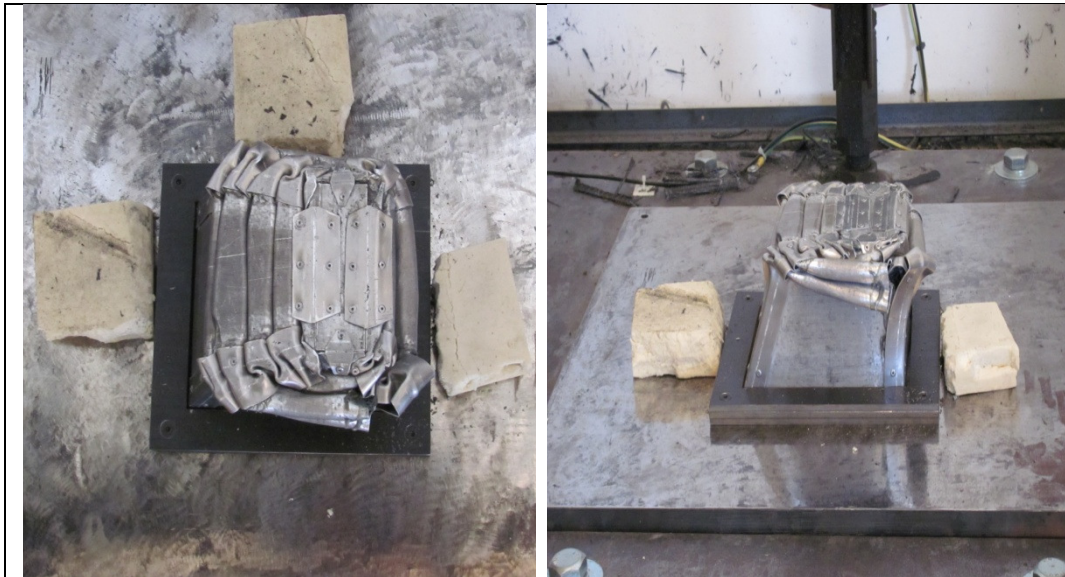


Figura 8.7: Vista del provino compresso ancora montato sulla macchina; vista dall'alto (a sinistra) e frontale (a destra)



Figura 8.8: Vista da sotto dell'assorbitore compresso

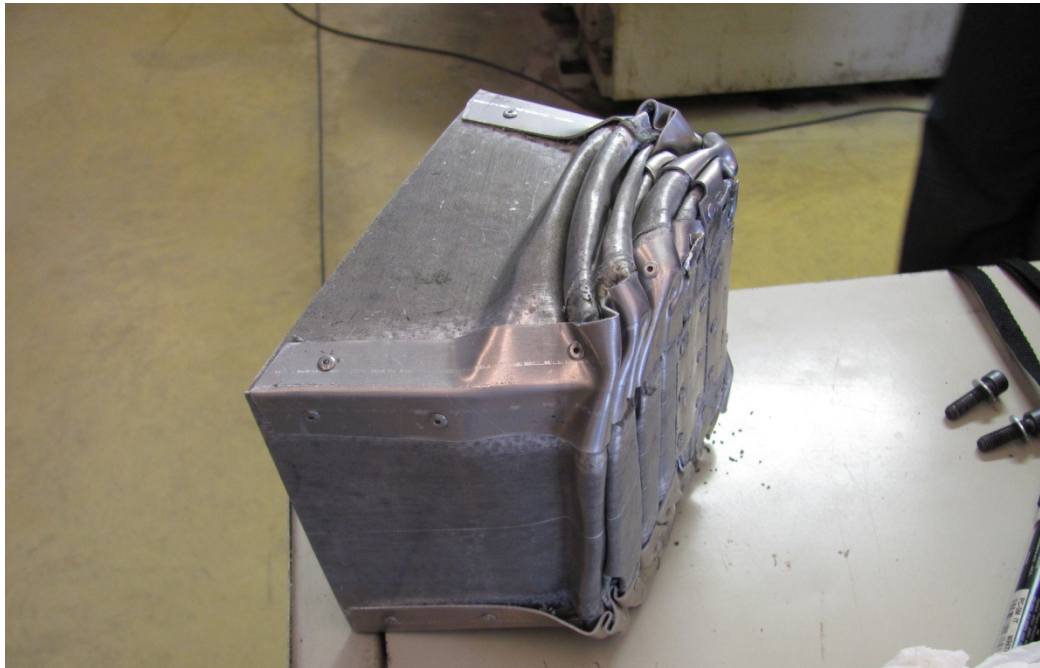


Figura 8.9: Vista laterale dell'assorbitore compresso



Figura 8.10: Vista dall'alto dell'assorbitore compresso

Come si può notare dalle figure 8.7-10 l'assorbitore ha subito un cedimento graduale di tipo *concertina*, ovvero a fisarmonica.

Si ha avuto una formazione di pieghe simmetriche, all'interno e all'esterno dell'assorbitore, che hanno coinvolti anche gli angolari.

Tale tipo di *folding* è quello solitamente desiderato, in quanto garantisce cedimenti graduali ed efficaci, mai impulsivi, ed effettivamente ciò si è verificato.

Si può notare come anche in questo caso si è verificata una lieve apertura tra i pannelli, legata al distacco dei rivetti di un angolare, ma ciò non ha compromesso il buon comportamento della crash box.

La lunghezza finale dell'assorbitore in schiuma metallica dopo l'impatto è stata misurata, ed è risultata essere pari a 112 mm, a differenza dei 270.5 mm iniziali.

L'indice crush force efficiency risulta allora essere pari a 0.59, e ciò indica che l'assorbitore si è compresso solamente per poco più della metà della sua lunghezza, e che perciò potenzialmente avrebbe potuto reggere anche un impatto più gravoso senza collassare.



