# POLITECNICO DI TORINO

# Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi

Studio di una crash box tramite metodi statistici con l'obiettivo di ottimizzare le prestazioni



Relatore: Prof. Lorenzo Peroni Candidato: Matteo Mercuri

# Sommario

1. Introduzione	5
1.1. Scopo della tesi	5
1.2. Paraurti e crash-box	6
1.3. AZT – impatto frontale per il calcolo della classe assicurativa	8
2. Ottimizzatore vs Stocastico	12
2.1. Ottimizzatore – Adaptive response surface method (ARSM)	12
<ul> <li>2.2. Metodi stocastici</li> <li>2.2.1. Modified Extensible Lattice Sequence (MELS)</li> <li>2.2.2. Latin HyperCube (LHC)</li> <li>2.2.3. Hammersley</li> </ul>	<i>14</i> 14 15 16
3. Preparazione del modello	18
3.1. Passaggio dal CAD alla Mesh	18
<ul> <li>3.2. Impostazione del modello</li> <li>3.2.1. Materiali</li> <li>3.2.2. Proprietà degli elementi</li> <li>3.2.3. Vincoli e contatti</li> </ul>	22 22 26 26
4. Analisi dei risultati	28
4.1. Situazione nominale	28
4.2. Situazione migliore dopo 365 simulazioni	31
4.3. Situazione di partenza -ARSM	34
<ul> <li>4.4. Metodi stocastici a confronto</li> <li>4.4.1. Post-processing metodi stocastici</li> <li>4.4.2. Commento soluzione – Latin HyperCube</li> </ul>	<i>36</i> 39 43
4.5. Variazione materiale	45
4.6. Variazione altezza dei rinforzi	46
4.7. Variazione globale	49
5. Conclusioni	55
Bibliografia	59

Alla mia famiglia

"Lasciare che i nostri problemi vengano risolti dal caso è delle volte una soluzione. Cercare di programmarli è una manipolazione del caso stesso."

# 1. Introduzione

# 1.1. Scopo della tesi

Nel campo della progettazione automobilistica, un'importante attività è legata a minimizzare l'avvenimento di incidenti e danni ad essi legati. La sicurezza può essere migliorata sia tramite azioni "attive" che "passive". Le prime sono legate all'impiego di strumentazioni che permettono di prevenire tali urti. Mentre le seconde si focalizzano sulla progettazione stessa dei componenti per ridurre l'aggressività degli incidenti.

Lo studio del seguente progetto di tesi è stato rivolto **all'ottimizzazione** dal punto di vista geometrico e della scelta dei materiali di una **crash-box**, componente utilizzato per l'assorbimento dell'energia in impatti a bassa velocità nelle odierne automobili. Le varie soluzioni sono state paragonate tra di loro andando a valutare principalmente tre parametri:

- Forza scaricata sui supporti: come verrà più volte ripetuto, questo, come anche l'energia assorbita, è un fattore importante nel caso di urti a bassa velocità. In quanto è necessario ridurre al minimo i danni inflitti al telaio.
- Energia assorbita: maggiore è tale quantità e minore sarà l'effetto dell'urto risentito dagli occupanti nell'abitacolo. Verrà quindi favorito il fenomeno del *folding* del componente studiato.
- Massa: riguarderà solamente la crash-box in quanto sarà l'unica componente della quale verranno modificate geometria e materiale. Successivamente tale fattore entrerà in secondo piano poiché la sua variazione sarà minima.

Tale argomento è stato deciso e sviluppato in collaborazione con **Tecnocad s.r.l.**, società che guida un gruppo di aziende del settore automotive organizzate e strutturate per coprire l'intero processo di sviluppo, dal concept iniziale, allo sviluppo completo, fino alla fase di avvio produttivo.

Il fine di tale studio non è solamente legato al miglioramento del componente in sé, ma anche cercare di ottenere un **numero di simulazioni** e un **tempo di calcolo** ridotte per giungere a tale situazione migliorativa. Andremo infatti a paragonare due differenti approcci, uno basato sull'impiego di un **ottimizzatore** e l'altro di **metodi statistici**. Entrambe presenti nel software **HyperStudy**.

Questi obiettivi sono stati principalmente raggiunti tramite l'impiego dei software di seguito elencati:

*"HyperMesh"*: utilizzato per eseguire la fase di pre-processing del modello FEM, generato partendo da una geometria CAD.

- "Radioss": è un risolutore utilizzato per valutare e ottimizzare le prestazioni di un prodotto per problemi non lineari e caratterizzati da sollecitazioni in campo dinamico.
- "HyperStudy": è un software multidisciplinare che permette di esplorare e ottimizzare le performance dei componenti analizzati, partendo ovviamente dal modello FEM appena citato.
- "HyperView": utilizzato per eseguire la fase di post-processing, per visualizzare la coerenza fisica con la realtà dei risultati ricavati.

I dati raccolti sono stati in seguito paragonati e analizzati con "Excel".

#### **1.2.** Traversa e crash-box

Le priorità legate alla protezione contro gli urti variano a seconda della **velocità dell'auto**:

- Fino a 15 km/h l'obiettivo principale è quello di andare a ridurre i costi di riparazione.
- > Tra 15 e 40 km/h è fondamentale andare a evitare gravi **danni ai pedoni**.
- > Oltre i 40 km/h bisogna garantire la **protezione degli occupanti**.

La traversa anteriore è solitamente connessa ai longheroni longitudinali tramite un elemento deformabile, definita "*crash-box*" (Figura 1). Cosa che, nella maggior parte dei casi, si ritrova anche per quello posteriore. Tale sistema non può essere considerato come un modulo strutturale isolato. La sua progettazione deve essere ottimizzata tenendo in considerazione le caratteristiche degli elementi di sicurezza e delle zone deformabili dell'automobile.



Figura 1: Traversa anteriore e crash-box della Mercedes Classe A

Gli scopi della traversa (anteriore/posteriore) sono:

- Assorbire l'energia all'inizio dell'urto e guidare la forza nella restante parte del telaio;
- > Minimizzare il danno a velocità medio/bassa, così da ridurre i costi assicurativi;
- Guidare la forza legata all'impatto ad alta velocità opportunamente nel telaio, in maniera tale da ridurre la sua focalizzazione in una parte specifica. Ciò ridurrebbe la possibilità di incorrere in fratture di altri componenti e lesioni per i passeggeri.

Spesso l'ottenimento dei requisiti pocanzi citati avviene mediante strutture in alluminio, che derivano da considerazioni su vari livelli:

- > Opportuna scelta della **tipologia di lega**;
- Considerazioni progettuali;
- > Metodi di fabbricazione.

L'energia legata all'impatto è tipicamente distribuita nei seguenti elementi:

- > **Traversa**: caratterizzata da flessione e deformazione plastica;
- > **Crash-box**: assorbe energia deformandosi plasticamente;
- > Attacco dei supporti: non deve deformarsi plasticamente.

Se si volesse considerare un approccio più globale, dal punto di vista energetico, bisognerebbe andare anche a considerare l'energia dissipata nelle sospensioni durante l'urto del veicolo e quella nel contatto pneumatico-strada. Dipende dalla natura dell'impatto a cui il veicolo è sottoposto. Oggigiorno questa viene normalmente definita utilizzando innanzitutto modelli numerici e poi confermata per via sperimentale [1].

Sono presenti diversi fattori che devono essere tenuti in considerazione durante la progettazione dei componenti qui trattati. Il più importante è legato all'**abilità del sistema di assorbire sufficiente energia** da soddisfare i requisiti della casa madre. Altri sono ad esempio: ridurre il più possibile il peso e i costi, ottenendo prestazioni ottimali o nei limiti dell'accettabilità. Per quanto concerne i costi bisogna considerare non solo quelli iniziali ma anche quelli legati alla fase di riparazione a seguito dell'impatto.

Esistono diversi metodi di produzione e materiali che possono essere utilizzati per la realizzazione delle crash box. La maggior parte di essi prevedono l'assemblaggio di due o più lamine sottili con sezioni aperte. Queste comprendono:

Processo	Saldatura per punti	Fissaggio adesivo	Rivettatura	Clinciatura
Materiali	Principalmente acciai	Materiali ingegneristici	Materiali ingegneristici (duttilità e resistenza a frattura)	Materiali ingegneristici (duttilità e resistenza a frattura)
Geometria e proprietà estetiche	Danneggiamento dei rivestimenti. Distorsione e stress residui	Nessuna	Sporgenza	Fessura su una faccia e sporgenza sull'altra
Performance	Alta resistenza al taglio	Bassa resistenza al taglio	Alta resistenza al taglio	Media resistenza al taglio
Produttività	Alta	Bassa (lungo curing time)	Intermedio	Alto (non è richiesta la preparazione)

Tabella 1: Metodi di produzione di una crash-box

Tuttavia, oggigiorno quasi il 100% delle **travature in alluminio** per sistemi legati all'impatto sono **estruse** e più del 95% sono a sezione chiusa. Inoltre, impiegare lamiere di alluminio lucidate, anodizzate ed estruse per la realizzazione delle traverse permette di ottenere prestazioni paragonabili con quelle ottenute da acciai cromati.

La ragione principale che porta a preferire la fabbricazione tramite estrusione, rispetto alle altre, è la libertà di progettazione. Ovvero, la possibilità di realizzare profili multicamera con spessore differente (Figura 2). Tuttavia, passare da una struttura a camera singola a camera multipla richiede l'applicazione di leghe di alluminio che siano estremamente facili da estrudere. Per tale motivo solitamente sono impiegate quelle della serie 6xxx (es. EN AW-6008, EN AW-6082).

Grazie al basso costo delle apparecchiature di estrusione e dei tempi di consegna ridotti, le soluzioni che possono essere impiegate per soddisfare specifiche richieste sono caratterizzate da un'elevata flessibilità riducendo così sia i tempi di produzione che i costi [2].



Figura 2: Sezione trasversale di profili multicamera

# **1.3.** AZT – impatto frontale per il calcolo della classe assicurativa

In questo progetto di tesi è stata utilizzata la prova ad **impatto frontale** implementata dall'**AZT** (*Allianz Zentrum für Technik GmbH*) per eseguire lo studio delle prestazioni per le diverse soluzioni costruttive presentate. È utile a questo punto descrivere in cosa consiste e le finalità di tale procedura.

Gli impatti frontali causano, nel 50% dei casi, **lesioni fatali**. Per questo motivo sono stati introdotti i *crash test*, in maniera tale da avere una base legislativa per determinare una base minima per garantire la sicurezza alla guida. Questi sono standardizzati e vengono eseguiti con specifiche condizioni che sono stabilite dai produttori di automobili e dalle società assicurative in maniera tale da rendere pubbliche le diverse debolezze di un veicolo [3].

