

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA MECCANICA



**Ottimizzazione di tubi anti-intrusione
riempiti di schiuma d'alluminio**

Relatore:

Prof. Matteo STRANO

Correlatori:

Valerio MUSSI

Luca PAGANI

Tesi di Laurea di:

Carolina GABBIANI

Matricola: 764957

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

*Dedico questa Tesi
ai miei nonni Alfredo e Anna
che oggi non sono più accanto a me,
ai miei genitori e a Stefano,
che mi sono sempre stati vicini,
permettendomi di arrivare
a questo traguardo con serenità.*

Ringraziamenti

Un sincero ringraziamento va al Prof. Matteo Strano che mi ha seguito in questo percorso di tesi, dandomi preziosi aiuti.

Ringrazio Luca Pagani per avermi assistito nella parte di ottimizzazione e per avermi sempre aiutato a superare le difficoltà incontrate.

Ringrazio Valerio Mussi per l'aiuto che mi ha dato nello svolgimento delle prove sperimentali e per il supporto che mi ha dato durante il mio percorso di tesi.

Ringrazio Andrea Rossi per la sua disponibilità nei miei confronti e per il supporto fornito per l'esecuzione delle simulazioni.

Ringrazio tutti i ricercatori e i collaboratori del Laboratorio di Ricerca Musp e in particolare il Prof. Michele Monno per avermi concesso di usufruire del laboratorio e delle attrezzature.

Ringrazio i miei compagni di avventura Mattia e Antonio, che mi sono sempre stati vicini e mi hanno dato un prezioso supporto.

Ringrazio inoltre, il Sig. Tamagnone per avermi fornito il materiale da utilizzare nelle mie prove sperimentali.

Indice Generale

Sommario	21
Abstract	21
Nomenclatura	23
Capitolo 1: Introduzione alla sicurezza passiva dell'autoveicolo negli urti laterali	25
1.1 Test sugli impatti laterali	27
1.1.1 European side impact test.....	27
1.1.2 US side impact test.....	29
1.2 Barre anti-intrusioni laterali	31
Capitolo 2: Schiume Metalliche	35
2.1 Morfologia.....	35
2.2 Metodi di produzione	36
2.3 Proprietà schiume	41
2.3.1 Assorbimento di energia.....	43
2.4 Applicazioni principali e limiti nell'utilizzo	54
2.4.1 Applicazione nell'ambito automobilistico	56
Capitolo 3: Metamodelli	59
3.1 Introduzione al Fusion Metamodel.....	61
3.2 "Fusion Metamodel"	62
3.2.1 Efficienza del meta-modello	65
3.3 Ottimizzazione del Metamodello Fusion.....	68
3.3.1 Dimostrazione dell'ottimizzazione	69
Capitolo 4: Obiettivi e struttura dell'analisi	71
4.1 Obiettivi.....	71
4.1.1 Indice di performance	72

4.1.2	Variabili di progetto	76
4.2	Struttura dell'analisi	79
Capitolo 5: Simulazione della prova di flessione		81
5.1	Prova di flessione	81
5.2	Metodo di simulazione.....	82
5.2.1	Modellazione del materiale tubi e della schiuma	82
5.2.2	Modellazione dei componenti.....	85
5.2.3	Tipologia di analisi svolta	89
5.2.4	Vincoli imposti e tecnica di meshatura.....	91
5.2.5	Risultati ottenuti.....	94
Capitolo 6: Introduzione ai due scenari di simulazione.....		95
6.1	Prove sperimentali di flessione	95
6.1.1	Prove di flessione con tubi in Fe 360.....	96
6.1.2	Prove di flessione con tubi in DOCOL800DP.....	98
6.1.3	Prove di flessione con tubi in AISI 304.....	99
6.2	Caratterizzazione dei due scenari di simulazione	101
6.2.1	Caratterizzazione dei materiali dei tubi.....	101
6.2.2	Caratterizzazione della schiuma d'alluminio	105
6.3	Risultati delle simulazioni nei due scenari e confronto con le prove sperimentali.....	106
6.3.1	Flessione di tubi in Fe 360	106
6.3.2	Flessione di tubi in DOCOL800DP	110
6.3.3	Flessione di tubi in AISI 304	114
Capitolo 7: Ottimizzazione dello scenario di simulazione non calibrato...		117
7.1	Determinazione del “ <i>Design of experiments</i> ”	117
7.1.1	Scelta delle geometrie	118
7.1.2	Scelta dei materiali.....	119
7.2	Risultati delle nuove simulazioni.....	124
7.3	Ottimizzazione	130
Capitolo 8: Ottimizzazione dello scenario di simulazione calibrato		137

8.1	Determinazione del “ <i>Design of experiments</i> ”	137
8.1.1	Scelta delle geometrie	138
8.1.2	Scelta dei materiali	139
8.2	Risultati delle nuove simulazioni	144
8.3	Ottimizzazione.....	150
Capitolo 9: Ottimizzazione vincolata dei due scenari di simulazione		159
9.1	Scenario non calibrato	161
9.1.1	Autovetture di alta gamma	161
9.1.2	Autovetture di media gamma.....	163
9.1.3	Autovetture di bassa gamma	168
9.2	Scenario calibrato	171
9.3	Confronto dei risultati ottenuti per i due scenari	172
Capitolo 10: Ampliamento del Piano Sperimentale.....		175
10.1	Realizzazione del riempimento di schiuma	176
10.2	Prove di flessione su tre punti	180
10.2.1	Risultati sperimentali per i tubi in DOCOL600DP	182
10.2.2	Risultati sperimentali per i tubi in AISI 316L	185
10.3	Simulazioni delle prove di flessione.....	188
10.3.1	Caratterizzazione dei materiali	188
10.3.2	Risultati delle simulazioni.....	189
10.5	Ottimizzazione della nuova superficie di previsione.....	192
Capitolo 11: Conclusioni.....		195
Appendice 1.....		199
Appendice 2.....		203
Appendice 3.....		207
Appendice 4.....		209
Appendice 5.....		211
BIBLIOGRAFIA.....		213

Elenco delle Figure

Figura 1. 1: Statistiche delle tipologie di urti automobilistici [2].	25
Figura 1. 2: Cono di direzione delle forze agenti negli urti laterali. [1]	26
Figura 1. 3: L'Euro-NCAP side-impact MDB test [4].	27
Figura 1. 4: Euro-NCAP side-impact pole-test [4]	28
Figura 1. 5: Dinamic Test. [1]	31
Figura 1. 6: Barra anti-intrusione a sezione tonda a) Nissan Pathfinder / Navara.[6] b) Kia Picanto [7].	32
Figura 1. 7: Barra anti-intrusione a sezione ondulata a) MINI [1]. b) Ford B-Max[8].	32
Figura 1. 8: Barre anti-intrusione poste a) longitudinalmente (Mercedes Classe E).[9] b) diagonalmente (Fiat 500). [9] c) diagonalmente. [10].	33
Figura 1. 9: Barre anti-intrusione a)Volvo S80. b) Hyundai Azera. [11].	34
Figura 1. 10: Barre anti-intrusione in alluminio BMW Serie 5. [12].	34
Figura 2. 1: a) Schiuma a celle chiuse. b) Schiuma a celle aperte. [14].	35
Figura 2. 2: Applicazioni dei materiali cellulari in base al Grado di apertura [15].	36
Figura 2. 3: Riassunto delle tecniche di produzione delle schiume metalliche [15].	37
Figura 2. 4: Metodo di produzione tramite compattazione delle polveri [1]	38
Figura 2. 5: Tipica sezione di una schiuma formata con il metodo di compattazione delle polveri. [15].	38
Figura 2. 6: Sezione delle schiume. a) Alporas . b) Hydro Aluminium.	40
Figura 2. 7: Legame fra la frazione i porosità e la dimensione dei pori. [17].	41
Figura 2. 8: Diagramma di Ashby [18].	42
Figura 2. 9: Diagramma Sforzo di compressione-Energia assorbita per unità di volume in funzione della densità della schiuma [18].	44
Figura 2. 10: Curva di compressione schematica di una schiuma metallica [18]	44
Figura 2. 11: Curva Sforzo-Deformazione a) Quasi-statica nel caso di due valori di densità. b) a $2 \cdot 10^3 \text{s}^{-1}$ nel caso di tre valori di densità [19].	46
Figura 2. 12: Legame Energia assorbita-Densità nel caso di compressione [19].	46