---

## 9 CONFRONTO RISULTATI NUMERICI E SPERIMENTALI

### 9.1 RISULTATI DELLA PROVA SPERIMENTALE

Dopo aver realizzato le prove sperimentali è stato possibile effettuare un confronto tra i risultati ottenuti dalle prove numeriche e quelli risultanti dalle prove sul campo.

La procedura con cui sono stati ottenuti i dati sperimentali è stata descritta al capitolo precedente.

I segnali provenienti dall'accelerometro sono stati acquisiti da una scheda ed analizzati dal software *Labview*.

Successivamente, tramite il software *Matlab* è stato possibile applicare il filtro CFC 60, che deve essere utilizzato per filtrare i dati ottenuti come prescritto dal regolamento FIA.

Dalla prova sperimentale è stato possibile estrarre dei grafici che permettono di vedere l'andamento della decelerazione durante l'impatto e dopo che esso è avvenuto.

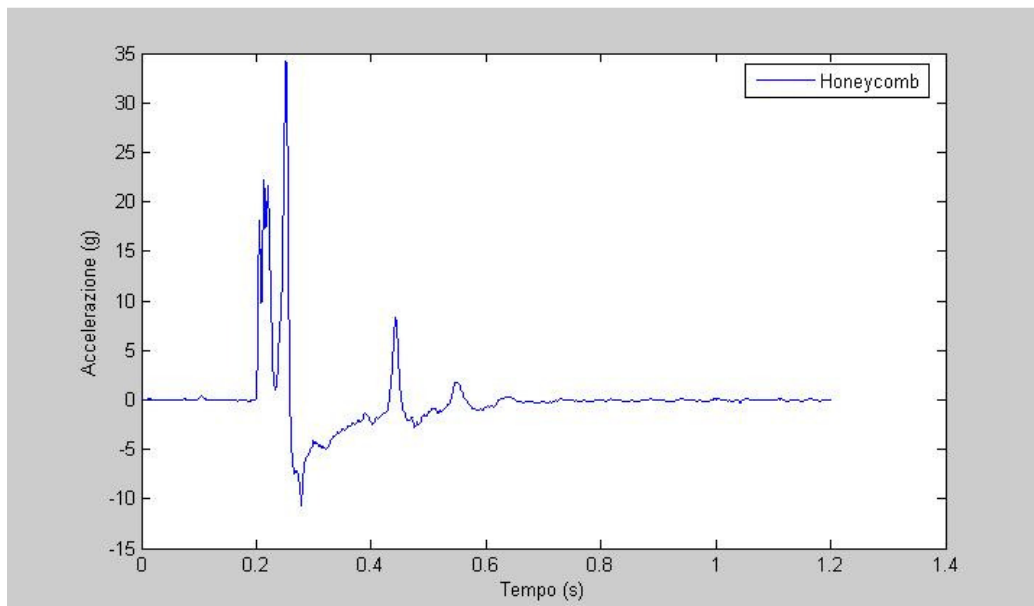


Figura 9.1: Andamento della decelerazione nel tempo per la crash box con cuore in honeycomb

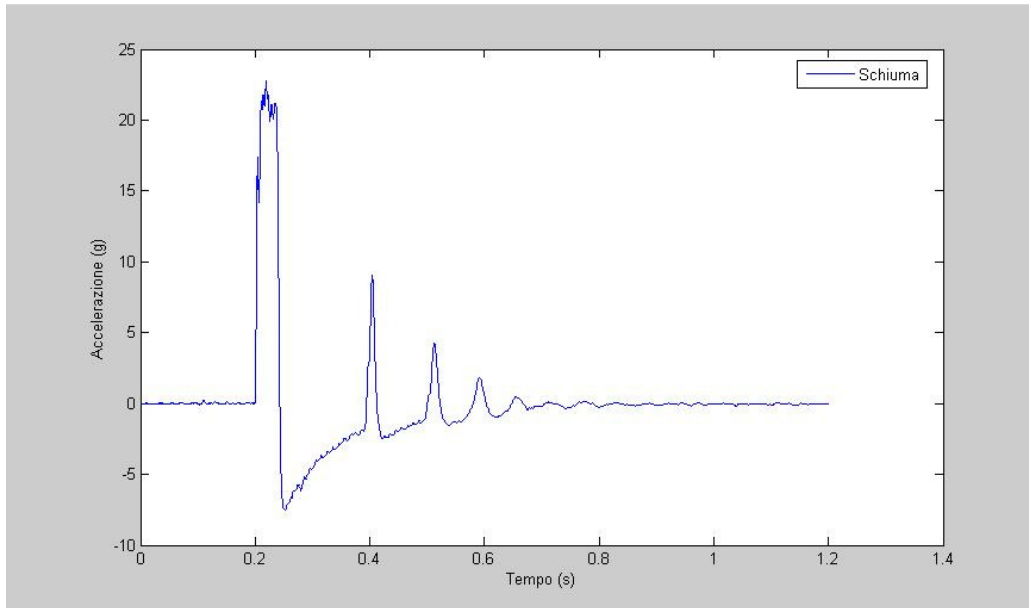


Figura 9.2: Andamento della decelerazione nel tempo per la crash box con cuore in schiuma

In entrambi i grafici si può notare facilmente il momento in cui l'accelerazione si annulla e diventa negativa; esso è il punto in cui il maglio inizia la corsa di ritorno, avendo esaurito la sua forza d'urto.

Successivamente si possono notare dei picchi positivi e negativi, che rappresentano piccoli "rimbalzi" del maglio, ovviamente impercettibili per il tempo ridottissimo e l'altissima frequenza cui avvengono.