La validazione del modello matematico è uno step fondamentale per passare all'esecuzione di tali test. Solitamente sono eseguite prove assiali, a temperatura ambiente, sia quasistatiche che dinamiche. La prima serve principalmente per caratterizzare il modello e per tale scopo si esegue in una macchina di prova di tipo idraulica. La seconda, invece, prevede l'utilizzo di una macchina *"drop weight"*, rappresentata in Figura 3. La crash-box viene posizionata tra la traversa regolabile (*"tool"*) e la cella di carico (*"load cell"*), impostando opportunamente il peso desiderato e l'altezza di tale carico si riesce ad approssimare l'**energia che viene conferita al sistema durante un fantomatico urto** [2].



Figura 3: Rappresentazione schematica e foto del macchinario utilizzato nelle prove per urti

L'AZT comprende una serie di prove di impatto utilizzate per determinare la classe assicurativa di un determinato veicolo nel mercato tedesco. Queste, solitamente, ricadono sotto il nome di "**urto assicuratori**". Molte compagnie assicurative spesso utilizzano tali prove come base per la determinazione dei **premi**.

Il processo per la loro esecuzione viene definito dalla *German Insurers Association* (GDV) e ufficializzato da una commissione che è sotto la direzione di un garante autonomo. La preparazione include una valutazione tecnica della facilità di riparazione del veicolo e la sua abilità nell'interazione durante un urto. Le liste delle classi assicurative sono formulate il primo ottobre di ogni anno dal garante e la GDV si occupa di caricarle sul proprio sito.

Le categorie o le classi del modello, così come i limiti degli indici che le caratterizzano, vengono definite mediante criteri statistici in copertura totale o parziale. Il che porta ad avere 25 categorie per la prima e 24 per l'altra. Un determinato veicolo rientra in una classe più che in un'altra in base al premio di rischio (RP – "*Risk Premium*"), questo permette di definire il limite inferiore e superiore di queste. Le prove per verificare la categoria di appartenenza vengono eseguite diversi mesi prima che l'auto venga messa sul mercato e sono condotte da rappresentanti della GDV in stretta collaborazione con tecnici e ingegneri provenienti dalla casa madre. Una peculiarità interessante di tali verifiche è che se un nuovo

veicolo può essere assimilato, ad esempio, ad una serie di modelli esistenti, allora questo assumerà la classe di tale gruppo [4].

Entrando più nel pratico, andremo ora a visionare come effettivamente tale prova viene eseguita nel nostro caso di interesse: **impatto frontale**.



Figura 4: Schema e impostazione per l'impatto frontale - AZT

Nello schema di Figura 4 si comprende come il veicolo debba essere posizionato rispetto alla barriera. Considerando, inoltre, che l'altezza della barriera deve eccedere quella della parte frontale del veicolo, come si può ben vedere nello schema di sinistra.

Le lettere qui riportate indicano:

- ➤ U = 40% di B
- **B** = larghezza complessiva del veicolo (senza considerare gli specchietti)
- ➢ R = raggio di 150 mm
- ➤ F = veicolo da testare
- ▶  $\mathbf{A}$  = angolo di 10°.

L'urto va eseguito impostando le seguenti condizioni:

- Massa del veicolo: peso a vuoto + 75 kg di passeggero + serbatoio pieno (o zavorra equivalente)
- > 1 manichino, 50% maschio, in posizione di guida con cintura di sicurezza
- **Velocità di marcia**: 15 km/h ± 1 km/h
- Esente da qualsiasi spinta propulsiva interna o esterna al veicolo nel momento dell'impatto
- > Batteria connessa e motore acceso
- Sistemi di sicurezza in funzione (pretensionatore delle cinture e airbag)
- > Freni rilasciati e cambio in posizione neutrale.

Le misurazioni che vanno fatte invece sono:

Allineamento dell'asse e il posizionamento dell'auto (secondo quanto prima indicato) prima e dopo l'impatto

- > Massa del veicolo dopo l'impatto
- > Accelerazione del veicolo lungo il longherone sinistro e destro.

Inoltre, per avere un veicolo sicuro bisognerebbe essere in grado di aprire completamente gli sportelli anteriori dopo l'impatto [5].

# 2. Ottimizzatore vs Statistico

Nella realizzazione di questo progetto di tesi sono stati utilizzati due importanti sezioni dell'HyperStudy: **ottimizzatore** e **statistico**. Queste verranno copiosamente paragonate da un punto vista numerico nelle sezioni successive. Tuttavia, per la loro più profonda comprensione, è doveroso entrare più nello specifico e vedere le loro peculiarità.

Va innanzitutto sottolineato che oggigiorno la progettazione prevede la realizzazione di sistemi sempre più complessi. Con i progressi della progettazione assistita dal calcolatore (CAE), modelli e simulazioni/analisi dall'alto costo computazionale stanno diventando sempre più accurate e ciò permette di ottenere svariati miglioramenti durante la progettazione. Tuttavia, questi fattori non permettono di raggiungere elevate prestazioni in fase di ottimizzazione di un progetto. Infatti, questa richiede un elevato numero di simulazioni, ognuna delle quali richiede una o più analisi da svolgere, prima che venga identificata la soluzione ottimale. Da qui nasce la spontanea necessità di ricercare modelli approssimativi che permettano di ridurre il tempo di calcolo. È per questo motivo che vengono qui paragonati due differenti approcci, per **arrivare alla soluzione ottimale nel minor tempo possibile**.

# 2.1. Ottimizzatore – Adaptive response surface method (ARSM)

L'RSM (response surface method) fa parte dei metodi DOE (design of experiments), usati per approssimare una funzione incognita per la quale solo pochi valori sono noti. L'RSM deriva da discipline scientifiche nelle quali esperimenti fisici sono eseguiti in maniera tale da studiare la relazione incognita tra un set di variabili e di output del sistema, andando ad eseguire solo un numero limitato di esperimenti. Queste relazioni sono quindi modellate utilizzando un modello matematico, chiamato "*response surface*". Ovviamente quando gli esperimenti sono costosi bisogna ridurre al minimo il loro numero, se si vuole ridurre il costo globale dell'ottimizzazione.

Nella progettazione ingegneristica, analisi ad elevato costo computazionale sono intese come esperimenti costosi e quindi l'RSM può essere utilizzato anche in questo campo. Qui però non si parla più di esperimenti ma di **surrogati**, ne consegue che anche il loro numero va ridotto al minimo. Esistono svariati esempi del loro impiego, anche in casi di studio multidisciplinari. Per esempio, Renaud e Gabriel hanno sviluppato approssimazioni di RSM di sistemi multidisciplinari [6, 7].

Il lavoro pionieristico in tale campo di approssimazione del processo di ottimizzazione va attribuito a Box e Draper [8]. Questi hanno sviluppato un approccio euristico definito *"evolutionary operation"*, che costruisce in **maniera iterativa** una *"responde surface"* **attorno** 

**all'optimum** a partire dall'iterazione successiva. Ovviamente non furono gli unici ad implementare una strategia del genere. Infatti, molti altri si basano sul modificare i range di variazione durante le iterazioni.

Il metodo qui trattato (*Adaptive responde surface method*) è stato introdotto per raggiungere, durante il processo di ottimizzazione, un **ottimo globale con un numero limitato di iterazioni**, evitando di rimanere bloccati in uno locale. I problemi che possono essere trattati con questo metodo sono caratterizzati dalle seguenti caratteristiche:

- Il conseguimento di un particolare obiettivo dipende dall'output delle simulazioni, alle quali sono associati un elevato numero di stati intermedi o processi computazionali complicati;
- L'analisi ha un elevato costo computazionale;
- I risultati ottenuti dalle simulazioni sono deterministici, i.e., facendo più volte il run di queste, con gli stessi dati di input, si ottengono sempre i medesimi output.

La forma classica di un problema di ottimizzazione non lineare è [9]:

Minimizzare	$f(\vec{x})$	
	$\vec{x} = [x_1, \dots, x_n]$	n]
Soggetta a	$h_j(\vec{x}) = 0$ ,	$(j=1,\ldots,J)$
	$g_k(\vec{x}) \leq 0$	$(k=1,\ldots,K)$

$$x_{L,i} \le x_i \le x_{U,i}$$
  $(i = 1, ..., n)$  (4)

(1)

(2)

(3)

I limiti inferiori e superiori  $x_{L,i}$  e  $x_{U,i}$  nell'equazione (4) sono **limiti variabili iniziali** imposti dal costruttore.

Applicando i "surrogati", solitamente è necessario eseguire approssimazioni sia dell'obiettivo che dei vincoli a causa della potenza di calcolo elevata nel valutare tali funzioni. Tuttavia, in questo caso analizzeremo solamente l'approssimazione della funzione obiettivo:

Minimizzare 
$$\tilde{f}(\vec{x})$$
 (5)  
 $\vec{x} = [x_1, ..., x_n]$ 

Quindi questa (5) è il surrogato della funzione reale.

L'ARSM risolve il problema originale (definito dalla formula (1) alla (4)) tramite la costruzione di una **serie di problemi surrogati**.

Lo standard RSM per prima impiega una strategia di tipo sperimentale per generare dei punti di progettazione in uno spazio di progetto, dopo applica o il modello del primo ordine (6) o del secondo (7) per approssimare il sistema incognito:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \tag{6}$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j$$
(7)

Dove:

- >  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii} \in \beta_{ij}$  rappresentano **coefficienti di regressione**;
- *x<sub>i</sub>* sono le variabili di progetto;
- ➢ y è la risposta del sistema.

#### Mentre l'ARSM impiega direttamente l'equazione (7).

Le principali caratteristiche di tale approccio sono:

- L'ARSM è un metodo di default. Tuttavia, se il numero delle variabili di input è elevato o se vengono richiesti degli ottimi globali, allora conviene andare ad utilizzare il *Global Response Search Method*.
- È un metodo di ottimizzazione efficiente e può essere utilizzato per determinare direttamente la soluzione finale.
- Nel caso in cui una simulazione dovesse fallire è possibile ignorarla o terminare un'ottimizzazione. Una volta omessa la simulazione fallita, l'ottimizzatore tornerà ad eseguire i run a metà tra quello fallito e la situazione iniziale.
- Seguirà il seguente flow-chart:
  - 1- Valutazione della situazione iniziale e delle sue perturbazioni
  - 2- Creazione di una response surface
  - 3- Ricerca l'ottimo per tale superficie
  - 4- Valutazione dell'ottimo: le condizioni impostate sono soddisfatte? **Si**, allora l'ottimizzazione è compiuta. **No**, tali condizioni vengono poste **nello step 3** e il ciclo continua fino a quando non si raggiunge il soddisfacimento delle condizioni.