Figura 2. 13: Legame Energia assorbita-Densità nel caso di flessione in un piano logaritmico[20].	47
Figura 2. 14: Tre esempi di curve Sforzo-Deformazione con velocità di deformazione differente e densità di 0.52g/cm^3 [19].	48
Figura 2. 15: Curve di compressione di schiume Alulight per velocità di deformazione pari a 10^{-3} e 3610 s^{-1} [21].	48
Figura 2. 16: a) Legame Sforzo plastico-Velocità di deformazione. b) Legame Energia assorbita-Velocità di deformazione.[22]	49
Figura 2. 17: Curve Sforzo-Deformazione di compressione a) carico applicato parallelo alle due pelli. b) carico applicato perpendicolare alle due pelli. [26].	50
Figura 2. 18: Schiume senza la presenza di pelli con la direzione di applicazione del carico a) perpendicolare, b) parallela alla direzione di schiumatura.[26].	51
Figura 2. 19: Sforzo di compressione con direzione di carico perpendicolare e parallela alla direzione di schiumatura. [26].	51
Figura 2. 20: Assorbimento di energia per campioni di diversa lunghezza a) rettangolari. b) cilindrici. c) Confronto dell'assorbimento di energia per dimensioni differenti. [27]	52
Figura 2. 21: Carico di compressione sulle strutture composite.[29]	53
Figura 2. 22: Carico di flessione sulle strutture composite.[29]	54
Figura 2. 23: Settori principali attuali e futuri dell'utilizzo delle schiume [14].	55
Figura 2. 24: Macchina Karmann con componenti in schiuma di Alluminio. [14]	57
Figura 3. 1: Il metamodello come surrogato delle simulazioni FE. [36]	60
Figura 3. 2: Metamodello "Bassa Risoluzione": a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]	65
Figura 3. 3: Metamodello "Alta Risoluzione": a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]	66
Figura 3. 4: Metamodello "ADD": a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]	66
Figura 3. 5: : Metamodello "Fusion": a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]	66
Figura 3. 6: Confronto fra le performance dei quattro metamodelli.[38]	67
Figura 3. 7: Superficie di previsione prima dell'utilizzo dell'algoritmo EGO. [38]	70
Figura 3. 8: Superficie di previsione dopo l'utilizzo dell'algoritmo EGO. [38]	70
Figura 4. 1: $Y(\delta l_{\max})$ in funzione della densità della schiuma. [43]	73
Figura 4. 2: $Y(\delta l_{\max})$ in funzione dello spessore del tubo. [43]	74

Figura 4. 3: Incremento percentuale su Y.[43]	75
Figura 4. 4: Geometrie delle sezioni possibili	78
Figura 5. 1: Flessione su tre punti di un tubo	81
Figura 5. 2: Parametri d'interesse per la descrizione del comportamento dei materiali	82
Figura 5. 3: Penetratore	85
Figura 5. 4: Supporto per il tubo con geometria tonda	86
Figura 5. 5: Misure supporto per geometria tonda	86
Figura 5. 6: Supporto per il tubo con geometria quadrata	86
Figura 5. 7: Misure supporto per geometria quadrata	87
Figura 5. 8: Supporto per il tubo con geometria a rombo	87
Figura 5. 9: Misure supporto per geometria a rombo	87
Figura 5. 10: Fasci tubolari e schiume a sezione a) Tonda. b) Quadrata. c) Romboideale	88
Figura 5. 11: Assemblaggio a)Tondo. b) Quadrato. c)Rombo	89
Figura 5. 12: Vincoli applicati sull'intero assieme	92
Figura 5. 13: Configurazione deformata al termine della simulazione	94
Figura 6. 1: Legami medi Forza-Deflessione delle condizioni sperimentali 1, 2, 3.[1]	97
Figura 6. 2: Legami medi Forza-Deflessione delle condizioni sperimentali 4, 5, 6. [1]	98
Figura 6. 3: Legame medio Forza-Deflessione della condizione sperimentale 7. [1]	100
Figura 6. 4: Curva d'incrudimento DOCOL800DP, Fe360, AISI 304 per lo "Scenario non calibrato"	104
Figura 6. 5: Curve d'incrudimento Fe 360 per lo "Scenario calibrato"	104
Figura 6. 6: Curve d'incrudimento DOCOL800DP per lo "Scenario calibrato"	104
Figura 6. 7: Curva d'incrudimento AISI 304 per lo "Scenario calibrato"	105
Figura 6. 8: Curva che caratterizza il comportamento plastico della schiuma. [1]	106
Figura 6. 9: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 1 e per le simulazioni 1	107
Figura 6. 10: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 2 e per le simulazioni 2	108
Figura 6. 11: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 3 e per le simulazioni 3	109

Figura 6. 12: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 4 e per le simulazioni 4.	111
Figura 6. 13: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 5 e per le simulazioni 5.	112
Figura 6. 14: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 6 e per le simulazioni 6.	113
Figura 6. 15: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 7 e per le simulazioni 7.	114
Figura 7. 1: Curve di incrudimento AISI 4320 e AISI 4130.	122
Figura 7. 2: Curve d'incrudimento AISI 436, AISI 403, AISI 316.	122
Figura 7. 3: Curve d'incrudimento AISI 310, AISI 446, AISI 303.	123
Figura 7. 4: Curve d'incrudimento AISI 1340, AISI 1118.	123
Figura 7. 5: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 8, 10, 11.	125
Figura 7. 6: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 13, 17, 19.	126
Figura 7. 7: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 9, 14.	127
Figura 7. 8: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 12 e 15.	128
Figura 7. 9: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 16, 18 e 20.	129
Figura 7. 10: Superficie di previsione del metamodello per lo scenario non calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.	130
Figura 7. 11: Legame Forza-Deflessione delle simulazioni 21, 22, 23.	132
Figura 7. 12: Legame Forza-Deflessione delle simulazioni 24, 25, 26, 27.	133
Figura 7. 13: Ottimo e superficie di previsione del metamodello per lo scenario di simulazione non calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.	134
Figura 7. 14: Legame Forza-Deflessione delle simulazioni 28 e 29 del punto di ottimo.	135
Figura 8. 1: Curva d'incrudimento AISI 9255.	141
Figura 8. 2: Curve d'incrudimento AISI 201, AISI 202, AISI 216.	142
Figura 8. 3: Curve d'incrudimento AISI 403, AISI 316.	142
Figura 8. 4: Curva d'incrudimento AISI 1095.	143
Figura 8. 5: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 12, 14, 17, 19.	145
Figura 8. 6: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 8, 9, 10.	146
Figura 8. 7: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 13, 16, 18.	147
Figura 8. 8: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 11, 15, 20.	149