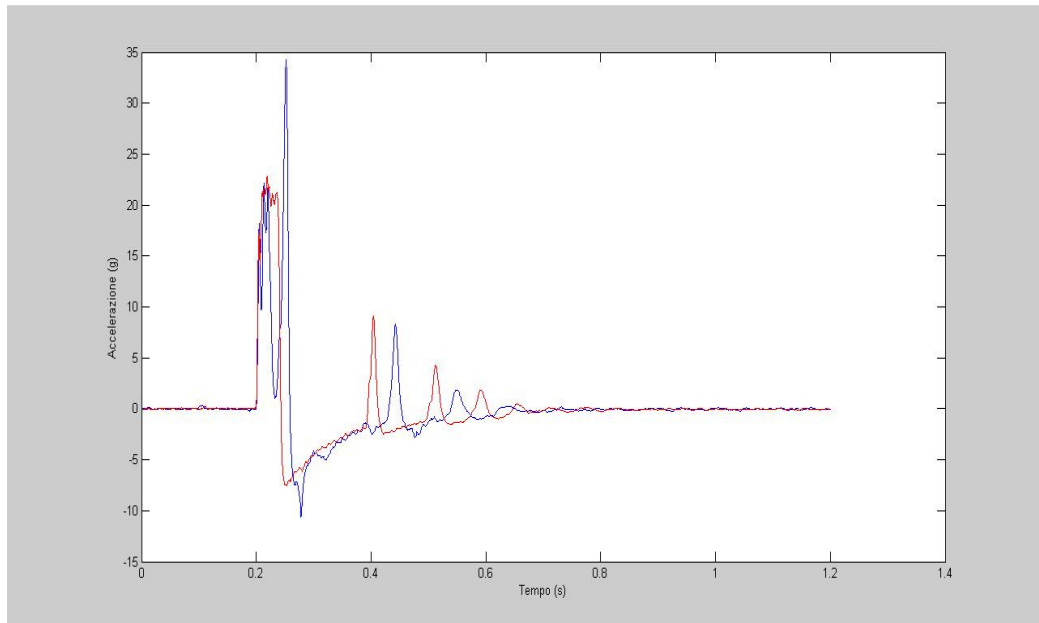


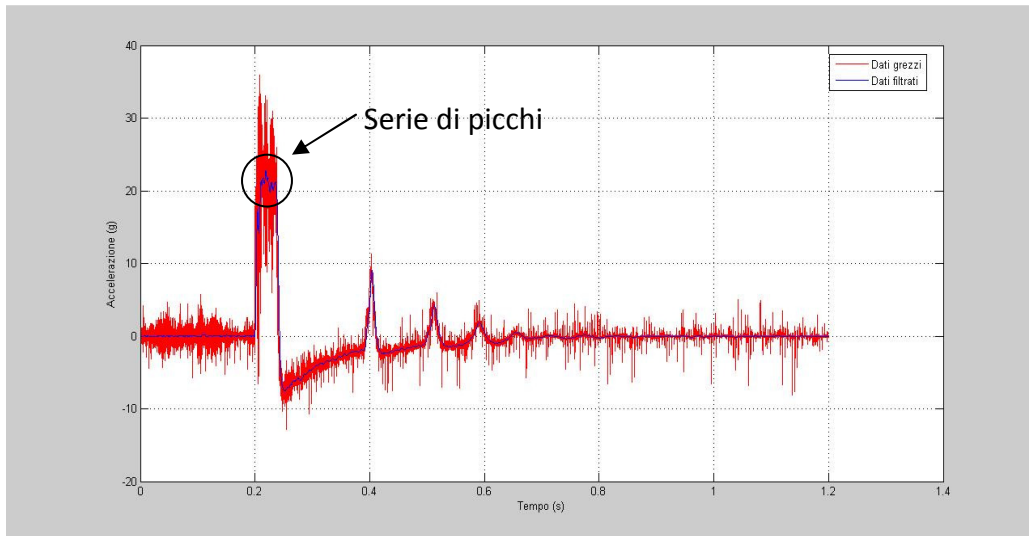
Figura 9.3: Confronto tra honeycomb (blu) e schiuma metallica (rosso)

Da questo confronto appare evidente come il comportamento dei due materiali non sia troppo dissimile, anche se la schiuma sembra lavorare meglio, non avendo il picco a 35 g di accelerazione che si nota per l'honeycomb.

Se si calcola il valore di decelerazione media si nota che è circa pari a 18 g per quanto riguarda l'assorbitore con schiuma, mentre nel caso in cui si utilizza l'honeycomb è pari quasi a 13 g.

Come detto in precedenza però, non è possibile ottenere dall'honeycomb un riferimento quantitativo realistico in quanto durante la prova la crash box si è aperta prima di completare l'assorbimento di energia, perciò i valori usciti dalla prova non possono essere considerati corretti, ma andranno verificati tramite altri test.

Dalla figura 9.4 si può notare come l'utilizzo del filtro abbia influito sui risultati ottenuti.



**Figura 9.4: Confronto tra dati grezzi (rosso) e dati filtrati (blu) per la schiuma metallica**

Dal grafico dell'assorbitore con schiuma metallica, osservando con attenzione, si nota la presenza di una serie di picchi (indicata con un cerchio nella figura 9.4); ingrandendo l'immagine si può associare questi picchi alla formazione delle pieghe nella crash box che effettivamente sembrano essere cinque già formate, e una in via di formazione.