## 2.2. Metodi stocastici

#### 2.2.1. Modified Extensible Lattice Sequence (MELS)

La sequenza a reticolo è del tipo **quasi-randomica o a bassa discrepanza**. Questa viene utilizzata per distribuire in maniera equa i punti nello spazio minimizzando i vuoti e la creazione di ammassamenti in zone specifiche. Questa proprietà rende tale metodo un eccellente schema DOE di riempimento. Il MELS ha inoltre la proprietà di essere estensibile, il che significa che può prendere un gruppo esistente di dati in uno spazio e aggiungerne di nuovi per fornire un'eguale copertura. Il numero di simulazioni viene definito dall'utilizzatore del software.

Questo metodo viene utilizzato per i seguenti fini [10]:

- Per esplorare l'intero spazio di progettazione e creare funzioni di approssimazione per definire gli output.
- Per ottenere una funzione di approssimazione di buona qualità, un numero minimo di run dovrebbe essere eseguito. Sono necessarie (N+1)(N+2)/2 simulazioni per approssimare un polinomio del secondo ordine, assumendo che la maggior parte degli output siano vicini a questo all'interno di un range di variazione delle variabili di ±10%. Un numero aggiuntivo di simulazioni (pari al 10%) viene solitamente richiesto per ottenere una certa ridondanza, permettendo di avere un postprocessing più affidabile. Il numero di simulazioni richiesto viene fornito dal software come default.
- Per aggiungere dati alla matrice di inserimento<sup>1</sup> per usare la proprietà di estensibilità. Mentre ogni dato può essere incluso, la migliore performance di tale metodo la si aspetta quando tali dati provengono da un esistente MELS.
- Quando il MELS viene utilizzato con l'intento di costruire una matrice test che potrebbe però essere un sottogruppo di quella impostata come input, a causa della proprietà di estensibilità di tale metodo. Per cercare di evitare questo si deve cambiare il "*Random Seed*", impostandolo con un numero che sia maggiore del numero di simulazioni impostato.

### 2.2.2. Latin HyperCube (LHC)

Una griglia quadrata contente posizioni campione è definita quadrato "latino" **se e solo se** esiste **un solo campione in ogni riga e colonna**. Quindi, il LHC è un'estensione di tale concetto nel riempimento di uno spazio e viene qui generalizzato ad un numero arbitrario di dimensioni.

Quando uno spazio di progettazione di N variabili viene campionato, il range di variazione di ognuna di esse viene diviso in M intervalli equiprobabili. Questi M punti di campionamento sono quindi posizionati in maniera tale da soddisfare le condizioni sopra imposte. Di conseguenza, tutti gli esperimenti hanno un unico livello per ogni variabile di input e il numero dei punti di campionamento (M) non è funzione del numero degli input (N).



Figura 5: Esempio LHC

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La **matrice di inserimento** (o meglio detta *"inclusion matrix"*) permette di accettare in maniera opzionale dati disponibili come input provenienti da altre analisi. Questo permette di risparmiare del tempo durante il processo di ottimizzazione. Infatti, l'ottimizzatore può utilizzare dati già ottenuti precedentemente.

Le caratteristiche di tale metodo sono le seguenti [10]:

- Per ottenere una funzione di approssimazione di buona qualità, un numero minimo di simulazioni dovrebbe essere eseguito. Ne sono necessarie (N+1)(N+2)/2 per approssimare un polinomio del secondo ordine, assumendo che la maggior parte degli output siano vicini a questo all'interno di un range di variazione delle variabili di ±10%. Un numero aggiuntivo di simulazioni (pari al 10%) viene solitamente richiesto per ottenere una certa ridondanza, permettendo di avere un post-processing più affidabile. Il numero di simulazioni richiesto viene fornito dal software come default.
- Ogni dato nella matrice di inserimento viene combinato con quelli eseguiti nella fase di post-processing. Ogni punto della matrice eseguita che fa già parte dei dati di inclusione non verrà ripetuto.

#### 2.2.3. Hammersley

Il campionamento secondo il **metodo Hammersley** appartiene alla categoria dei metodi **quasi-Monte Carlo**. Questa tecnica usa un generatore quasi-randomico, basato sui punti di Hammersley, per campionare in maniera uniforme un gruppo *hypercube*.

Per comprendere meglio tale metodo consideriamo il caso bidimensionale. L'ordine di punti *m* viene definito prendendo tutti i numeri nel range da 0 a  $2^m - 1$  e interpretandoli come frazioni binarie. Chiamando questi numeri  $x_i$ , allora le corrispondenti  $y_i$  sono ottenute facendo l'inversione della cifra binaria di  $x_i$ . Per esempio, considerando *m*=2 le  $x_i$  saranno date da  $0.00_2$ ,  $0.10_2$ , e  $0.11_2$  oppure (0, 1/2, 1/4, 3/4). Invertendo i bit avremo quindi il secondo componente, il che conduce alla serie di punti (0,0), (1/2,1/4), (1/4,1/2), e (3/4,3/4) [11].

Il set di punti può essere generalizzato troncando t bit per ogni coordinata. Il risultato è noto come una rete binaria (t,m,s), dove s rappresenta la dimensione dello spazio (in questo caso s=2). Riportiamo di seguito esempi con m=6, s=2 e vari gradi di t (Figura 6).



Figura 6: Esempio punti di Hammersley [11]

Le caratteristiche di tale metodo sono le seguenti [10]:

- È un efficiente metodo di campionamento che permette di avere stime affidabili di statistiche descrittive degli output utilizzando un numero ridotto di campioni rispetto ad un metodo completamente randomico.
- > Fornisce proprietà buone e uniformi su hypercube k-dimensionali.
- Per ottenere una funzione di approssimazione di buona qualità, un numero minimo di run dovrebbe essere eseguito. Sono necessarie (N+1)(N+2)/2 simulazioni per approssimare un polinomio del secondo ordine, assumendo che la maggior parte degli output siano vicini a questo all'interno di un range di variazione delle variabili di ±10%. Un numero aggiuntivo di simulazioni (pari al 10%) viene solitamente richiesto per ottenere una certa ridondanza, permettendo di avere un post-processing più affidabile. Il numero di simulazioni richiesto viene fornito dal software come default.
- Ogni dato nella matrice di inserimento viene combinato con quelli eseguiti nella fase di post-processing. Ogni punto della matrice eseguita che fa già parte dei dati di inclusione non verrà ripetuto.

# 3. Preparazione del modello

In questa sezione verranno mostrati i vari step per passare dal CAD fornito dall'azienda ad un modello numerico che possa aiutare al meglio a raggiungere gli obiettivi di tale lavoro. Il tutto viene fatto considerando due importanti fattori: coerenza con i risultati sperimentali e riduzione del costo computazionale. Per tale fine verranno introdotte delle approssimazioni.

# 3.1. Passaggio dal CAD alla Mesh

La situazione di partenza è la seguente:



Figura 7: Situazione di partenza

È possibile notare, facendo riferimento ai colori, la presenza dei seguenti componenti:

- **Giallo**: traversa anteriore
- **Blu**: crash-box
- > Rosa: supporti, fungono da collegamento con i longheroni
- Grigio: saldature, utilizzate per il collegamento delle crash-box sia con i supporti che con la traversa (Figura 8).



Figura 8: Focus sulle saldature

Su parti quali traversa anteriore e crash-box notiamo la presenza di alcuni fori. Questi possono avere principalmente tre funzioni:

- Alleggerimento del componente: probabilmente da alcune analisi preliminari è stato osservato che non tutte le zone intervengono direttamente alla sopravvivenza del pezzo in caso di urti o sollecitazioni esterne in generale.
- Fissaggio di cavi: la struttura analizzata si trova nella parte frontale del veicolo, la quale è ricca di elementi quali sistema aria condizionata, motore, radiatore, etc.
- Guidare il cedimento dei componenti in un determinato modo: questo permette ad esempio di evitare di intaccare altri elementi presenti nella parte anteriore (ciò vale principalmente per urti a bassa velocità).

Andrebbero inoltre considerati i fori presenti nei supporti, tuttavia essi hanno solamente scopo di collegamento e non necessitano quindi di un'analisi approfondita.

Nonostante la trattazione finora condotta abbia fatto emergere l'importanza di tali fori, la **loro presenza non verrà considerata** al fine della semplificazione del modello. Inoltre, la presenza di saldature "fisiche", come quelle rappresentate in Figura 8, è del tutto superflua. Questo perché il software qui impiegato permette di utilizzare una loro rappresentazione matematica, andando così a tener conto della loro funzione durante le varie sollecitazioni.

Quanto appena detto ci porterà alla seguente situazione:



Figura 9: Superfici della situazione di partenza semplificata

In questo modo abbiamo ottenuto un sistema semplificato composto da sole superfici che ben si presta ad essere modellato tramite **elementi bidimensionali**. La scelta di questi piuttosto che quelli tridimensionali viene dalla considerazione che tali componenti sono solitamente di spessore che non eccede i 3mm e di superficie alquanto estesa. Questo giova all'obbiettivo di ridurre il tempo di calcolo e la potenza computazionale richiesta alla risoluzione del problema. Come già annunciato nel par. 1.3, le prove verranno condotte secondo quanto definito dall'**AZT**. Quindi, dovrà essere introdotta l'apposita **barriera**:



Figura 10: Barriera AZT

Considerando che i supporti dovranno essere connessi con i longheroni, verranno introdotte anche delle apposite superfici (rappresentate in grigio in Figura 11) che serviranno a simulare tale collegamento.

Lo schema finale sarà:



Figura 11: Superfici del sistema completo semplificato e focus sulla vista dall'alto

Dal focus di Figura 11, viene mostrato che la **distanza tra la barriera e la traversa viene ridotta al minimo**, mantenendo però una certa distanza per evitare fenomeni di compenetrazione. Tale correzione è stata eseguita dopo aver analizzato i dati provenienti da una prima simulazione e notando che circa 5 minuti di calcolo venivano utilizzati per far avvenire l'accostamento. Questa considerazione non è affetta da approssimazioni, in quanto sulla barriera è stata imposta una velocità costante di 16 km/h, come verrà mostrato in seguito. Inoltre, viene notato che i risultati ottenuti combaciano.

Un'altra considerazione che è possibile avanzare dalla Figura 11 è che la crash-box interessata all'impatto è solamente una. Quindi, su di essa verrà focalizzata la nostra attenzione.