Figura 8. 9: Superficie di previsione del metamodello per lo scenario calibrato; ; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.	150
Figura 8. 10: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 21, 22, 23.	152
Figura 8. 11: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 24, 25, 26.	153
Figura 8. 12: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 27, 28, 29.	154
Figura 8. 13: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 30, 31, 32.	155
Figura 8. 14: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 33, 34, 35.	156
Figura 8. 15: Ottimo della superficie di previsione del metamodello per lo scenario calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.	157
Figura 9. 1: Mappa delle simulazioni svolte in funzione dei due vincoli scelti.	161
Figura 9. 2: Mappa delle simulazioni valide per le autovetture di alta gamma.	162
Figura 9. 3: Mappa delle simulazioni valide per le autovetture di media gamma.	163
Figura 9. 4: Curva d'incrudimento AISI 410.	165
Figura 9. 5: Legami Forza-Deflessione per le simulazioni 30, 31, 32.	165
Figura 9. 6: Legami Forza-Deflessione per la simulazione 33.	166
Figura 9. 7: Mappa delle simulazioni valide per le autovetture di bassa gamma.	168
Figura 9. 8: Valori del nuovo punto di ottimo; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.	170
Figura 9. 9: Configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma per lo scenario non calibrato.	172
Figura 9. 10: Configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma per lo scenario calibrato.	172
Figura 10. 1: Punti sperimentali nel piano $W/V-J/W_m$ dello scenario di simulazione calibrato.	175
Figura 10. 2: Nuovi punti sperimentali nel piano $W/V-J/W_m$ dello scenario di simulazione calibrato.	176
Figura 10. 3: Sistema di chiusura dei tubi.	178
Figura 10. 4: Marcatura dei tubi.	178
Figura 10. 5: Forno Nabertherm LT9/11HA.	178

Figura 10. 6: Andamento della temperatura durante il processo di schiumatura.	179
Figura 10. 7: a) Sistema d'appoggio nel forno. b) Sistema di raffreddamento.	180
Figura 10. 8: Pressa per il test di flessione su tre punti.	180
Figura 10. 9: a) Configurazione prima del test. b) Configurazione dopo il test.	181
Figura 10. 10: Legame Forza-Deflessione per tubi vuoti e riempiti di schiuma DOCOL600DP.	182
Figura 10. 11: Legame Forza-Deflessione medio per tubi vuoti e riempiti di schiuma DOCOL600DP.	184
Figura 10. 12 : Legame Forza-Deflessione per tubi vuoti e riempiti di schiuma AISI 316L.	186
Figura 10. 13: Legame Forza-Deflessione medio per tubi vuoti e riempiti di schiuma AISI 316L.	187
Figura 10. 14: Curve d'incrudimento DOCOL600DP e AISI316L.	189
Figura 10. 15: Legame Forza-Deflessione per la simulazione 38.	190
Figura 10. 16: : Legame Forza-Deflessione per la simulazione 39.	191
Figura 10. 17: Nuova superficie di previsione dello scenario calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.	192
Figura 10. 18: Effetto dell'ampliamento del piano sperimentale sulle superfici di previsione dello scenario calibrato.	193
Figura 10. 19: Particolare delle superfici sovrapposte.	193
Figura A2. 1: Taglio schematico dei provini cilindrici.[1].....	203
Figura A2. 2: Esempio di curva di compressione. [1].....	204
Figura A2. 3: Legame Densità- Modulo di Young. [1].....	205
Figura A2. 4: Curve di compressione e comportamento medio. [1].....	205

Elenco delle Tabelle

Tabella 2. 1: Caratteristiche metodi di produzione usati industrialmente [15].	40
Tabella 6. 1: Riassunto condizioni sperimentali effettuate da Villa in [1].	96
Tabella 6. 2: Risultati medi delle condizioni sperimentali 1, 2, 3.[1]	97
Tabella 6. 3: Risultati medi delle condizioni sperimentali 4, 5, 6. [1]	99
Tabella 6. 4: Risultati medi della condizione sperimentale 7. [1]	100
Tabella 6. 5: Caratteristiche elastiche degli acciai utilizzati.	101
Tabella 6. 6: Caratteristiche Fe360, DOCOL800DP, AISI304 del campo plastico per lo scenario non calibrato.	103
Tabella 6. 7: Caratteristiche Fe360, DOCOL800DP, AISI304 del campo plastico per lo scenario calibrato.	103
Tabella 6. 8: Parametri caratteristici della schiuma. [1].	105
Tabella 6. 9: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 1 e delle simulazioni 1, svolte per i due scenari.	107
Tabella 6. 10: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 2 e delle simulazioni 2, svolte per i due scenari.	109
Tabella 6. 11: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 3 e della simulazione 3, valida per entrambi gli scenari.	110
Tabella 6. 12: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 4 e della simulazione 4, valida per entrambi gli scenari.	111
Tabella 6. 13: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 5 e della simulazione 5, valida per entrambi gli scenari.	112
Tabella 6. 14: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 6 e delle simulazioni 6, svolte per i due scenari.	113
Tabella 6. 15: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 7 e delle simulazioni 7, svolte per i due scenari.	115
Tabella 7. 1: Coppie di valori di J/W_m e W/V per lo scenario di simulazione non calibrato.	118
Tabella 7. 2: Forme e dimensioni delle 13 geometrie scelte.	119
Tabella 7. 3: Materiali scelti.	120
Tabella 7. 4: Caratteristiche AISI 4320 e AISI 4130.	121
Tabella 7. 5: Caratteristiche AISI 310, AISI 446, AISI 316, AISI 403, AISI 436, AISI 303	122

Tabella 7. 6: Caratteristiche AISI 1340, AISI 1118.	123
Tabella 7. 7: Riassunto delle caratteristiche delle 13 simulazioni svolte.	124
Tabella 7. 8: Risultati delle simulazioni 8, 10, 11.	125
Tabella 7. 9: Risultati delle simulazioni 13, 17, 19.	126
Tabella 7. 10: Risultati delle simulazioni 9 e 14.	127
Tabella 7. 11: Risultati delle simulazioni 9 e 14.	128
Tabella 7. 12: Risultati delle simulazioni 16, 18 e 20.	129
Tabella 7. 13: Nuovi punti di simulazione.	131
Tabella 7. 14: Caratteristiche delle simulazioni 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27.	131
Tabella 7. 15: Risultati delle simulazioni 21, 22, 23.	132
Tabella 7. 16: Risultati delle simulazioni 24, 25, 26, 27.	133
Tabella 7. 17: Caratteristiche delle simulazioni 28 e 29 nel punto ottimo.	134
Tabella 7. 18: Risultati delle simulazioni 28 e 29 nel punto di ottimo.	135
Tabella 8. 1: Coppie di valori di J/W_m e W/V per lo scenario di simulazione calibrato.	138
Tabella 8. 2: Forme e dimensioni delle 13 geometrie scelte.	139
Tabella 8. 3: Scelta dei materiali.	140
Tabella 8. 4: Caratteristiche AISI 9255.	141
Tabella 8. 5: Caratteristiche AISI 201, 202, 316, 403, 216, 303.	142
Tabella 8. 6: Caratteristiche AISI 1095.	143
Tabella 8. 7: Riassunto delle caratteristiche delle 13 simulazioni da svolgere.	144
Tabella 8. 8: Risultati delle simulazioni 12, 14, 17, 19.	145
Tabella 8. 9: Risultati delle simulazioni 8, 9, 10.	147
Tabella 8. 10: Risultati delle simulazioni 13, 16, 18.	148
Tabella 8. 11: Risultati delle simulazioni 11, 15, 20.	149
Tabella 8. 12: Nuove punti di simulazione.	151
Tabella 8. 13: Caratteristiche delle simulazioni 21-35.	151
Tabella 8.14: Risultati delle simulazioni 21, 22, 23.	152
Tabella 8. 15: Risultati delle simulazioni 24, 25, 26.	153
Tabella 8. 16: Risultati delle simulazioni 27, 28, 29.	154
Tabella 8. 17: Risultati delle simulazioni 30, 31, 32.	155
Tabella 8. 18: Risultati delle simulazioni 33, 34, 35.	156
Tabella 8. 19: Confronto dei punti di ottimo ricavati nei due scenari analizzati.	158
Tabella 9. 1: Fasce di vincolo ipotizzate in funzione della gamma dell'auto... ..	159
Tabella 9. 2. Costi dei materiali usati.	160