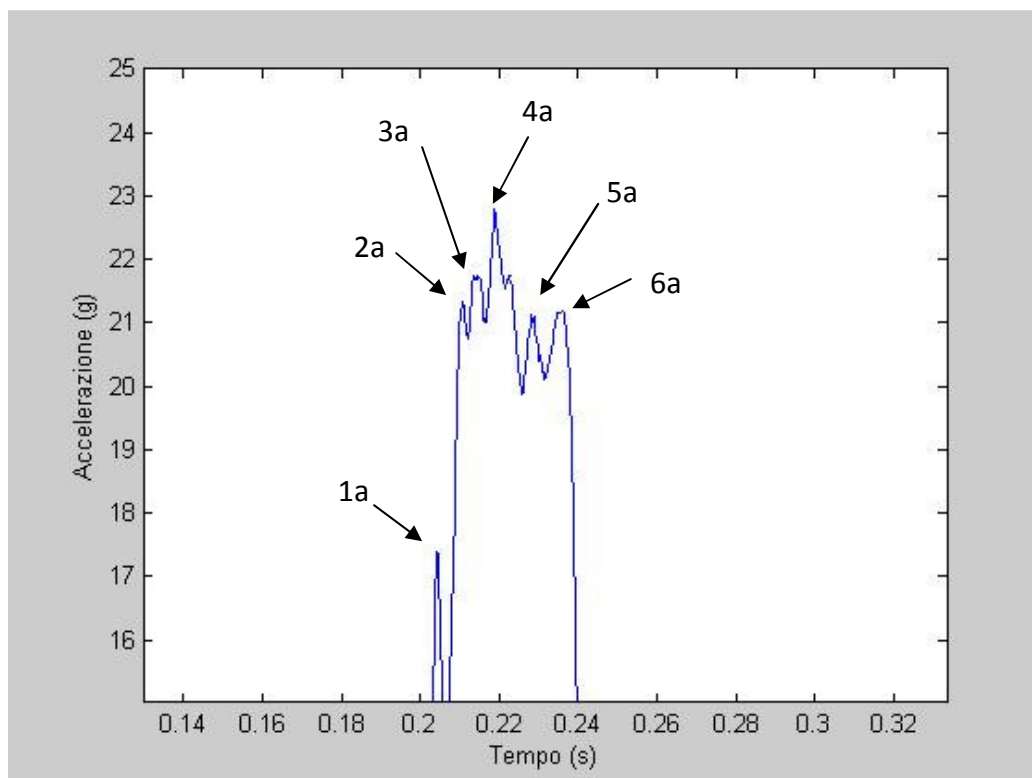


Figura 9.5: Folding dell'assorbitore con cuore in schiuma metallica

Dal grafico della decelerazione si nota inoltre come non ci sia la presenza di un picco iniziale di entità particolarmente elevata; si pensa che tale effetto di smorzamento del picco sia legato al fatto di non aver inserito alcuni rivetti internamente e di avere così accorciato gli angolari; tale effetto è da considerarsi positivo.

## 9.2 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE NUMERICA

Il passo successivo, una volta analizzati i risultati della prova sperimentale, consiste nel valutare i risultati del modello numerico, per verificare la presenza di una certa verosimiglianza o meno.

E' stato necessario creare un modello numerico ad hoc, in quanto non era possibile riutilizzare i modelli già sviluppati in precedenza.

Questo perché la prova sperimentale è stata svolta su una crash box in scala 1:2 rispetto all'originale, ad eccezione dello spessore dei pannelli, che è stato mantenuto tale.

Inoltre è stato modificato il numero e la posizione dei rivetti e la dimensione degli angolari, che è stato necessario ridurre.

Il modello realizzato prevedeva:

- Dimensioni in scala 1:2
- Pannelli di spessore invariato
- Angolari di spessore 1.2 mm e sezione 20x20 mm<sup>2</sup>
- Incastro alla base
- Spostamento della massa impattante solo lungo l'asse dell'assorbitore d'urto
- Massa di impatto 294 kg
- Velocità di impatto 8.25 m/s
- Rivetti disposti in modo alternato