Mediante l'opzione suggerita da **HyperMesh**, "2D AutoMesh", è stata generata la seguente mesh del complessivo:



Figura 12: Mesh del complessivo, con rispettive dimensioni degli elementi dei vari componenti<sup>2</sup>

È opportuno a questo punto commentare ed esporre i criteri che sono stati seguiti per la scelta delle dimensioni degli elementi. Per quanto riguarda:

- Barriera e appoggio dei supporti: la loro meshatura è alquanto grossolana in quanto verranno considerati rigidi e indeformabili. Quindi, non danno alcun contributo ai fini dell'analisi.
- Crash-box (entrambe), supporti e traversa anteriore: essendo queste parti fondamentali per l'analisi, la mesh diventa più fitta soprattutto nelle crash-box e nei supporti per comprendere al meglio la loro interazione. Questo è fondamentale per verificare la forza che viene poi scaricata sui longheroni, che in tale tipologia di impatto (a bassa velocità) non devono essere deformati plasticamente. Tale richiesta vale sempre per il principio di sostituire/riparare il minor numero possibile di parti.

Volendo modificare altezza dei rinforzi e spessore di una sola crash-box, questa verrà divisa nelle seguenti componenti evidenziando anche la nomenclatura che sarà utile in seguito:



Figura 13: Crash-box analizzata

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Le dimensioni qui riportate sono espresse in millimetri.

Per quanto riguarda il tipo di elemento, la scelta è ricaduta su quello a quattro nodi. Questo accade in quanto:

- Nel calcolo di tensioni e deformazioni permette di ottenere all'interno dell'elemento stesso degli andamenti lineari anziché costanti come avviene nel caso di quello a 3 nodi.
- È un elemento isoparametrico, il che permette di eseguire un'integrazione<sup>3</sup> numerica definendo i punti di Gauss all'interno dell'elemento. Questo è un grandissimo vantaggio, poiché permette di ridurre i tempi di calcolo.

# 3.2. Impostazione del modello

In questa sezione andremo a descrivere l'impostazione del modello, specificando:

- > Materiali
- Proprietà degli elementi
- Carichi e vincoli
- Contatti

L'analisi di seguito commentata mostra cosa accade **25 ms a seguito dell'impatto**.

#### 3.2.1. Materiali

Come già annunciato, andremo in questo progetto a paragonare diverse **leghe di alluminio** in maniera tale da comprendere quale sia la più adatta a raggiungere i fini proposti. Tuttavia, prima di procedere è opportuno specificare le caratteristiche di ognuno e la base teorica seguita.

Essendo una prova ad impatto, certamente avremo a che fare con un'elevata deformazione plastica dei componenti. Inoltre, avverà un noto comportamento dei metalli: l'**incrudimento**. Per molti problemi in campo plastico, il comportamento a incrudimento del materiale è semplicemente caratterizzato dalle curve tensione-deformazione. Tuttavia, se la storia di carico varia, una descrizione di questo tipo non risulta essere più valida.

La teoria di **plasticità incrementale** è generalmente utilizzata in questi metodi di calcolo. Tali modelli sono sviluppati come dipendenti o no dalla velocità di deformazione. Il primo caso viene utilizzato per un gran numero di casi, specialmente quelli in cui i metalli si trovano a bassa temperatura rispetto a quella di fusione.

Qui come modello costitutivo di plasticità è stato definito quello di **Johnson-Cook**. Qui il materiale ha un comportamento lineare quando lo stress equivalente, calcolato secondo i criteri di von Mises, è inferiore rispetto a quello di snervamento. Per valori maggiori, il suo

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Questa è necessaria ad esempio per il calcolo della matrice di rigidezza.

comportamento è plastico. La relazione che descrive la **tensione durante la deformazione plastica** è:

$$\sigma = \left(a + b \cdot \varepsilon_p^n\right) \cdot \left(1 + c \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot (1 - T^{*m}) \tag{8}$$

Dove:

- >  $\sigma$  = tensione elastica + componente plastica
- $\triangleright \ \varepsilon_p$  = deformazione plastica
- $\succ$  *a* = tensione di snervamento
- $\succ$  *b* = modulo di incrudimento
- $\blacktriangleright$  *n* = esponente di incrudimento
- $\blacktriangleright$  *c* = coefficiente di *strain rate*
- $\succ$   $\dot{\varepsilon} = strain \ rate$
- > m = esponente di temperatura

$$T^* = \frac{T - 298}{T_{melt} - 298}$$

>  $T_{melt}$  = temperatura di fusione (espressa in Kelvin)

In questo studio non saremo interessati alla parte che tiene conto dell'effetto termico. In quanto le caratteristiche dell'AZT prevedono che le prove vengano eseguite a **temperatura ambiente**.

Il materiale di partenza fornito dall'azienda è: EN-AW 5083 H19. È una lega alluminiomagnesio, di impiego generale, caratterizzata da eccellenti caratteristiche di resistenza all'ossidazione e alla corrosione; caratteristiche meccaniche non elevatissime (per questo viene eseguito un processo di incrudimento – H19), formabilità buona e saldabile per fusione. Le caratteristiche impostate sono:

Densità $[g/cm^3]$	2.7
Modulo di Young - E [GPa]	70
Coefficiente di Poisson - $v$	0.3
a [MPa]	160
b [MPa]	354
n	0.3
$\sigma_{max} [MPa]$	378
$\varepsilon_{max}$	0.2

Tabella 2: Caratteristiche EN-AW 5083 H19

Passeremo ora in rassegna le proprietà degli altri materiali proposti. Alcuni di questi sono meno performanti dal punto di vista della resistenza, ma comunque utilizzati per la realizzazione di profilati in alluminio in ambiente automobilistico.

	Densità [g/ cm <sup>3</sup> ]	Modulo di Young - E [ <b>GPa</b> ]	Coefficiente di Poisson - v	a [MPa]	b [MPa]	n	σ <sub>max</sub> [MPa]
EN-AW 6022 T6	2.7	70	0.3	183	220	0.138	341
EN-AW 6060 T6	2.7	69	0.3	127	236	0.21	269
EN-AW 7108 T5	2.7	69	0.3	345	250	1	370
EN-AW 6014 T6	2.7	69	0.3	200	177	0.3	296
EN-AW 6014 T6	2.7	70	0.3	90	150	0.3	168

Tabella 3: Caratteristiche materiali - 1

Sono stati utilizzati altri due materiali, ma invece di aver utilizzato il tipo Johnson-Cook è stato impiegato una legge che permette di definire la risposta del materiale inserendo i seguenti parametri:

- Curva tensione deformazione plastica (prima della tensione di snervamento il valore della deformazione è nullo)
- Modulo di Young E
- Densità
- Coefficiente di Poisson v

La tabella viene di seguito riportata:

	Densità [g/ cm <sup>3</sup> ]	Modulo di Young - E [ <b>GPa</b> ]	Coefficiente di Poisson - ν	Curva σ – ε <sub>p</sub>
EN-AW 6082 T6	2.7	67.44	0.3	Figura 14
EN-AW 6181A T6	2.7	71.6	0.3	Figura 15

Tabella 4: Caratteristiche materiali - 2



Figura 14: Curva  $\sigma - \varepsilon_p$  EN-AW 6082 T6



Figura 15: Curva  $\sigma-\varepsilon_p$  EN-AW 6181A T6

#### 3.2.2. Proprietà degli elementi

In questa sezione, seguendo la logica del software verranno anche imposti gli spessori ai vari componenti. Infatti, riportiamo:

	Spessori
Crash box	2
Traversa anteriore	2
Supporti	2
Parete AZT e appoggi	2
Parete esterna (Figura 13)	2
Rinforzo superiore (Figura 13)	2
Rinforzo inferiore (Figura 13)	2

Tabella 5: Spessori dei componenti - sono espressi in mm

L'imposizione di uno spessore pari a 2 in tutti i componenti non è casuale, ma è semplicemente dettata da una questione di comodità nella preparazione del modello. In quanto la parete AZT e gli appoggi, come già annunciato, saranno considerati come elementi indeformabili. Mentre la traversa si trova ad avere spessori che non vanno oltre i 3-4 mm quindi tale scelta è più che accettabile ai fini progettuali.

Focalizzandoci sui punti salienti, le impostazioni prevederanno la presenza di:

- > Card Image: **P1\_SHELL**
- > Ishell<sup>4</sup>: **QEPH** shell formulation

La prima si commenta da sé, in quanto stiamo utilizzando elementi bidimensionali, materiali omogenei ed isotropi e stiamo analizzando un problema di natura meccanica. Il secondo invece indica una formulazione generica. Questa può essere utilizzata in quanto, la geometria è abbastanza semplice e la mesh è di qualità discreta, difficilmente si incorrerà in problemi di sotto-integrazione. In caso contrario è conveniente utilizzare la formulazione di Hourglass.

#### 3.2.3. Vincoli e contatti

I vincoli che andranno imposti sono:

- ➢ Traslazione lungo *x* della parete
- Velocità lungo x della parete (16 km/h)
- > Vincolo alla traslazione e alla rotazione dei supporti.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Formulazione per elementi a 4 nodi.

Fare riferimento allo schema di Figura 16 per la direzione.

Per facilitare la loro introduzione sono stati introdotti quelli che vengono definiti "*rigid body*". Tramite il loro ausilio è stato possibile assegnare una fantomatica massa al sistema paragonabile a quella di un'automobile, circa pari a **1200kg**.



Figura 16: Assegnazione dei rigid body

Da notare che in questo caso è stata considerata la **parete che va contro l'auto** e non il contrario. Questa scelta è legata ad un **risparmio di tempo di calcolo**, dato che in caso contrario sarebbe dovuto avvenire lo spostamento di un elevato numero di elementi la cui utilità ai fini del progetto è nulla. Inoltre, dal punto di vista fisico, considerare o l'uno o l'altro è equivalente.

Per quanto riguarda i contatti sono state utilizzate le seguenti opzioni:

#### > INTER\_TYPE7

> INTER\_TYPE11

La prima è un'interfaccia multiuso adoperata nel caso di queste tipologie di impatti. Questa principalmente va a modellare il contatto tra una superficie principale e un gruppo di nodi secondari. Tuttavia, presenta una limitazione fondamentale: **non permette di considerare contatti bordo a bordo**. Caso che si presenta nell'interazione tra: crash-box e traversa, crash-box e supporti. Per tale motivo è stato introdotto il *TYPE11*, che si basa sugli stessi principi del primo ma che permette di considerare contatti di questo tipo.

Inoltre, in questa tipologia di contatti viene richiesto di introdurre un coefficiente di attrito Coulombiano<sup>5</sup>, per andare a tener conto di fenomeni di "**smorzamento**" che possono avvenire durante l'urto.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Questa quantità è stata posta uguale a 0.12, in accordo a valori tipici che si hanno nel caso di contatto metallo – metallo.