Tabella 9. 3: Caratteristiche della configurazione ottima per un'autovettura di alta gamma.	162
Tabella 9. 4: Possibili configurazioni del punto di ottimo.	164
Tabella 9. 5: Possibili soluzioni ottime per autovetture di media gamma.	164
Tabella 9. 6: Caratteristiche AISI 410.	165
Tabella 9. 7: Risultati delle simulazioni 30, 31 32.	166
Tabella 9. 8: Risultati della simulazione 33.	167
Tabella 9. 9: Valori di Y'_{48} delle simulazioni 30, 31, 32 e 33.	167
Tabella 9. 10: Caratteristiche della configurazione ottima per un'autovettura di media gamma.	168
Tabella 9. 11: Possibile soluzione ottima per autovetture di bassa gamma.	169
Tabella 9. 12: Caratteristiche della configurazione ottima per un'autovettura di bassa gamma.	170
Tabella 9. 13: Configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma nello scenario calibrato.	171
Tabella 9. 14: Caratteristiche della configurazioni ottime per lo scenario calibrato.	171
Tabella 9. 15: Riassunto configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma nei due scenari	173
Tabella 10. 1: Caratteristiche dei nuovi punti sperimentali.	176
Tabella 10. 2: Caratteristiche dei precursori usati per i sei tubi testati.	177
Tabella 10. 3: Configurazioni testate nella prova di flessione.	181
Tabella 10. 4: Caratteristiche tubi in DOCOL600DP testati.	182
Tabella 10. 5: Risultati dei tubi testati DOCOL600DP.	183
Tabella 10. 6: Risultati medi dei tubi testati DOCOL600DP.	184
Tabella 10. 7: Caratteristiche tubi in AISI 316L testati.	185
Tabella 10. 8: Risultati dei tubi testati AISI 316L.	186
Tabella 10. 9: Risultati medi dei tubi testati AISI 316L.	187
Tabella 10. 10: Caratteristiche DOCOL600DP e AISI 316L.	189
Tabella 10. 11: Caratteristiche delle simulazioni 38 e 39.	190
Tabella 10. 12: Risultati della simulazione 38 e confronto con la rispettiva condizione sperimentale.	190
Tabella 10. 13: Risultati della simulazione 39 e confronto con la rispettiva condizione sperimentale.	191
Tabella 11. 1: Punti di ottimo per i due scenari di simulazione analizzati.	196
Tabella 11. 2: Riassunto delle configurazioni ottime ricavate nell'ottimizzazione non vincolata.	196

Tabella 11. 3: Riassunto dei punti di ottimo ricavati nell'ottimizzazione vincolata.....	197
Tabella 11. 4: Riassunto delle configurazioni ottime ricavate nell'ottimizzazione vincolata.....	197
Tabella 11. 5: Confronto fra i punti di ottimo del vecchio scenario (Old) e di quello ampliato con nuovi punti sperimentali (New). (Scenario Calibrato).....	198
Tabella A1. 1: Risultati condizione sperimentale 1.[1]	199
Tabella A1. 2: Risultati condizione sperimentale 2.[1]	199
Tabella A1. 3: Risultati condizione sperimentale 3.[1]	200
Tabella A1. 4: Risultati condizione sperimentale 4.[1]	200
Tabella A1. 5: Risultati condizione sperimentale 5. [1]	201
Tabella A1. 6: Risultati condizione sperimentale 6. [1]	201
Tabella A1. 7: Risultati condizione sperimentale 7. [1]	202
Tabella A3. 1: Composizioni chimiche acciai inossidabili austenitici.	207
Tabella A3. 2: Composizioni chimiche acciai inossidabili ferritici e martensitici.	207
Tabella A3. 3: Composizioni chimiche acciai al carbonio.	208
Tabella A3. 4: Composizioni chimiche acciai basso-legati.	208
Tabella A4. 1: Simulazioni svolte valide per autovetture di alta gamma.	209
Tabella A4. 2: Simulazioni svolte valide per autovetture di media gamma.	210
Tabella A4. 3: Simulazioni svolte valide per autovetture di bassa gamma.	210

Sommario

La sicurezza passiva nel settore automobilistico è diventata una caratteristica fondamentale per la scelta di un autoveicolo. Negli urti laterali i componenti che limitano i danni che possono essere arrecati, sono le barre anti-intrusione, che saranno l'oggetto di questo lavoro. Ci si propone infatti, di ottimizzare le caratteristiche di tubi anti-intrusione riempiti di schiuma metallica d'alluminio. In particolare si vuole trovare il materiale dei tubi e la geometria della sezione che massimizzano l'assorbimento di energia se sottoposti a flessione. Ci si propone di eseguire due ottimizzazioni: una priva di vincoli e una con vincoli di costo e ingombro. Lo strumento di ottimizzazione usato è un metamodulo gerarchico, basato sull'utilizzo di punti con diversi gradi di accuratezza: i punti sperimentali, più accurati ma presenti in minor numero e le simulazioni, meno accurate ma presenti in maggior numero. Il vantaggio di un approccio gerarchico dovrebbe essere quello di ricavare soluzioni basandosi, oltre che su prove sperimentali, su simulazioni che non richiedono un elevato grado di accuratezza risparmiando, così, tempo, al contrario di quanto accade per gli approcci tradizionali. Si affrontano, dunque, due scenari di ottimizzazione basati sugli stessi punti sperimentali, le cui simulazioni sono, in un caso, calibrate in modo da minimizzare la differenza dei risultati, nell'altro non calibrate. Infine vengono aggiunte nuove prove sperimentali di flessione al piano sperimentale per vedere l'effetto che i nuovi punti hanno sull'ottimizzazione eseguita.

Parole chiave: ottimizzazione, schiume metalliche, tubi anti-intrusione, flessione, assorbimento di energia, simulazioni FEM, calibrazione.

Abstract

In the automotive industry the passive safety has become a primary feature for the choice of a vehicle. In side impacts, the components used for limit the injuries are the side-impact beams, which will be the object of this study.