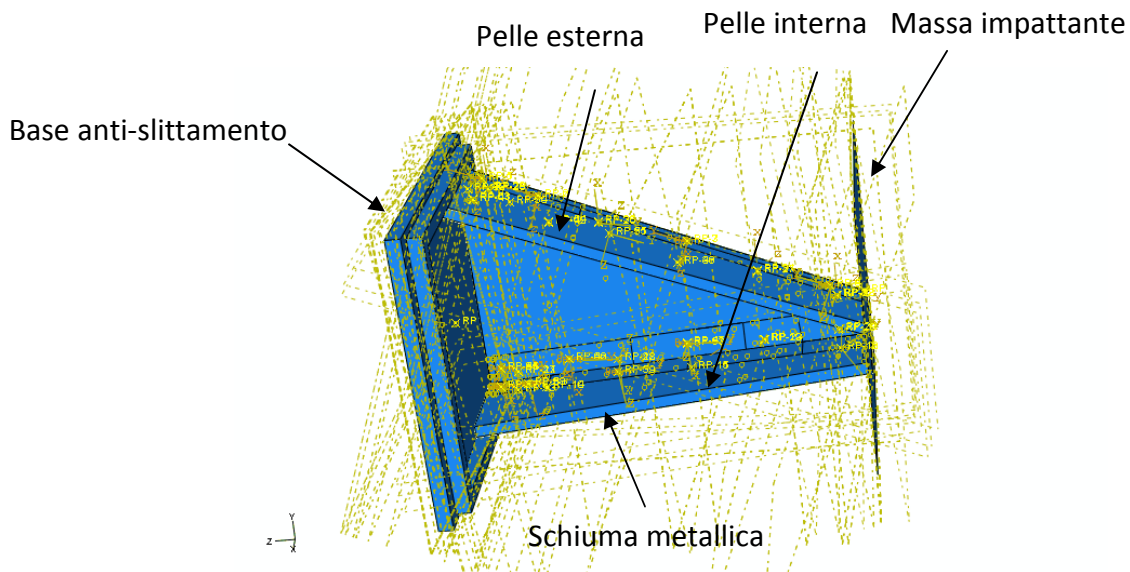


Figura 9.6: Modello numerico in scala 1:2

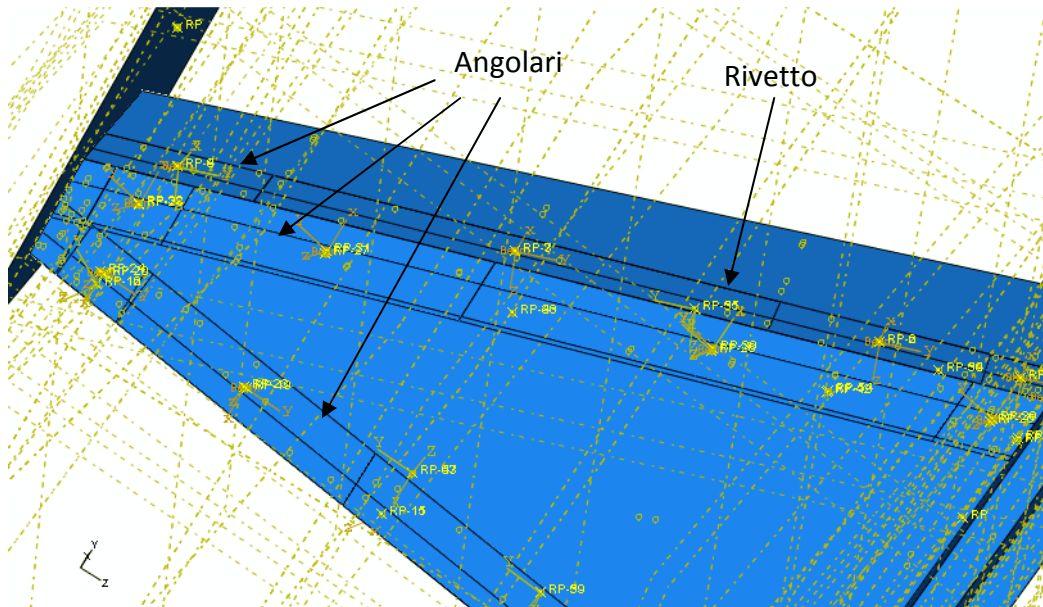


Figura 9.7: Particolare del modello numerico visto dall'esterno; si notano i rivetti e gli angolari

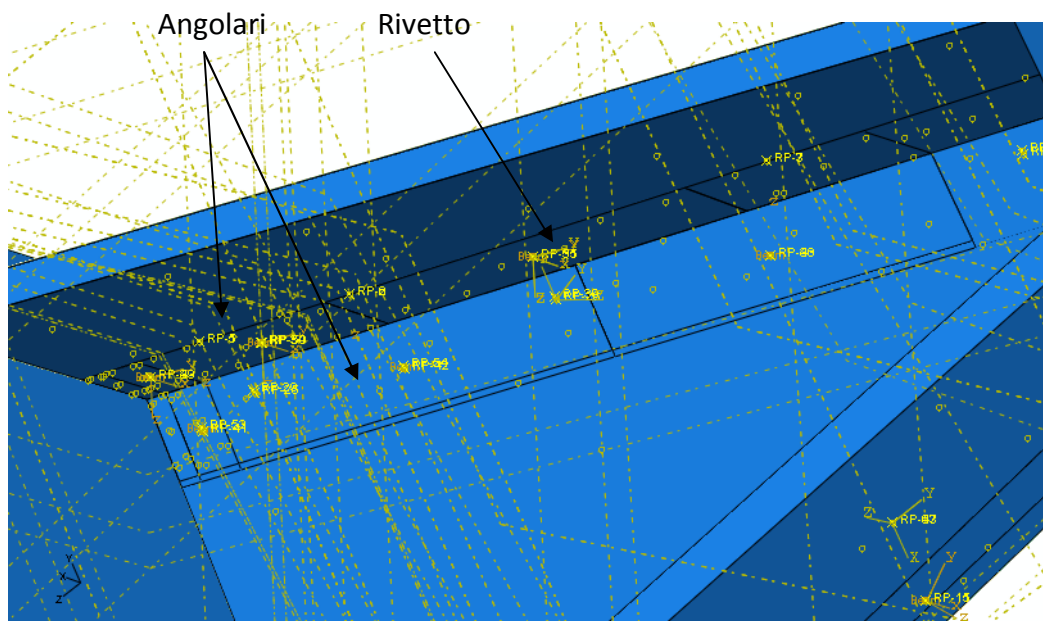


Figura 9.8: Particolare del modello numerico visto dall'interno; si notano gli angolari più corti e, di conseguenza, il numero inferiore di rivetti

Una volta eseguita la simulazione numerica, i dati usciti dal modello sono stati filtrati allo stesso modo dei dati sperimentali per poter effettuare un raffronto.