# 4. Analisi dei risultati

In questa sezione verranno commentati i risultati ottenuti durante le diverse prove. L'iter di analisi che è stato seguito ha previsto i seguenti step:

- 1. Provare un **gran numero di combinazioni di spessori delle parti** della crash-box da analizzare (**365**) e cercare la soluzione ottimale.
- 2. **Combinando** il metodo **ASRM** (*Adaptive Surface Response Method*)<sup>6</sup> con **uno dei metodi stocastici**, cercare la soluzione migliore e confrontarla con quella ottenuta nello step 1. Questa viene definita confrontando i diversi metodi statistici e definendo il migliore in base a delle considerazioni di seguito spiegate. Il fine di ciò è vedere se sia possibile giungere ad una configurazione ottimale utilizzando un numero ridotto di simulazioni.
- 3. Con la combinazione ottimale di spessori ottenuti nello step 2, **confrontare i diversi materiali** riportati nella Tabella 3 e Tabella 4.
- 4. Definito il materiale migliore e in base alle caratteristiche dello step 2, **variare** l'altezza dei rinforzi, sempre con lo scopo di definire la soluzione ottimale, con il miglior metodo statistico definito nello step 2.
- 5. Invece di eseguire una variazione dei parametri passo dopo passo, questi verranno fatti **cambiare contemporaneamente nella medesima analisi**.

Ricordiamo che il tempo di simulazione qui analizzato è di 25 ms.

## 4.1. Situazione nominale

La situazione di partenza, in base alle caratteristiche fornite dall'azienda, è la seguente:

Materiale	EN-AW 5083 H19
Energia assorbita [J]	8506.0967
Massa di una crash-box [kg]	0.3506
Forza scaricata sui supporti [kN]	167.46
Parete esterna (Figura 13)	2
Rinforzo superiore (Figura 13)	2
Rinforzo inferiore (Figura 13)	2

Tabella 6: Situazione nominale

Notiamo che la **massa** qui riportata ha un **valore alquanto esiguo**. Perciò, la minimizzazione di questo parametro non sarà uno dei vincoli stringenti che andrà a guidare la scelta della

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Questo permette di fornire una soluzione prestante con un numero di simulazioni ridotte.

configurazione ottimale. Invece, per quanto concerne la **forza scaricata sui supporti** è stato definito, in accordo con le esigenze progettuali, come **limite accettabile**: **170 kN**.

Analizzando gli output, iniziamo a vedere come si deforma inizialmente il nostro componente:



Figura 17: Prima e dopo l'impatto

Qui si può ben vedere che la deformata della crash-box a seguito dell'impatto non è delle migliori, in quanto assume un **andamento verso il basso** che potrebbe andare a compromettere il funzionamento di qualche componente presente nella zona anteriore del veicolo. Quello che cerchiamo è una situazione più possibile simile a quella del *folding*, che inoltre permette di avere un assorbimento di energia di una certa rilevanza.

Introduciamo ora la curva delle energie e quella di forza spostamento:



Figura 18: Curve energia interna, cinetica e totale – situazione nominale



Figura 19: Curva forza spostamento – situazione nominale

Nella Figura 18 oltre alla curva relativa all'**energia interna**, che è di particolare interesse per quanto concerne la quota parte **assorbita**, sono state riportate anche:

- Energia cinetica: per far dimostrare che la scelta di 25 ms come tempo di simulazione è accettabile, perché alla fine del fenomeno studiato questa quantità deve tendere a zero.
- Energia totale: per avere una "prova del nove", in quanto deve rimanere costante durante l'impatto.

Un'altra verifica da fare è vedere se considerare l'output *"Energia interna"* come metro di paragone sia corretto o meno. Questo è possibile **confrontando il valore massimo di tale quantità con l'area sottesa alla curva forza-spostamento** di Figura 19:

Massimo energia interna	Area sottesa alla curva
8506.0967 J	8834.1290 J

Abbiamo uno **scarto del 3.71%**, valore largamente accettabile. Questa verifica è stata condotta anche per altre simulazioni con diversi parametri per essere maggiormente certi della considerazione fatta.

Riportiamo nella Figura 20 cosa accade subito dopo il picco iniziale:



Figura 20: Deformata e relativa curva forza - tempo nell'istante 1.7 ms

Notiamo nell'istante relativo a 1.7 ms un'importante deformazione plastica del componente, visibile nelle varie rientranze e protuberanze formatesi nella parte inferiore della parete

esterna. Questo è il **motivo principale per cui la crash-box si piega verso il basso**. Prima di ciò la situazione era alquanto simile alla configurazione indeformata. In seguito, vediamo che il carico necessario per continuare con la deformazione si abbassa notevolmente.

Anche il secondo picco a 9.45 ms merita un minimo di attenzione (cerchiato in verde nel grafico di Figura 20):



Figura 21: Deformata istante 9.45 ms

Qui vediamo la formazione di un'importante protuberanza nella parte superiore della parete esterna. Questa si sarebbe dovuta formare all'inizio per avere un *folding* ottimale.

## 4.2. GRSM – 365 simulazioni

Per eseguire queste simulazioni, come situazione iniziale, sono stati presi in considerazione i dati di Tabella 6 ed è stato impiegato l'ottimizzatore impostando l'opzione: *General Response Search Method* (GRSM). Questo approccio permette di eseguire sì un'operazione di ottimizzazione ma di non fermare la ricerca della situazione migliore una volta raggiunto un optimum globale, come invece accade per l'ARSM. Ciò è stato fatto per cercare di analizzare il maggior numero possibile di combinazioni di spessori. Infatti, riguardo a questi, è stata selezionata una variazione di 0.1 mm per ogni parte della crash-box, per evitare di avere numeri ingegneristicamente insensati. Le condizioni introdotte nel software per la definizione dell'optimum sono state:

- Energia assorbita > 9000 J
- > Forza scaricata sui supporti < 167.459 kN
- Massa della crash-box < 0.3506 kg

Questo ha permesso di trovare la seguente configurazione:

Superficie Estema [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]	Simulazione n°
1.9	3	1.6	9025.9072	0.3503	157.9084	311

Tabella 7: Situazione migliore -1 - 365 simulazioni

Tuttavia, data l'elevata mole di risultati, dopo 365 simulazioni è stato opportuno definire nella fase di post-processing dei vincoli più blandi che permettessero di definire un **optimum più consono alle richieste progettuali**. Questo è stato fatto in maniera tale da andare a vedere se effettivamente ci fossero delle soluzioni migliori e poco distanti dai vincoli imposti, cercando in questo modo compromessi migliori.

- Energia assorbita > 9000 J
- ➢ Forza scaricata sui supporti < 172 kN</p>

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]
2.3	1.9	1.4	9827.7285	0.37180	169.64735
2.1	2.9	1.6	9749.5605	0.37380	170.51227
2.2	2.2	1.7	9805.415	0.37330	171.35515
2.2	1.7	2.3	9884.0762	0.37670	171.33995
2.2	2.6	1.4	9818.832	0.37480	171.22983
2.2	1.8	1.7	9652.5186	0.36430	171.61249
2.3	2.2	1.4	9966.5684	0.37840	169.70097
2.2	2.3	2	9994.9033	0.38280	171.53348
2.2	2	2.2	9975.3438	0.38110	171.42354
2.1	1.4	3	9848.1992	0.37450	171.15338
2.3	1.6	1.5	9719.7432	0.36740	169.42546
2.2	2.6	1.9	10066.923	0.38720	171.63876
2.2	2.5	2.1	10107.112	0.38990	171.62645
2.2	2	1.9	9841.5986	0.37350	171.42245
2.2	2.4	1.5	9806.0029	0.37280	172.90677
2.2	2.2	2.2	10041.359	0.38550	171.39413

Allora avremo la seguente tabella:

Tabella 8: Situazioni migliori -2- 365 simulazioni

Tra queste, ne sono state selezionate tre in particolare poiché rimangono più fedeli con quello che è il vincolo inizialmente imposto per la forza scaricata sui supporti.

Un altro importante fattore da tener conto è dopo quante simulazioni ognuno di questi risultati qui selezionato è stato ottenuto:

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]	Simulazione n°
2.3	1.9	1.4	9827.7285	0.37180	169.64735	41
2.3	2.2	1.4	9966.5684	0.37840	169.70097	130
2.3	1.6	1.5	9719.7432	0.36740	169.42546	233

Tabella 9: Situazioni migliori - 2

La più performante è la combinazione ottenuta dopo 130 simulazioni (sottolineata in verde nella tabella). Questa permette di avere la massima energia assorbita, rispetta il vincolo

imposto sulla forza e la massa presenta un incremento solamente del 7.34% (rispetto alla configurazione nominale). La differenza con le altre a livello di forza e massa è davvero minima, per tale motivo è stata scelta questa e non la terza ad esempio.

Come fatto per la situazione nominale, andiamo anche qui ad analizzare l'output, introducendo per prime le curve dell'energia e quella di forza-spostamento:



Figura 22: Curve energia interna, cinetica e totale – situazione migliore dopo 365 simulazioni



Figura 23: Curva forza spostamento – situazione migliore dopo 365 simulazioni

Nelle curve di Figura 22 non ci sono particolari differenze da commentare rispetto a quelle di Figura 18. Tuttavia, confrontando le curve forza – spostamento (Figura 19 e Figura 23) è come se in questo caso avessimo un triplo cedimento. Infatti, vediamo dalle immagini che i primi due interesseranno il componente nel suo complessivo, mentre l'ultimo caratterizzerà principalmente i rinforzi.

Alla fine, quello che ne risulterà:



Figura 24: Viste della deformata – 365 simulazioni

Qui si raggiunge quasi completamente il fine di ottenere un *folding* ottimale. Certamente possiamo notare che la crash-box è spinta a deformarsi principalmente in direzione x senza quindi componente lungo z. Questo va imputato a deformazioni quasi-simmetriche della parte superiore e inferiore della parete esterna.

# 4.3. Situazione di partenza -ARSM

Prima di iniziare con il paragone, va ricordato che in questo step è stato utilizzato precedentemente il metodo ARSM dell'ottimizzatore e che la situazione di partenza imposta è quella definita nella Tabella 6. L'impiego inziale dell'ARSM è legato a due motivi:

- > Dare uno **spunto iniziale** dal quale partire per cercare la soluzione ottimale.
- La configurazione migliore verrà definita con un numero esiguo di simulazioni, essendo le variabili poco numerose.

Infatti, la ricerca viene ultimata automaticamente dopo 19 simulazioni. Imponendo come vincoli:

Energia assorbita > 8506.0967 J

- ➢ Forza scaricata sui supporti < 167.46 kN</p>
- Massa della crash-box < 0.3506 kg

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]
2	1.7	2	9057.3848	0.3438	166.90842
2	2	1.7	8518.9365	0.343	164.53181
2	1.5	2.2	8553.5771	0.3442	167.55113
2	1.7	2.1	8564.9473	0.3462	167.54048

Le configurazioni che sembrano essere maggiormente di rilievo sono:

Tabella 10: Situazioni migliori - ARSM

La prima soluzione permette di avere un netto miglioramento in termini energetici e di massa rispetto alla configurazione nominale. Anche dal punto di vista della forza vediamo un leggero miglioramento. Il tutto a seguito di una variazione di soli 0.3mm dello spessore del rinforzo superiore.