In fact, the purpose of this work is the optimization of side impact foam-filled beams. In particular we want to find the pipe material and the geometry of the section that maximize the absorption of energy when subject to bending. We propose to perform two optimizations: one without constraints and the other with cost and size constraints. The mean used for this is a hierarchical metamodel,

based on the use of sets of data with different degrees of reliability: the experiments, more reliable but available in a smaller number, and the simulations, more approximate but available in a greater number. The advantage of a hierarchical approach should be to obtain solutions based on time-saving simulations that do not require a high degree of accuracy, contrary to what happens for the traditional approaches. Therefore, two optimization scenarios based on the same experimental points are studied. In one case, the simulations of the experiments are calibrated in order to minimize the difference of the results between simulations and experiments, in the other case the simulations are not calibrated. Finally, we add new bending tests at the experimental plan to see the effect that the new points have on the optimization performed.

Keywords: optimization, metal foams, side-impact beams, bending, energy absorption, FEM simulation, calibration.

Nomenclatura

δl_{max}	<i>Deflessione Massima</i>
W_m	<i>Ingombro della Sezione</i>
M	<i>Massa</i>
E_{abs}	<i>Energia Assorbita</i>
<i>S.E.A.</i>	<i>Energia Specifica di Assorbimento</i>
P_{med}	<i>Forza Media</i>
P_{max}	<i>Forza Massima</i>
η	<i>Efficienza Energetica</i>
Y'_{48}	<i>Indice di Prestazione</i>
J/W_m	<i>Rapporto fra il Momento d'inerzia e l'Ingombro della sezione del tubo</i>
W/V	<i>Tenacità</i>
ρ_f	<i>Densità della Schiuma</i>
ρ	<i>Densità del Materiale Solido</i>
ρ^*	<i>Densità Relativa</i>
E	<i>Modulo di Young</i>
G	<i>Modulo di Elasticità Trasversale</i>
ν	<i>Coefficiente di Poisson</i>
R_m	<i>Carico di Rottura</i>
σ_{sn}	<i>Carico di Snervamento</i>
$A\%$	<i>Allungamento percentuale</i>
K	<i>Coefficiente di Resistenza</i>
n	<i>Esponente d'Incrudimento</i>

k *Compression Yield Stress Ratio della schiuma*

k_t *Hydrostatic Yield Stress Ratio della schiuma*

Capitolo 1

Introduzione alla sicurezza passiva dell'autoveicolo negli urti laterali

Al giorno d'oggi il tema della sicurezza nel settore automobilistico sta acquistando sempre maggiore importanza dal momento che è diventato un fattore fondamentale per l'acquisto di un autoveicolo.

Occorre dunque fare una distinzione fra le tipologie di sicurezza:

- si parla di *sicurezza attiva* quando ci si riferisce al comportamento direzionale e alle caratteristiche di frenatura del veicolo, oppure a sua prestazioni generali;
- si parla di *sicurezza passiva* quando ci si preoccupa della capacità del veicolo di proteggere i passeggeri e i carichi da eventuali collisioni, siano esse con altre vetture o con elementi esterni.

La sicurezza passiva che sarà oggetto di questo studio può essere ottenuta, oltre attraverso l'ausilio di particolari elementi come air bag e cinture, soprattutto con una buona progettazione dei telai [1].

Come si può notare dalla Figura 1.1, la maggior parte degli incidenti automobilistici, circa il 51%, sono urti frontali, mentre il 25% sono urti laterali, il 15% sono rollover e il 9% urti posteriori [2].

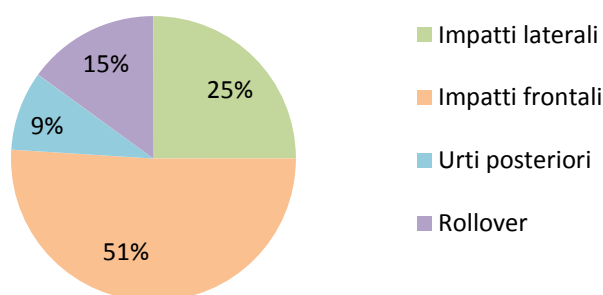


Figura 1.1: Statistiche delle tipologie di urti automobilistici [2].

Mentre negli urti frontali la struttura dei telai permette di avere già buone caratteristiche di sicurezza, in quelli laterali, invece, risiede il maggior pericolo. Infatti in questi ultimi fra passeggero e collisione vi è pochissimo spazio, ovvero

soltanto lo spessore della portiera, diversamente da quanto accade negli scontri frontali, in cui, invece, vengono interposti elementi crash box che assorbono la deformazione.

Vengono definiti urti laterali quegli urti le cui direzioni trasversali delle forze, che agiscono sulle fiancate, sono comprese nei coni di direzione $-30^\circ +30^\circ$, rispetto alla direzione perpendicolare all'asse longitudinale del veicolo.

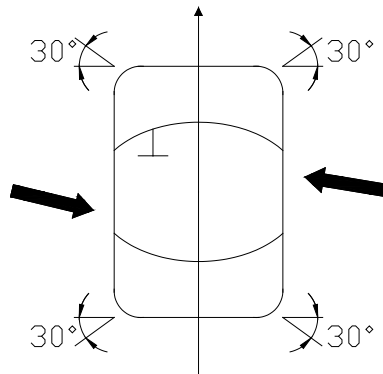


Figura 1. 2: Cono di direzione delle forze agenti negli urti laterali. [1]

Gli urti laterali possono essere di due tipologie:

- *veicolo contro veicolo* particolarmente pericolosi qualora il veicolo urtante provochi una significativa intrusione nell'abitacolo nella zona delle porte o della fiancata posteriore;
- *contro oggetti fissi concentrati*, come pali. Questa categoria è sempre molto pericolosa sia per le forti intrusioni che ingenera che per l'alta probabilità che gli oggetti urtanti presentino traiettorie che intercettino segmenti corporei sensibili.

Queste tipologie d'urto possono entrambe diventare molto pericolose: nella prima si può verificare la possibilità che l'autovettura urtante causi una notevole intrusione all'interno del veicolo urtato, mentre nella seconda vi è l'eventualità che parti del corpo umano siano colpite dagli oggetti contro cui avviene l'impatto. [1]

In particolare modo i componenti principali usati per diminuire i danni che possono essere causati da impatti laterali sono barre anti-intrusione da porre all'interno della portiera, in grado di assorbire elevata energia cinetica convertendola in energia di deformazione, evitando così di avere elevate intrusioni dell'elemento di impatto nella vettura. Tali componenti lavorano dunque a flessione.

In questo studio ci si focalizzerà proprio su questa tipologia di componenti.

1.1 Test sugli impatti laterali

In questo capitolo si riportano le normative riguardanti la Comunità Europea e gli Stati Uniti nel caso degli urti laterali per le autovetture.

1.1.1 European side impact test

In Europa il test da svolgere per vedere la resistenza delle autovetture agli urti laterali è l'*Euro-NCAP side-impact MDB test*, che fa riferimento alla normativa 96/27/EC in vigore dal 20 Maggio 1996 [3].

Nel test vi è un urto tra una barriera mobile deformabile di alluminio (MDB) e una vettura ferma nella quale è posizionato un manichino tipo EuroSID. La barriera mobile ha una massa di 950 kg e viaggia alla velocità di 50 km/h.