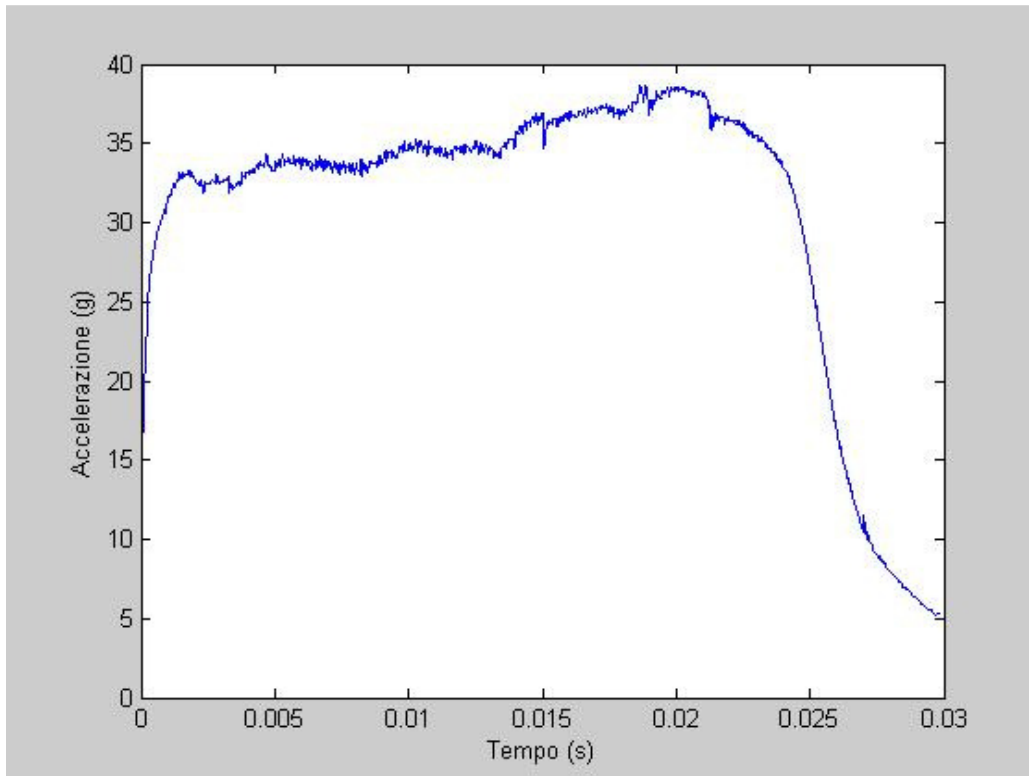


Figura 9.9: Andamento della decelerazione nel tempo per il modello numerico (filtrato)

Il modello numerico fornisce risultati che in certi aspetti risultano essere differenti rispetto a quelli sperimentali.

Nel grafico della prova sperimentale si vedono abbastanza distintamente i picchi legati alla formazione delle pieghe durante l'impatto, mentre nel caso numerico è più difficile riconoscere tale formazione sulla curva.

In effetti, il modello numerico consente di vedere la formazione di una sola piega durante la compressione dell'assorbitore.



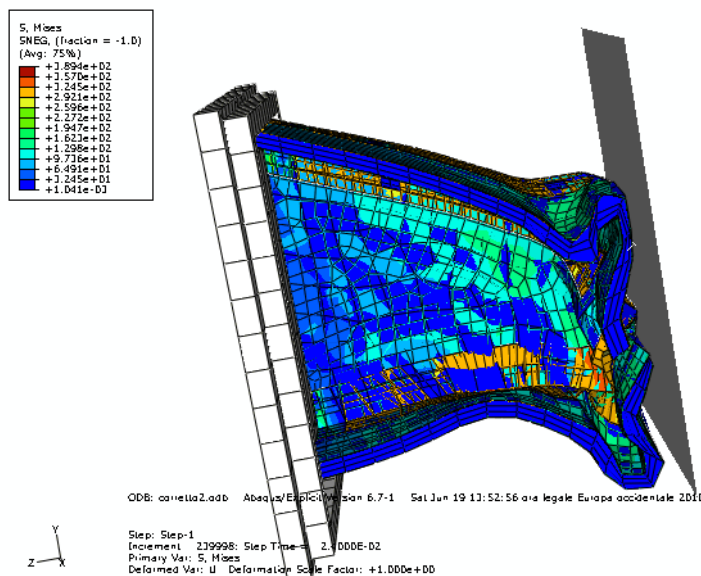


Figura 9.10: Comportamento dell'assorbitore alla fine dell'urto

Osservando con maggiore attenzione il grafico, si può notare questa tendenza; dopo circa 0.02 s si ha un picco, che corrisponde in effetti al momento in cui termina la formazione dell'unica piega.

La durata dell'impatto, viceversa, è all'incirca la stessa nel modello numerico e nel caso sperimentale.

La pecca principale del modello è che al momento sovrastima la rigidità dell'assorbitore.

In effetti i valori di decelerazione media sono quasi il doppio di quelli reali (34.57 g) e ciò concorda con il fatto che l'assorbitore durante la simulazione numerica si comprime meno che nella realtà (circa 102 mm).

L'indice crush force efficiency sarebbe allora pari a 0.38, inferiore allo 0.59 misurato sperimentalmente.

Il modello numerico, però, è in grado di evidenziare la stessa modalità di cedimento che si rispecchia nella prova sperimentale, anche se il numero di *foldings* è inferiore.

I motivi di questo divario sono molteplici:

- La geometria da modellare non è semplice, comprende anche rivetti, angolari ecc...
- Il modello numerico non è in grado di prevedere il distacco dei rivetti, che rende il provino maggiormente cedevole

- Non è stato possibile modellare l'adesivo in modo preciso a causa del fatto che si tratti di un impatto ad altissime velocità
- A causa della complessità del modello non è stato possibile ottenere mesh particolarmente raffinate (problemi di eccessive distorsioni)
- Il modello è stato realizzato in modo simmetrico per ridurre i tempi computazionali (ciò può introdurre errori)
- Il modello è comunque una approssimazione della realtà; non è possibile riprodurre il particolare reale in maniera perfettamente esatta

Anche il modello numerico non fa notare evidenti picchi iniziali; ciò significa che esso ha "recepito" la mancata presenza dei primi rivetti interni e il loro effetto sull'assorbimento di energia.