Passando direttamente alla curva forza – spostamento vediamo:



Figura 25: Curva forza spostamento – situazione migliore ARSM

In questo caso notiamo che l'urto serve per sviluppare principalemente gli inarcamenti che interessano tutte le parti della crash-box e che si vedono nella figura in alto a sinistra, subito dopo il primo picco. Tuttavia, nell'istante **21.6 ms**, viene registrato un **rigonfiamento del rinforzo inferiore** che diventa nettamente pronunciato, se ne forma uno anche in corrispondenza di quello superiore e un accenno nelle parte alta della superficie esterna. Ovviamente, tra i due cedimenti, il **primo** risulta essere più gravoso, in quanto **persiste indisturbato per un tempo maggiore**. Questa affermazione nasce dal fatto che il carico dall'istante 1.8 a 11.16 ms, risente di un **salto di circa 60 kN**.

Quello che si ottiene alla fine è:



Figura 26: Viste della deformata - ARSM

Notiamo di nuovo la tendenza ad avere una certa inflessione in direzione z. Anche se comunque la situazione è migliorata rispetto a quella nominale (Figura 17), è presente un folding maggiore.

## 4.4. Metodi statistici a confronto

Con la configurazione ottenuta grazie all'ARSM andremo ad impostare le impostazioni delle simulazioni eseguite con i metodi stocastici<sup>7</sup>. Qui verranno eseguite **80 simulazioni per ogni caso di studi**.

Oltre alle condizioni degli spessori e del materiale, in questo caso possiamo andare a definire altri parametri alquanto importanti:

- Tipo di distribuzione dei dati
- > Valor medio, che coincide con il valore nominale di partenza
- Varianza

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Quelli utilizzati saranno: *MELS, LHC, Hammersley, Simple random*. Di quest'ultimo non è stata impostata una descrizione teorica in quanto è un metodo quasi del tutto randomico.

Queste quantità vengono definite per cercare di guidare ulteriormente la definizione degli spessori. In quanto, sappiamo che con l'ARSM abbiamo trovato un ottimo globale ma **nulla vieta che intorno a tale configurazione sia presente una combinazione tale che giovi meglio alle nostre richieste progettuali** e che l'ottimizzatore non sia stato in grado di trovare. Proprio per questo motivo andremo a consideare le seguenti impostazioni:

- Distribuzione: Normale
- > Valore medio degli spessori ( $\mu$ ): definiti in verde nella Tabella 10
- > Varianza ( $\sigma^2$ ): 0.05

La scelta di una varianza non così elevata è dettata dalla scelta di volersi discostare poco da quella che sembra essere la soluzione ottimale per i vincoli precedentemente elencati.

Quindi, facendo riferimento alla nota formula della distribuzione normale:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$
(9)

In questo caso l'impostazione di vincoli prima dell'avvio delle simulazioni, come invece avveniva nel caso dell'ottimizzatore, risulta essere qui alquanto inutile. In quanto i metodi statistici vengono principalmente utilizzati per **definire un legame tra le variabili utilizzate e gli output**. Gli unici vincoli che verranno imposti sono quelli nella fase di post-processing per fare una prima scrematura dei risultati e cercare il più consono tra quelli proposti:

- Energia assorbita > 9057.3848 J
- ➢ Forza scaricata sui supporti < 172 kN</p>

Noteremo che l'utilizzo di un metodo di distribuzione normale ha fatto sì che i numeri ottenuti siano poco ingegneristici e quindi verranno di seguito arrotondati.

Facendo riferimento alle indicazioni di cui prima, riportiamo le soluzioni progettuali ottenute per i diversi metodi:

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]
2.1881922	1.7659622	1.7987034	9656.9209	0.3648	171.47365
2.2223675	1.697758	2.0247122	9831.1865	0.3723	171.4003
2.1579341	1.8303273	2.1881922	9826.9951	0.3718	171.08797
2.1946609	2.142153	2.1818774	9998.5723	0.3826	171.431
2.2298439	1.9223675	1.8053392	9858.9961	0.3735	171.35004
2.1637419	1.3858164	2.006727	9400.8418	0.3574	170.78444
2.2012966	1.6053238	2.002242	9723.2979	0.3674	171.6311
2.1696625	1.6433499	1.7624135	9494.1406	0.3582	171.49712
2.2081146	1.8356791	1.7776325	9750.7324	0.3684	171.42555
	M	odified Extensibl	e Lattice Seguen	ce	

Tabella 11: Soluzioni accettabili metodo MELS

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]			
2.1938405	1.9993238	1.8575688	9786.0938	0.3713	171.29996			
2.2368231	1.4230438	1.9500192	9680.8291	0.3669	170.89656			
2.2860495	1.3098207	1.6643195	9632.4756	0.3635	169.30849			
2.226792	1.6283742	1.8711401	9757.9258	0.3684	171.43465			
2.2454649	1.7158819	2.0093503	9895.1299	0.3765	171.8027			
2.1594626	1.1671654	2.2458182	9476.8809	0.3584	171.07573			
2.2040312	1.7571302	2.1132832	9828.6553	0.3735	171.42496			
2.1867984	1.7553046	1.9234647	9724.4707	0.3674	171.40881			
2.2610543	1.8873593	1.7634497	9893.4775	0.3752	170.51601			
2.2116653 1.4825681 2.0721817		9703.3467	0.3674	171.62599				
	Latin HyperCube							

Tabella 12: Soluzioni accettabili metodo LHC

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]			
2.1642921	1.69124	2.2589095	9796.5889	0.3704	171.37285			
2.1736132	2.181621	1.6555505	9710.4033	0.3679	171.8036			
2.1932321	1.7	2.1039635	9783.8213	0.3706	171.66313			
2.203619	1.5491795	1.7410905	9534.9375	0.3596	171.39337			
2.214465	1.8508205	1.9896167	9855.29	0.3738	171.31674			
2.2258407	1.4427741	2.1804171	9783.7324	0.3718	170.79942			
2.2378331	1.7712499	1.8470005	9841.3291	0.3723	170.94957			
2.2505518	1.6287501	2.045286	9858.0781	0.3755	171.8989			
2.2787752 1.3569602 1.6006035		9601.874	0.3621	169.7999				
	Hammersley							

Tabella 13: Soluzioni accettabili metodo Hammersley

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]			
2.2282442	1.7201471	1.6701388	9724.3701	0.3655	171.75432			
2.1714538	1.5568178	1.7555355	9443.6875	0.3564	171.86852			
2.1887876	1.4174993	1.8836145	9502.248	0.3586	171.41687			
2.1904039	2.2110751	1.4711052	9680.3613	0.3665	171.05624			
2.2126052	1.3755052	1.9480471	9617.8154	0.3621	171.5118			
2.2130076	1.5209391	1.8185657	9607.9678	0.3621	171.61548			
2.1751816	1.6514497	1.7887013	9527.3779	0.3604	171.39546			
	Simple Random							

Tabella 14: Soluzioni accettabili metodo Simple Random

In queste tabelle sono stati riportati quelli che potevano sembrare i risultati migliori per i vari casi, questo è stato fatto stringendo sempre più il vincolo associato alla forza scaricata

sui supporti. È stato più volte rimarcato questo aspetto appunto perché la si vuole ridurre ai minimi termini e la più controllata possibile, per evitare di sostituire componenti onerosi in caso di urti a media-bassa velocità.

Per quanto appena detto manteniamo valida la considerazione di rimanere con una forza al di sotto dei 170 kN, quindi comprendiamo che:

- Sia MELS che Simple Random non riescono a soddisfare tale condizione, seppur consentono di ottenere valori dell'energia assorbita alquanto spinti.
- La selezione viene eseguita tra:

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]	Metodo
2.2860495	1.3098207	1.6643195	9632.4756	0.3635	169.30849	LHC
2.2787752	1.3569602	1.6006035	9601.874	0.3621	169.7999	Hamm.

Tabella 15: Confronto tra le due soluzioni ottimali - LHC vs Hammersley

La scelta finale ricade sul metodo "*Latin HyperCube*" principalmente per due motivi:

- Il metodo Hammersly, come già detto, è basato su un generatore di numeri quasirandomico. Quindi, a noi giova più un principio che segue un certo criterio piuttosto che affidarsi alla fortuna.
- > Le soluzioni fornite dal metodo LHC sono migliori, seppur di poco.

Proveremo ora ad **estremizzare il metodo statistico**, lasciando quindi inalterate tutte le impostazioni di partenza ma cambiando solamente il numero delle simulazioni da eseguire, che verrà posto pari a **20**. Avremo allora:

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]			
2.151	1.911	1.627	9667.451	0.364	171.447			

Tabella 16: Situazione ottimale - 20 simulazioni LHC

Viene così raggiunta una situazione che non è tanto distante da quella riportata in verde in Tabella 15. Tuttavia, necessita di miglioramenti ulteriori.

#### 4.4.1. Post-processing metodi stocastici

Una nota importante va fatta per i risultati che tali metodi stocastici conferiscono, in alcuni casi anche dopo un esiguo numero di simulazioni, nella fase di post-processing.

Come già annunciato il loro principale impiego è comprendere come una variabile di input possa essere legata ad un output, in maniera tale da sapere che una certa variazione percentuale di essa causa un determinato effetto sulla soluzione. Oppure quanto una variabile sia più o meno importante nell'ottenimento di un risultato (**grafico di Pareto**), spesso ciò è ricavabile anche dopo "poche" simulazioni.

A questo punto, facendo riferimento principalmente al metodo *Latin HyperCube*, analizziamo più nel dettaglio tali aspetti.

Nella sezione "Post-processing" abbiamo in automatico il diagramma di Pareto, in generale questo tipo di grafico può aiutare a stabilire quali sono i maggiori fattori che hanno influenza su un dato fenomeno, ed è quindi un utile strumento nelle analisi, nei processi decisionali, nella gestione della qualità ed in numerosi altri settori. Vediamo infatti:



Figura 27: Grafico di Pareto - Massa



Figura 28: Grafico di Pareto - Forza scaricata sui supporti



Figura 29: Grafico di Pareto - Energia interna

Da queste immagini notiamo chiaramente che il **fenomeno risente fortemente dello spessore della superficie esterna** e in maniera pressoché simile di quello del rinforzo superiore e inferiore. Questo aspetto può essere ulteriormente sottolineato nel momento in cui viene preso in considerazione il grafico a dispersione. Per spiegare ciò vengono riportati di seguito solamente due casi esemplari:



Figura 30: Grafico a dispersione - Energia interna vs Spessore Superficie esterna



Figura 31: Grafico a dispersione - Energia interna vs Spessore Rinforzo superiore

Dalla Figura 30 si comprende come con 80 simulazioni sia possibile tirar fuori un certo **andamento significativo** che permetta di legare, l'**energia interna e lo spessore della superficie esterna**. Tuttavia, questo non accade quando viene fatto con il rinforzo superiore<sup>8</sup>. Ciò può essere riconducibile al fatto che la superficie esterna, come già detto, ha un maggior peso nella definizione dell'output. I **rinforzi** quindi necessiteranno di un **numero di simulazioni maggiore** per stabilire un **andamento** minimamente **sensato**.