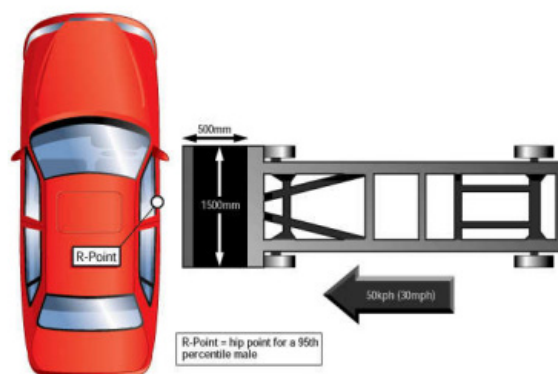


Figura 1. 3: L'*Euro-NCAP side-impact MDB test* [4]

Si ritiene superato il test, se sono soddisfatte le seguenti prescrizioni:

- L'*injury criteria*, illustrato in seguito, relativo al manichino posizionato nella vettura, deve essere entro determinati limiti;
- Nessun sportello si deve aprire durante la collisione;
- Dopo l'impatto il manichino deve poter essere estratto con facilità e senza l'ausilio di attrezzi particolari;
- La perdita di carburante dal serbatoio non deve superare i 30 g/min;
- Non devono essere presenti nuove fonti di rischio per il conducente a seguito dell'impatto, come per esempio il distacco di componenti costituenti lo sportello. [1]

È possibile poi eseguire un altro test, l'*Euro-NCAP side-impact pole-test*, quando un veicolo è dotato di un dispositivo di protezione della testa. Non è possibile eseguirlo quando tale protezione è classificata *Verde* nel l'*Euro-NCAP side-impact MDB test*. In questo test l'autovettura viene posta su di un carrello mobile viaggiante alla velocità di 29 km/h e fatta impattare lateralmente contro un palo di diametro 254 mm . [5]

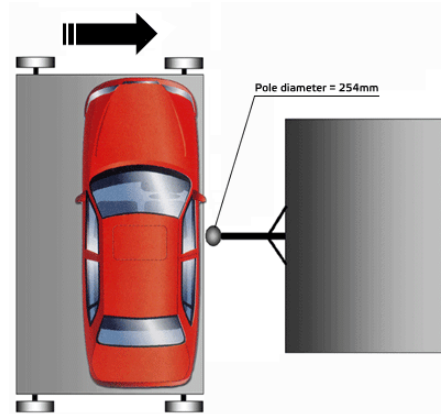


Figura 1. 4: *Euro-NCAP side-impact pole-test* [4]

Tale test risulta essere più severo dal punto di vista resistenziale dei dispositivi anti-intrusione, in quanto l'energia in gioco durante l'impatto viene scambiata attraverso una superficie più ristretta rispetto a quella disponibile durante l'urto con barriera MDB e, di conseguenza, le forze agenti sui dispositivi risultano più elevate. [1]

Injury Criteria

Gli Injury criteria sono dei criteri di sicurezza utilizzati per legare le reazioni del corpo umano sviluppate durante l'impatto e alcuni parametri misurati nell'impatto stesso.

In caso di impatto laterale i criteri più comuni sono [6]:

- HPC (*Head Performance Criterion*)

$$HPC = \max \left((t_2 - t_1) \cdot \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \right] \cdot \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right)^{2.5} < 1000 \quad (1.1)$$

in cui t_1 e t_2 sono rispettivamente gli istanti di inizio e fine contatto scelti in modo da massimizzare la funzione, mentre a rappresenta l'accelerazione della testa espressa in m/s^2 .

- TPC (*Thorax Performance Criterion*):
 1. *Deflessione del torace*: la massima deflessione di ogni costola deve essere inferiore ai 42 mm.
 2. *Criterio Viscoso*:

$$VC = \max\left(\frac{D}{0.14} \cdot \frac{dD}{dt}\right) < 1m/s \quad (1.2)$$

in cui D rappresenta la deflessione delle costole.

- APF (*Abdominal Peak Force*): è una misura della massima forza addominale e deve essere inferiore a 2.5 kN
- PSPF (*Pubic Symphysis Peak Force*): è la forza agente sulla zona pelvica e deve essere inferiore a 10 kN .

1.1.2 US side impact test

La direttiva che si occupa di regolamentare gli impatti laterali negli Stati Uniti d'America è la FMVSS (*Federal Motor Vehicle Standard*) N°214, redatta nel 1990. Sono previsti due test da eseguire: il *Quasi-Static test* e il *Dinamic test*. Il primo si occupa di misurare l'intrusione della portiera nel vano conducente, mentre il secondo misura le forze che agiscono sul corpo umano durante l'impatto laterale. [1]

Quasi-Static test

Per eseguire questo test un palo d'acciaio con un diametro di 300 mm deve urtare lateralmente una vettura alla velocità costante di 0.03 m/s, finché non è stata raggiunta una deformazione massima della portiera di 450 mm.

Una volta effettuato il test, lo si può considerare superato se sono rispettati questi valori [1]:

- La resistenza media all'urto iniziale $P_{initial}$ per deformare lo sportello di 150 mm, calcolata come:

$$P_{initial} = \frac{\int_0^{150} P \cdot d\Delta}{\Delta_{150}} \quad (1.3)$$

deve essere superiore ai 1250 lb_f nel caso i sedili non siano installati nel veicoli, oppure superiore a 2550 lb_f , nel caso i sedili siano installati. P rappresenta il carico applicato allo sportello, mentre Δ lo deformazione massima imposta.

- La resistenza media all'urto intermedio $P_{intermediate}$ per avere una deformazione di 300 mm, calcolata come (1.4):

$$P_{intermediate} = \frac{\int_0^{300} P \cdot d\Delta}{\Delta_{300}} \quad (1.4)$$

deve essere superiore a 3500 lb_f nel caso i sedili non siano installati nel veicoli, oppure superiore a 4375 lb_f nel caso i sedili siano installati.

- La resistenza di picco all'urto P_{crush} pari alla forza media richiesta per deformare lo sportello più di 350 mm:

$$P_{crush} = \frac{\int_0^{350} P \cdot d\Delta}{\Delta_{350}} \quad (1.5)$$

deve essere maggiore a 7000 lb_f , nel caso i sedili non siano installati nel veicoli, oppure superiore a 12000 lb_f , nel caso i sedili siano installati.

Dinamic test

Per questa tipologia di test la prescrizione americana prevede che un veicolo viaggiante alla velocità costante di 48 km/h urti lateralmente un altro veicolo viaggiante in direzione perpendicolare ad esso alla velocità costante di 24 km/h . Questo può essere simulato facendo scontrare il veicolo impattatore, dotato di una barriera mobile MDB alla velocità di 54 km/h , contro il veicolo da testare fermo e posizionato con l'asse longitudinale a 90° rispetto a quello dell'altro veicolo. Nel veicolo da impattare sono presenti due manichini: uno sul sedile posteriore ed uno su quello anteriore, entrambi dal lato dell'impatto.

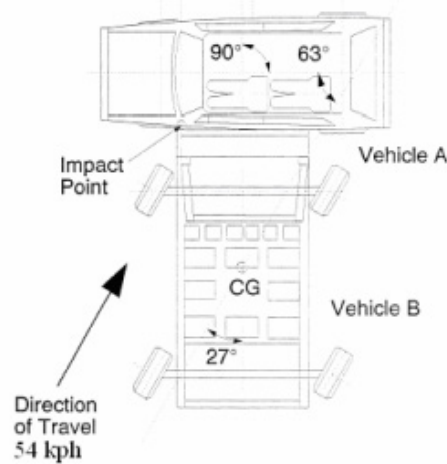


Figura 1. 5: Dinamic Test. [1]

La barriera MDB ha una massa di 1360 *kg*, una larghezza di 1676 *mm*, un'altezza di 560 *mm* ed una profondità di 280 *mm*. Al momento della collisione le ruote del veicolo impattatore sono ruotate di 27° rispetto al proprio asse longitudinale. Il test viene considerato superato se:

- Le decelerazioni del torace e della zona pelvica sono nei limiti consentiti;
- I componenti della portiera urtata non sono separati;
- Le altre portiere non sono aperte e non presentano separazione dei componenti.[1]

1.2 Barre anti-intrusioni laterali

Le barre anti-intrusione laterali posizionate nelle portiere degli autoveicoli sono componenti fondamentali per limitare i danni provocati dagli urti laterali con altre autovetture o oggetti fissi come pali.