I valori ottenuti dai modelli numerici in scala reale erano più simili a quelli che ci si aspetta di ottenere da questo tipo di assorbitore.

Il motivo può essere forse spiegato con la diversa collocazione dei rivetti, che portava ad ottenere mesh meno distorte e più "disponibili" ad essere raffinate. Nel modello numerico in scala 1:2 vi erano grosse limitazioni che riguardavano la raffinatezza della mesh, e che portavano inevitabilmente le analisi al *crash*.

Tra questi, problemi legati al *time increment* e ad eccessive distorsioni degli elementi finiti.

---

## 10 CONCLUSIONI

L'obiettivo della tesi è stato fin da subito quello di verificare se le schiume metalliche potessero essere utilizzate con successo all'interno degli assorbitori d'urto.

E' noto che la schiuma metallica, per le sue caratteristiche, è particolarmente abile nell'assorbimento di energia, grazie al lungo plateau di stress che caratterizza il suo diagramma sforzo-deformazione.

E' altrettanto noto che l'utilizzo di schiuma metallica in combinazione con altri metalli (quali acciaio e alluminio) consenta di ottenere un efficace effetto di interazione che porta a migliorare l'energia assorbita durante un urto.

Solitamente, però, gli assorbitori d'urto non prevedono l'utilizzo di schiuma metallica, ma più spesso di honeycomb oppure di materiali compositi.

Ciò può essere spiegato con il costo superiore della schiuma metallica, che ne potrebbe scongiurare l'utilizzo per applicazioni civili (autovetture di grande serie).

In passato sono stati svolti test sperimentali su provini semplici (cilindri, parallelepipedi, tronchi di cono) che prevedevano un riempimento in schiuma metallica.

Tali test hanno dato risultati interessanti, ponendo la schiuma metallica in luce come possibile materiale utilizzabile con successo come assorbitore d'urto.

L'idea è stata allora quella di verificare la possibilità di utilizzare la schiuma metallica come assorbitore d'urto applicandola al campo agonistico, maggiormente aperto alla ricerca e disposto ad investire qualora un materiale innovativo garantisse performance superiori.

In campo agonistico, gli assorbitori d'urto sono maggiormente complessi rispetto ai provini solitamente testati dai ricercatori.

Le geometrie assumono i contorni del musetto della vettura (ovvero a tronco di piramide).

Inoltre, nel caso di materiali cellulari, spesso si ricorre a strutture di tipo sandwich, capaci di garantire risultati migliori rispetto a un riempimento totale della cavità interna della struttura.

Per questo motivo, occorre tener conto di elementi di giunzione aggiuntivi che non erano necessari nel caso di geometrie semplici.

Il lavoro di tesi è stato prevalentemente numerico, e si è orientato nel cercare di comprendere quali fossero le prestazioni fornite dall'assorbitore in schiuma metallica, nei confronti di quello attualmente realizzato dall'azienda partner, che prevedeva l'utilizzo di sandwich con cuore in honeycomb.

Il termine di paragone adottato è quello fornito dal regolamento FIA, che considera omologato un assorbitore se consente di ottenere una decelerazione media sotto impatto (610 kg a 12 m/s) inferiore a 25 g.

L'assorbitore realizzato in honeycomb consentiva di ottenere 22.11 g di decelerazione media.

I test numerici sono stati effettuati considerando alcune configurazioni differenti, allo scopo di valutare il loro effetto sull'assorbimento di energia.

A variare nelle diverse configurazioni, è stata la configurazione del cuore del sandwich, ovvero della schiuma; si è testato: a) un completo riempimento in schiuma, b) tre diverse lunghezze di parziale riempimento e c) tre diversi casi di schiuma con densità variabile nella lunghezza.

In precedenza, inoltre, allo scopo di comprendere quale fosse il miglior modo per costruire l'assorbitore, si è deciso di valutare se fosse meglio avere all'interno o all'esterno una pelle di spessore più sottile rispetto all'altra e se fosse necessario o meno l'utilizzo di rivetti per il montaggio (al posto del solo adesivo).

Dalle analisi numeriche è emerso che:

- la schiuma metallica dà ottimi risultati (decelerazione media pari a 18.6 g, inferiore a quella ottenuta con l'honeycomb)
- la configurazione migliore è quella con pelle più sottile verso l'esterno
- è meglio utilizzare i rivetti assieme all'adesivo, piuttosto che l'adesivo da solo
- riempimenti parziali, in questo caso, non permettono di migliorare la decelerazione media ma smorzano il picco di forza iniziale
- densità variabili consentono invece di ridurre la decelerazione media, e ciò è tanto più evidente quanto è maggiore la parte con densità inferiore

Si è deciso comunque di realizzare l'assorbitore con sandwich che prevedessero un completo riempimento in schiuma metallica a densità costante.

Ciò consente infatti di utilizzare pannelli che legano cuore e pelli attraverso un'adesione metallurgica, maggiormente resistente rispetto ad un incollaggio.

La schiuma può essere utilizzata al meglio sfruttando configurazioni che consentano di esaltarne le proprietà.

Per verificarlo è stato realizzato un modello numerico che aveva geometria differente rispetto a quella richiesta dall'azienda collaboratrice.

I risultati sono stati interessanti, ma al momento si è deciso di non procedere con una prova sperimentale, in quanto è necessario porre dei miglioramenti per rendere l'assorbitore meno vulnerabile da impatti inclinati.

Come detto, la tesi è stata prevalentemente numerica, ma, sfruttando la disponibilità dell'azienda Picchio S.p.a si è deciso di effettuare anche una prova sperimentale, che permettesse di avere una conferma del buon comportamento dell'assorbitore, e, contemporaneamente, comprendere quali fossero i limiti della modellazione.