Passando ora i dati raccolti su *Excel*, andiamo effettivamente a vedere quali sono gli andamenti che è possibile tirare fuori con relative equazioni:

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Questo fenomeno si verifica analogamente con il rinforzo inferiore e con gli altri output finora analizzati (massa e forza scaricata sui supporti).



Figura 32: Tendenza Energia assorbita vs Spessore Superficie esterna



Figura 33: Tendenza Forza scaricata sui supporti vs Spessore Superficie esterna



Figura 34: Tendenza Massa Crash-box vs Spessore Superficie esterna

Un aspetto molto importante visibile da questi andamenti è che ogni output tende ad incrementare aumentando lo spessore della superficie esterna. Solamente dal punto di vista dell'energia questo non è un problema, ma lo è negli altri due casi, forza e massa. Quindi, comprendiamo che seppur gli spessori dei **rinforzi** non contino molto, stando a quanto riportato dal diagramma di Pareto, bisogna comunque cercare una **configurazione tale che permetta di compensare questi effetti**.

Inoltre, introducendo le distribuzioni normali dello spessore della superficie esterna generate con i vari metodi, possiamo comprendere perché alla fine della nostra analisi LHC e Hammersley sono stati identificati come migliori.



Figura 35: Distribuzioni normale dello spessore della superficie esterna con i diversi metodi stocastici

Tali metodi permettono di avere una distribuzione alquanto fitta attorno al punto medio e abbastanza uniforme lontano da esso.

#### 4.4.2. Commento soluzione – Latin HyperCube

Iniziamo con l'illustrare la deformata finale del componente in Figura 36. A prima vista notiamo una certa somiglianza tra la deformata qui riportata e quella ricavata a seguito di 365 simulazioni (Figura 24). Questo è un fattore estremamente importante, in quanto viene da sé il vantaggio in termini di tempo computazionale che viene raggiunto eseguendo 19+80 simulazioni contro 365.



Figura 36: Viste della deformata - LHC

Infatti, ad ulteriore conferma di quanto detto prima, riportiamo la curva forza – spostamento:



Figura 37: Curva forza spostamento – situazione migliore Latin HyperCube

Anche in questo caso possiamo notare una certa somiglianza con quanto abbiamo già ricavato. Infatti, sovrapponendo le due curve avremo:



Figura 38: Forza - spostamento, Latin HyperCube vs 365 simulazioni

Queste mostrano come sia presente una quasi totale coincidenza fino ad uno spostamento di 34.5 mm, per poi discostarsi di poco l'una dall'altra. Ciò porta inevitabilmente ad avere che per la configurazione del LHC l'energia assorbita sia leggermente inferiore, ma massa e forza scaricata sui supporti lo sono.

### 4.5. Variazione materiale

In base alla soluzione progettuale ottenuta con il metodo *Latin HyperCube*, andremo ora a vedere se cambiando materiale della sola crash-box riusciamo ad ottenere un miglioramento delle prestazioni o meno. I dati di input saranno:

- Materiali: Tabella 3 e Tabella 4
- > Spessori:

Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]			
2.3	1.3	1.7			
Tabella 17: Chassari anglisi matariali					

Tabella 17: Spessori analisi materiali

I dati sono stati arrotondati per tener conto di una situazione più reale dal punto di vista ingegneristico. Questi parametri forniranno i seguenti risultati:

Materiali	Energia [J]	Forza scaricata [kN]	
EN-AW 5083 H19	9654.0342	167.12973	
EN-AW 6022 T6	9780.2236	188.16943	
EN-AW 6060 T6	8036.0005	160.61621	
EN-AW 7108 T5	9998.8262	205.33156	
EN-AW 6014 T6	9119.7402	172.79924	
EN-AW 6063 T4	5634.5605	112.83743	
EN-AW 6082 T6.1	8487.124	168.45396	
EN-AW 6181A T6	8564.3311	167.29913	

Tabella 18: Risultati scelta materiali

Valutando quanto riportato in tabella, è possibile affermare che la **soluzione ottimale rimane quella con il materiale di partenza** (EN-AW 5083 H19). Probabilmente ciò va imputato al fatto che l'ottimizzazione iniziale è stata eseguita con la 5083 come lega di riferimento e non con una di quelle sopra riportate. Tuttavia, va ricordato che questa è quella maggiormente utilizzata per tali componenti e per certi aspetti anche più performante delle altre.

## 4.6. Variazione altezza dei rinforzi

Ponendo gli **spessori** ricavati dalle simulazioni con *Latin HyperCube* e continuando ad utilizzare il **materiale di partenza**, per quanto mostrato prima, passiamo ora all'analisi della variazione dell'altezza dei setti. Queste analisi verranno eseguite con il metodo LHC senza passare prima per l'ottimizzatore. Vengono quindi impostati i seguenti parametri:

- Distribuzione: Normale
- > Valore medio delle altezze ( $\mu$ ): zero
- > Varianza ( $\sigma^2$ ): 9

**L'ultimo fattore** è stato posto così alto in quanto non sapendo effettivamente come si comporti il fenomeno conviene coprire un range il più ampio possibile di valori. Tuttavia, per motivi legati alla *mesh quality*, è stato necessario un limite superiore e uno inferiore a tale variazione (Figura 39).

Per quanto riguarda la variazione dell'altezza dei setti, faremo riferimento al seguente schema:



Figura 39: Schema variazione altezza setti

Per fare il confronto dei risultati ottenuti a seguito delle 80 simulazioni, imponiamo i seguenti vincoli:

- Energia assorbita > 9654.0342 J (Tabella 18)
- ➢ Forza scaricata sui supporti < 170 kN</p>

Questi permetteranno di avere:

H rinforzo superiore	H rinforzo inferiore	Energia [J]	Forza scaricata [kN]
0.196121	0.041663	9657.605	168.5657
0.952647	-0.24645	9654.19	169.2177

Tabella 19: Soluzioni accettabili variazione altezza setti – H = altezza

Ovviamente tra le due soluzioni quella che maggiormente permette di soddisfare i vincoli imposti è la prima. In quanto presenta, un'energia maggiore e una forza scaricata sui supporti inferiori. Tuttavia, se venisse confrontata con la soluzione di partenza di Tabella 18, noteremmo un miglioramento in termini energetici e quasi inesistente e un **peggioramento in termini di forza**. Quindi, non vi è convenienza a fare modifiche di questo tipo.

Ricordando che in questa analisi è stato impiegato il metodo *Latin HyperCube*, conviene andare a vedere cosa è possibile tirar fuori dal post-processing. Iniziamo con il diagramma di Pareto, in quanto grazie a questo possiamo comprendere qual è la variabile sulla quale bisogna focalizzarsi per cercare di ricavare degli andamenti che leghino input e output.



Figura 40: Grafico di Pareto – Energia interna



Figura 41: Grafico di Pareto - Forza scaricata sui supporti

In Figura 40 notiamo come l'**energia** sia maggiormente **influenzata** dalla **variazione del rinforzo inferiore**, questo risultato era lecitamente attendibile. In quanto facendo riferimento alla situazione di progetto nominale, Figura 17, la deformata tende ad andare verso il basso. Quindi, più il rinforzo inferiore è prestante e più questo fenomeno viene evitato e il pezzo riesce ad avere un comportamento simile al *folding*. L'importanza di tale parte si vede meno nel diagramma relativo alla forza.

Da quanto appena detto comprendiamo che conviene analizzare come l'altezza del rinforzo inferiore vada ad interagire con gli output qui riportati.



Figura 42: Tendenza Energia assorbita vs Altezza rinforzo inferiore



Figura 43: Tendenza Forza scaricata sui supporti vs Altezza rinforzo inferiore

Da queste tendenze riportate possiamo comprendere come la descrizione dei due fenomeni avvenga in maniera ottimale **per valori speculari**. Ovvero:

- L'energia assorbita presenta un andamento più consono per valori globalmente positivi dell'altezza.
- > La forza scaricata sui supporti invece lo presenta per quelli negativi.

Inoltre, è possibile comprendere che per avere valori soddisfacenti di energia interna conviene portare il rinforzo inferiore verso il basso. In quanto superata una certa soglia, è possibile vedere come vi sia un salto di circa 170 J e di 4 kN. Tuttavia, i risultati oscillano attorno ad una cifra che è più bassa rispetto ai 9654.0342 J da superare.

Quindi, in caso di cambiamento della soluzione progettuale conviene sempre spostare il rinforzo inferiore verso il basso. Anche se comunque, dalle immagini di cui sopra, si comprende come lo spostamento di tale rinforzo non sia appropriato.

Per completezza viene riportato anche il grafico a dispersione del rinforzo superiore, tenendo presente però che di esso non viene eseguita l'analisi su *Excel* in quanto privo di significato.



Figura 44: Grafico a dispersione - Energia interna vs Altezza rinforzo superiore

# 4.7. Variazione globale

Andremo ora a concentrare tutti gli step prima visti in un'unica analisi, eseguendo nuovamente 80 simulazioni. Quindi, verranno qui mostrati i risultati ottenibili andando a variare tutti i parametri contemporaneamente (spessori, altezza rinforzi e materiale). La situazione di partenza che verrà qui analizzata è riportata in Tabella 20.

L'analisi è stata impostata utilizzando di nuovo il metodo "*Latin HyperCube*" e distribuzione gaussiana per la definizione di spessori e altezze dei rinforzi. Per quanto riguarda la scelta del materiale è stata impostata un'opzione per sceglierli in maniera randomica. Ciò è stato necessario poiché ad essi sono stati assegnati dei particolari codici identificativi (ID) che hanno permesso di considerarli come variabili di progetto.

Materiale	EN-AW 5083 H19
Energia assorbita [J]	8506.0967
Massa crash-box [kg]	0.3506
Forza scaricata sui supporti [kN]	167.46
Parete esterna	2
Rinforzo superiore	2
Rinforzo inferiore	2

Tabella 20: Richiamo valori e risultati nominali di progetto

Sono state considerate le seguenti situazioni:

- > Spessori
  - o Distribuzione: Normale
  - Valore medio degli spessori ( $\mu$ ): definito in Tabella 20
  - Varianza ( $\sigma^2$ ): 0.108
- > Altezze
  - o Distribuzione: Normale
  - Valore medio delle altezze ( $\mu$ ): 0
  - o Varianza: 1

Per quanto riguarda il primo parametro, la varianza è stata imposta maggiore rispetto a quella vista nel par. 4.4 per cercare di considerare un numero più ampio di variazioni.