Le caratteristiche di cui devono essere dotate sono soprattutto elevata rigidezza, elevata capacità di assorbire energia durante un impatto, cercando di trovare un compromesso fra la massimizzazione della deformazione e la minimizzazione del carico trasmesso.

Per questi componenti esistono diverse geometrie e tecniche di posizionamento all'interno della portiera.

Per quanto riguarda le geometrie, quelle più comuni sono tubolari a sezione tonda o quadrata e a sezione ondulata, ottenuta tramite stampaggio di lamiera.

Nelle Figura 1.5 si riportano due esempi di barre a sezione tonda, una di una *Nissan Pathfinder / Navara* e una di una *Kia Picanto*.

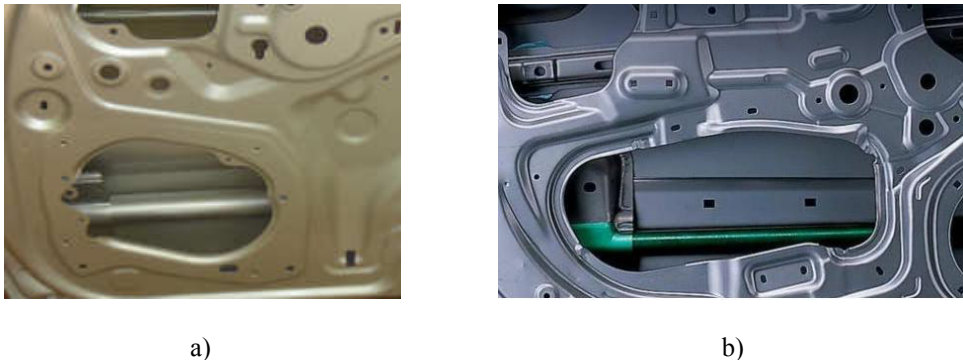


Figura 1. 6: Barra anti-intrusione a sezione tonda a) Nissan Pathfinder / Navara.[6] b) Kia Picanto [7].

Nelle Figura 1.6, invece, si riportano due esempi di barre a sezione ondulata, una di una *Mini* (a) e l'altra di una *Ford B-Max* (b).



Figura 1. 7: Barra anti-intrusione a sezione ondulata a) MINI [1]. b) Ford B-Max[8].

Per quanto riguarda le dimensioni, solitamente le barre a sezione tubolare hanno ingombri compresi fra i 25 mm e i 32 mm , con spessori dell'ordine di 2.5 mm , mentre quelle a sezione ondulata ingombri compresi fra i 15 mm e i 20 mm con spessori di circa 2 mm . La lunghezze sono circa 900 mm [1].

Ad esempio la Nissan Pathfinder / Navara è dotata di barre tubolari (Figura 1.5a) aventi un diametro di 31.8 mm , uno spessore 2.6 mm e una lunghezza di 878 mm . [6]

La MINI, invece, (Figura 1.6a) è dotata di barre a sezione ondulata formate da tre onde. L'altezza complessiva della sezione è 60 mm , mentre ciascun onda, profonda 15 mm , dista dall'altra 15 mm . [1]

All'interno di una portiera possono essere disposte in vari modi:

- Longitudinalmente: solitamente sono impiegate una o due barre opportunamente distanziate come mostrato in Figura 1.7a
- diagonalmente come illustrato in Figura 1.7b-c.

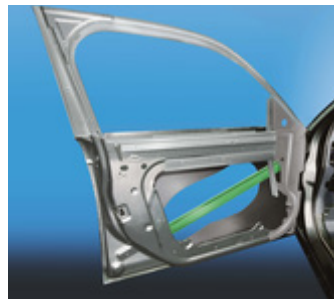
Per quanto riguarda i materiali, quelli maggiormente usati sono gli acciai alto-resistenziali poiché permettono una riduzione degli spessori aumentando le caratteristiche di resistenza in caso di urto. Si riportano due esempi macchine dotate di barre anti-intrusione laterali, esposte al New York Auto Show del 2006. La prima è una Volvo S80, mentre la seconda è una Hyundai Azera, dotate di barre anti-intrusione rispettivamente in acciaio *Ultra-High-Strength-Steel*, evidenziate in rosso (Figura 1.8a) e in acciaio *Very-High-Strength-Steel*, evidenziate in arancione (Figura 1.8b).



a)



b)

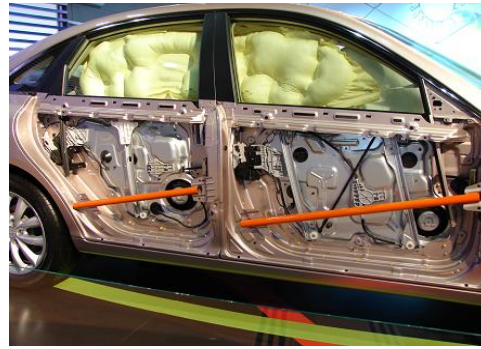


c)

Figura 1. 8: Barre anti-intrusione poste a) longitudinalmente (Mercedes Classe E).[9] b) diagonalmente (Fiat 500). [9] c) diagonalmente. [10]



a)



b)

Figura 1. 9: Barre anti-intrusione a)Volvo S80. b) Hyundai Azera. [11].

Tuttavia un altro materiale possibile, può essere l'alluminio, come nel caso del modello Serie 5 del celebre marchio BMW (Figura 1.9).

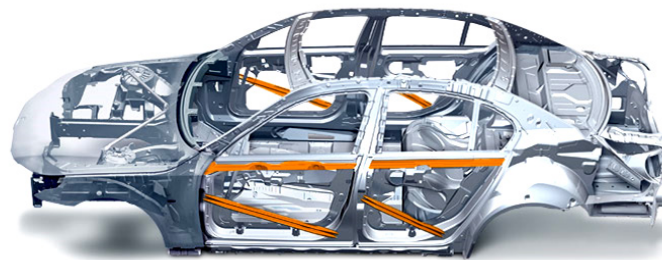


Figura 1. 10: Barre anti-intrusione in alluminio BMW Serie 5. [12]

Capitolo 2

Schiume Metalliche

Le schiume metalliche fanno parte della grande famiglia dei materiali cellulari, ossia materiali bifasici in cui una fase solida coesiste con una fase gassosa. Esse sono dunque formate da celle adiacenti aventi in comune pareti e spigoli disposti in modo da occupare una porzione di spazio tridimensionale. Questi materiali, grazie alla loro struttura, presentano importanti proprietà sfruttate fin dai tempi antichi, quali la leggerezza, l'isolamento termico, l'assorbimento acustico e l'assorbimento dell'energia durante l'impatto. Il sughero, ad esempio, veniva già utilizzato nell'Antica Roma per tappare le bottiglie di vino e fungere dunque da isolante termico, il legno nel settore civile-edile fin dalla Preistoria, il tufo nella costruzione degli insediamenti fin dall'epoca greca. Col tempo poi l'uomo ha iniziato a riprodurre i materiali cellulari artificialmente, ad esempio producendo i polimeri espansi, oggi ampiamente utilizzati e le schiume metalliche [13].