La prova sperimentale è stata effettuata su due assorbitori, uno che prevedeva utilizzo di honeycomb e uno che prevedeva l'utilizzo di schiuma, ricostruiti in scala 1:2 per motivi di spazio.

Dal test sperimentale è emerso che:

- l'assorbitore in schiuma si comporta effettivamente bene a compressione; ha registrato una decelerazione media di circa 18 g
- non è stato possibile effettuare un confronto realistico schiuma-honeycomb perché l'altro assorbitore ha ceduto di schianto
- il modello numerico replica abbastanza bene il comportamento dell'assorbitore ma è più rigido
- in sostanza il modello numerico sottostima le reali capacità dell'assorbitore

Possibili sviluppi futuri sono certamente quelli di svolgere una campagna di test sperimentali maggiormente accurata e di rendere più ripetibile il processo di costruzione dell'assorbitore.

Al momento è stato infatti possibile svolgere un solo test e la costruzione dell'assorbitore è stata realizzata senza alcuna esperienza pregressa.

Il modello numerico in scala 1:2 sembra sottostimare le reali capacità della crash box.

Ciò è legato a diversi fattori, non ultime le difficoltà di avere mesh sufficientemente accurate e quelle di ottenere informazioni accurate sugli adesivi.



---

## Bibliografia

1. **MUSP, Laboratorio.** *www.musp.it.* [Online]
2. **S.p.a, Picchio.** *www.picchio.com.* [Online]
3. *Transverse and longitudinal crushing of aluminum-foam filled tubes.* **Hall, I.W., Guden, M. e Claar, T.D.** 46, s.l. : Pergamon, 2002, Scripta materialia, p. 513-518.
4. **Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G.** Metal foams; a Design guide. 2000, p. 6-20.
5. **Bigi, Dante.** *La sicurezza passiva dell'autoveicolo.* 1a edizione. 2004. p. 101-114.
6. *Crashworthiness design for functionally graded foam filled thin-walled structures.* **Sun, G., et al.** 2009, Materials Science and Engineering A.
7. *The energy absorption characteristics of double-cell tubular profiles.* **Chung Kim Yuen, S. e Nurick G.N., Starke R.A.** 2008, Latin American Journal of Solids and Structures , p. 289-317.
8. *Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam.* **Seitzberger, M., et al.** 2000, International Journal of Solids and Structures, Vol. 37, p. 4125-4147.
9. *Transverse and longitudinal crushing of aluminum-foam filled tubes.* **Hall, I.W., Guden, M. e Claar, T.D.** 46, s.l. : Pergamon, 2002, Scripta Materialia, p. 513-518.
10. *Thin-walled structures as impact energy absorbers.* **Abramowicz, W.** 41, s.l. : Elsevier, 2003, Thin-walled structures, p. 91-107.
11. *Analysis of crash response of aluminium foam-filled front side rail of a passenger car.* **Kim, H-S.** 2001, International journal of crashworthiness.
12. *Carbon skinned aluminium foam nose cones for high performance circuit vehicles.* **Chirwa, E.C., Latchford, J. e Clavell, P.** 2003, International Journal of Crashworthiness.
13. *Crashworthiness design for functionally graded foam filled thin-walled structures.* **Sun, G., et al.** 2009, Materials science and engineering.
14. **I'Automobile, Federation Internationale de.** Article 259-2010 Appendix J: Technical regulations for Production Sports Cars (Group CN).
15. **Bertocchi, Alessandro e Ludovico, Francesco.** Un materiale innovativo: la schiuma metallica Caratterizzazione, ottimizzazione ed analisi FEM della lega AlSi10. 2007.

16. *Empty and foam-filled circular aluminium tubes subjected to axial and oblique quasi-static loading.* **Borvik, T., et al.** 2003, International Journal of Crashworthiness, p. 481-494.
17. **Hao, Lion Kok, et al.** *Impact energy absorption fo concentric circular tubes.* Department of Engineering Design & Manufacture, University of Malaya. Kuala Lumpur : s.n.
18. *Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler.* **Gameiro, C.P. e Cirne, J.** 9, Settembre 2007, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 49, p. 1029-1037.
19. *Axial crushing of metal foam-filled square columns: Foam density distribution and impactor inclination effects.* **Shahbeyk, S., Vafai, A. e Petrinic, N.** 43, s.l. : Elsevier, 2005, Thin walled structures, p. 1818-1830.
20. *Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler.* **Hanssen, A.G., Langseth, M. e Hopperstad, O.S.** 24, s.l. : Pergamon, 2000, International journal of impact engineering, p. 347-383.
21. *Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application.* **Zarei, H.R. e Kroger, M.** 46, s.l. : Elsevier, 2008, Science Direct, p. 214-221.
22. *Crashworthiness assessment of square aluminum extrusions considering the damage evolution.* **Qiao, J.S., Chen, J.H. e Che, H.Y.** 44, s.l. : Elsevier, 2006, Thin-walled structures, p. 692-700.
23. *Finite element modeling of stress distribution in the cutting path in machining of discontinuously reinforced aluminium composites.* **Shetty, Raviraj, et al.** 4, 2008, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3.
24. **Bertocchi, Alessandro e Ludovico, Francesco.** *Un materiale innovativo: la schiuma metallica Caratterizzazione, ottimizzazione ed analisi FEM della lega AlSi10.* 2007.
25. **Systemes, Dassault.** *Abaqus User Manual.* 2007.
26. **Boria, Simonetta e Forasassi, Giuseppe.** *Numerical simulation of crash-test for a formula SAE car.* Pisa : s.n.