La definizione delle soluzioni ottimali è stata eseguita impostando i seguenti vincoli:

- Energia assorbita > 8506.0967 J
- ➢ Forza scaricata sui supporti < 170 kN</p>

Avremo quindi i seguenti risultati:

Materiale	T Superficie esterna [mm]	T Rinforzo superiore [mm]	T Rinforzo inferiore [mm]	H Rinforzo superiore [mm]	H Rinforzo inferiore [mm]	Energia assorbita [J]	Forza [kN]	Massa crash-box [kg]
EN-AW 6014 T6	2.03113	2.42168	1.4425506	0.8881946	0.80616	8788.747	164.689	0.3164
EN-AW 7108 T5	1.66598	2.70507	1.6365524	1.7110393	-1.47384	8545.616	149.879	0.2891
EN-AW 6181A T6	1.95783	2.03725	2.187895	0.0122398	-0.29082	8834.743	166.055	0.3235
EN-AW 6022 T6	1.78772	2.33673	2.1387916	1.1454228	0.911367	8506.117	160.315	0.3096

Tabella 21: Risultati della variazione globale dei parametri – T = spessore ; H = altezza

La configurazione che meglio soddisfa le richieste progettuali è la prima. Poiché permette di avere un buon incremento sotto ogni punto di vista, soprattutto in termini di energia assorbita e massa.

Andiamo a questo punto a commentare l'analisi:



Figura 45: Curva forza spostamento – situazione migliore Variazione Globale

Da questo grafico possiamo vedere come la situazione sia pressocché simile a quella che era stata ricavata con l'ARSM (Figura 25). Ciò è da imputare al fatto che i risultati finali si discostano poco gli uni dagli altri. Tuttavia, in questo caso i vari **inarcamenti**, evidenziati nella figura di cui sopra, si **sviluppano in periodo di tempo più breve**. Infatti, il secondo picco al quale si ha il cedimento si verifica intorno a:

13 ms	17 ms
Figura 45	Figura 25

Ovviamente le deformate saranno differenti in generale.

Quello che si ottiene alla fine del fenomeno viene riportato in Figura 46.

Anche in questo caso possiamo vedere che la deformata tende ad andare verso il basso. Tuttavia, presenta un *folding* quasi ottimale.



Figura 46: Viste della deformata – Variazione globale

Andando ad analizzare i dati ottenuti nel post-processing, possiamo notare risultati simili a quelli commentanti nel par.4.4.1. Ciò in conferma della validità e della forza di tale risolutore. Vediamo infatti:



Figura 47: Grafico di Pareto - Energia interna

Abbiamo riportato solo il diagramma di Pareto dell'energia in quanto gli andamenti erano simili per gli altri output. Qui notiamo ancora che una **grande attenzione durante la progettazione della crash-box va rivolta verso la superficie esterna**. Quindi, indipendentemente dal materiale utilizzato il posizionamento dei setti non dà così grandi contributi.



Figura 48: Grafico a dispersione - Energia interna vs Spessore Superficie esterna

Per quanto riguarda gli andamenti della massa e della forza, dipendenti dallo spessore della superficie esterna, continuiamo a notare comportamenti simili a quelli precedentemente analizzati (Figura 33 e Figura 34). Nonostante ogni simulazione sia stata caratterizzata dall'impiego di un materiale diverso.

Tuttavia, per quello dell'energia, appena riportato, si presenta una maggiore dispersione. Mentre per quelli della forza e della massa gli andamenti sono ben definiti e per tal motivo introdurremo le curve che ne evidenziano il comportamento.



Figura 49: Confronto Forza scaricata sui supporti - Variazione globale vs Variazione solo spessori



Figura 50: Confronto Massa della crash-box - Variazione globale vs Variazione solo spessori

Un'importante considerazione che può essere fatta è relativa alla Figura 49 in cui è visibile un leggero scostamento tra le due curve. Il che fa pensare che l'output energia dipenda poco dal tipo di lega scelta e più dallo spessore stesso del componente. Nonostante sia stata utilizzata una combinazione di 8 leghe differenti per le 80 simulazioni qui condotte.

Nella Figura 50 tale differenza è leggermente più marcata, notando comunque una distanza tra le due linee di tendenza non così accentuata.

# 5. Conclusioni

In questa sezione andremo a confrontare i vari risultati ottenuti e a trarre delle conclusioni finali in base a quanto discusso.

Iniziamo con il paragonare la situazione nominale di partenza con il risultato ottimale raggiunto al seguito delle 365 simulazioni:



Figura 52: Curve forza - spostamento Nominale vs 365 Simulazioni

Possiamo vedere dalla Figura 52 che le due curve sono pressocché **coincidenti all'inizio della deformazione**, il che significa intorno a 1 ms. Tuttavia, negli istanti successivi è presente un grande divario che è visibile in termini di minor spostamento e maggior area sottesa alla curva. Questo inevitabilmente sta a significare che l'energia assorbita è aumentata notevolmente nella soluzione ottimizzata. Infatti, paragonandoli in termini numerici avremo:

	Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]	Spostamento max [mm]
Nominale	2	2	2	8506.0967	0.3506	167.46	82.1
365 sim.	2.3	1.3	1.7	9966.5684	0.3784	169.70097	76.01
Variazioni							
% dalla	13.04	0 00	_12.85	1/ 65	734	1 32	-8.012
situazione	15.04	5.05	-42.05	14.05	1.54	1.52	-0.012
nominale							

Tabella 22: Risultati a confronto - Nominale vs 365 simulazioni

L'incremento più importante, da come ci aspettavamo, è possibile vederlo **nell'energia assorbita** che arriva quasi al 15%. Per la forza è sì lieve ma comunque vicino al limite di 170 kN che era stato inizialmente imposto.

Passando ora al confronto tra la soluzione nominale e quella ottenuta a combinando l'ottimizzatore ARSM con il metodo *Latin HyperCube*, vediamo:



Figura 53: Deformate Nominale vs Latin HyperCube



Figura 54: Curve forza - spostamento Nominale vs Latin HyperCube

In Figura 54 si evince che le curve sono sovrapposte nella prima parte della deformazione, il che vuol dire fino a 3 ms. Il comportamento è **paragonabile intermini di curve ma non lo è invece dal punto di vita di deformata**:



Figura 55: Deformate Nominale vs Latin HyperCube – 3ms

Infatti, nella situazione nominale sono visibili deformazioni più spinte.

Dal punto di vista numerico:

	Superficie Esterna [mm]	Rinforzo superiore [mm]	Rinforzo inferiore [mm]	Energia [J]	Massa [kg]	Forza [kN]	Spostamento max [mm]
Nominale	2	2	2	8506.0967	0.3506	167.46	82.1
LHC	2.3	1.3	1.7	9654.0342	0.3644	167.129	77.33
Incrementi % dalla situazione nominale	13.043	-53.846	-17.647	11.890	3.787	-0.198	-6.168

Tabella 23: Risultati a confronto - Nominale vs LHC

Rispetto alla soluzione ottimale ottenuta dopo 365 simulazioni, qui possiamo notare che, con solamente 99<sup>9</sup> riusciamo ad ottenerne una configurazione che è solo leggermente meno prestante dal punto di vista di assorbimento dell'energia. Infatti, abbiamo una forza massima scaricata sui supporti che è inferiore sia al caso nominale che a quello ottimale e una massa che invece è intermedia tra queste due.

Quindi, una volta compreso come lavorano i vari metodi statistici è possibile definire il più idoneo riguardo gli studi al quale si vuole rivolgere l'attenzione. Ciò permette, con un minimo ausilio dell'ottimizzatore, di giungere ad una soluzione progettuale migliore per molti aspetti e soprattutto in tempi nettamente ridotti. Ovviamente per scegliere quello più idoneo è necessario essere un minimo consci della fisica che regola il problema e essere pratici di come questo si possa comportare in varie situazioni.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> 19 con l'ottimizzatore ARSM + 80 con il metodo stocastico Latin HyperCube.

Inoltre, abbiamo analizzato approfonditamente come questi metodi statistici siano utili per prevedere quali possano essere i legami che si vanno a creare tra le variabili di input e i risultati delle analisi.

# Bibliografia

- [1] E. A. Association, «Applications Car body Crash Management Systems,» in *The Aluminium Automotive Manual*, 2013, p. 26.
- [2] Diogo F. M. Silva, Carlos M. A. Silva, Ivo M. F. Bragança, Chris V. Nielsen, Luis M. Alves e Paulo A. F. Martins, On the Performance of Thin-Walled Crash Boxes, Lisbona, Portogallo: Materials, 2018.
- [3] C. Moewes, Application of support vector machines to discriminate vehicle crash events, Magdeburg, Germania: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2007.
- [4] Dr. Jürgen Redlich, Leiter Kfz-Technik, «Information on the implimentation of RCAR crash standards in the German insurance vehicle rating system and information on AEB systems,» *RCAR Research Council for Automobile Repairs*, p. 32, 2011.
- [5] Dr. Jürgen Redlich, Leiter Kfz-Technik, «The Procedure for Conducting a Low Speed 15 km/h Offset Insurance Crash Test to Determine the Damageability and Repairability Features of Motor Vehicles,» RCAR - Research Council for Automobile Repairs, p. 14, 2011.
- [6] Renaud J. E. e Gabriele G. A., «Improved Coordination in Non-hierarchical System Optimization,» *AIAA Journal*, vol. 31, pp. 2367-2373, 1993.
- [7] Renaud J. E. e Gabriele G. A., «Approximation in Non-hierarchical System Optimization,» AIAA, vol. 32, pp. 198-205, 1994.
- [8] Bloebaum C. L., Hong W. e Peck A, «Improved Move Limit Strategy for Approximate Optimization,» in *Proceedings of the AIAA/USAF/NASA/ISSMO 5-th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Città di Panama, Florida, 1994, pp. 834-850.
- [9] G. Gary Wang, Zuomin Dong e Peter Aitchison, «Adaptive Response Surface Method A Global Optimization Scheme for Approximation-based Design Problems,» in *Engineering Optimization*,, Winnipeg, MB, Canada, 2001, pp. 707-733.
- [10] Altair, «Altair Hypestudy,» https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hst/topics/design\_exploration/method\_adaptive\_res ponse\_surface\_method\_r.htm.
- [11] Wolfram MathWorld, «Hammersley Point Set,» https://mathworld.wolfram.com/HammersleyPointSet.html.