2.1 Morfologia

Una principale distinzione utilizzata nelle schiume si basa sulla morfologia delle loro celle, che possono essere aperte o celle chiuse.

Le schiume a celle chiuse sono costituite da sfere chiuse al cui interno si trova il gas. Tra una sfera e l'altra vi è il materiale solido. Diversamente le schiume a celle aperte sono formate da sfere interconnesse fra loro. Le prime presentano buon isolamento termico e proprietà meccaniche superiori poiché le pareti cellulari conferiscono rigidità, le seconde, invece, migliore assorbimento acustico. [1]

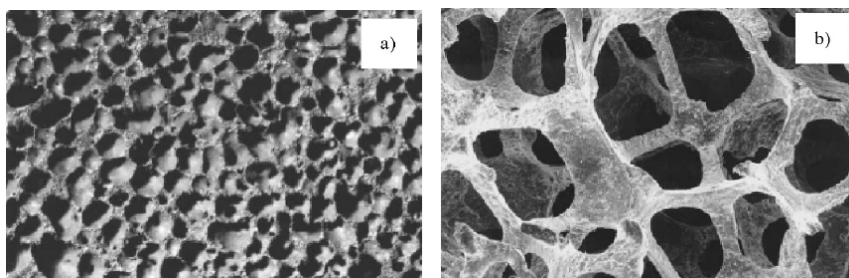


Figura 2. 1: a) Schiuma a celle chiuse. b) Schiuma a celle aperte. [14]

Tuttavia le schiume possono avere morfologie intermedie rispetto a quelle appena descritte. Da ciò variano anche le proprietà. Si parla dunque di *Grado di apertura delle celle*, che può variare da “Molto aperte” a “Completamente chiuse”. A seconda delle applicazioni per cui le schiume sono utilizzate, il Grado di Apertura desiderato può variare.

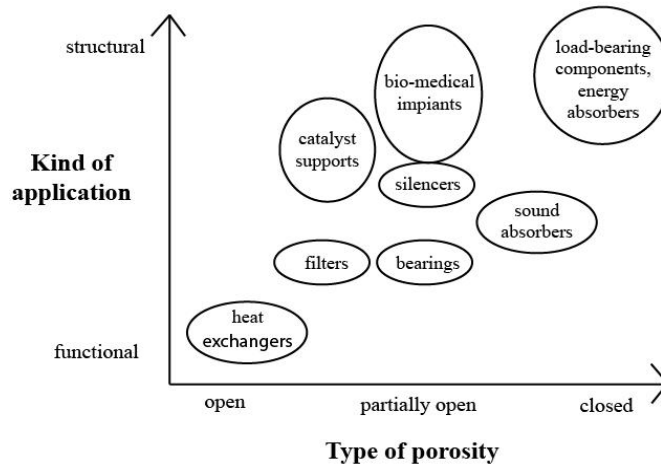


Figura 2. 2: Applicazioni dei materiali cellulari in base al Grado di apertura [15].

Come si può notare le strutture a celle aperte sono utilizzate per lo più per applicazioni funzionali, ad esempio come scambiatori di calore, invece, quelle a celle chiuse soprattutto per applicazioni strutturali, ad esempio assorbitori di energia. [15]

In base al metodo di produzione utilizzato, alle applicazioni e alle proprietà desiderate, si effettua la scelta del materiale da utilizzare per le schiume metalliche. I materiali utilizzati più comuni sono: Alluminio, Nickel, Zinco, Rame e Acciaio.

2.2 Metodi di produzione

I metodi di produzione delle schiume metalliche sono tanti, ma solo alcuni vengono utilizzati industrialmente. In base al metodo produttivo usato i valori di porosità raggiungibili e i tipi di metalli impiegati variano.

Vengono classificati in quattro categorie, in base allo stato iniziale del metallo da schiumare:

- Metallo liquido
- Metallo solido in polvere

- Vapori metallici
- Ioni metallici

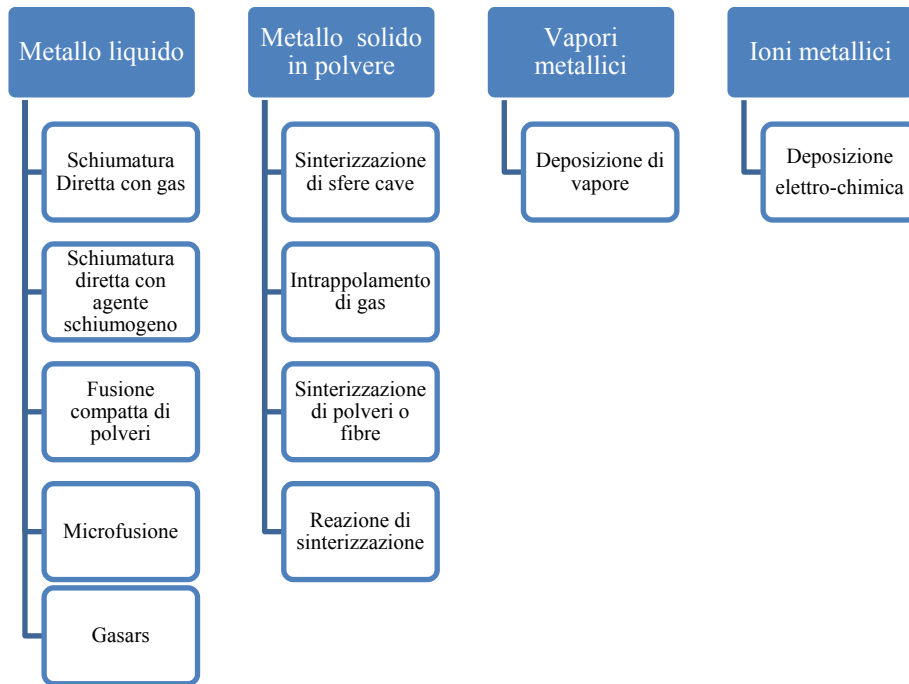


Figura 2. 3: Riassunto delle tecniche di produzione delle schiume metalliche [15].

Di seguito si descrivono quelli di maggior utilizzo industriale, focalizzando l'attenzione sul metodo di interesse in questo studio, ossia la *Fusione compatta di polveri* [15]:

- *Compattazione di polveri:* le polveri del metallo e dell'agente schiumogeno vengono mescolate e compattate ottenendo un prodotto semi-finito senza alcuna porosità residua. La scelta del metodo di compattazione dipende dalla forma del precursore che si desidera ottenere. Tuttavia, quello più economico risulta essere l'estrusione. Successivamente il precursore viene sottoposto a trattamenti termici alla temperatura prossima al punto di fusione della matrice del materiale, in modo da permettere, grazie all'agente schiumogeno, l'espansione del materiale del precursore e la formazione della struttura porosa. I tempi di espansione possono variare da secondi a minuti, in funzione della grandezza e della temperatura del precursore. Il grado di massima espansione del precursore e la densità della schiuma da ottenere possono essere controllati modificando il contenuto di agente

schiumogeno e alcuni parametri caratteristici della schiuma, come la temperatura e le velocità di riscaldamento.

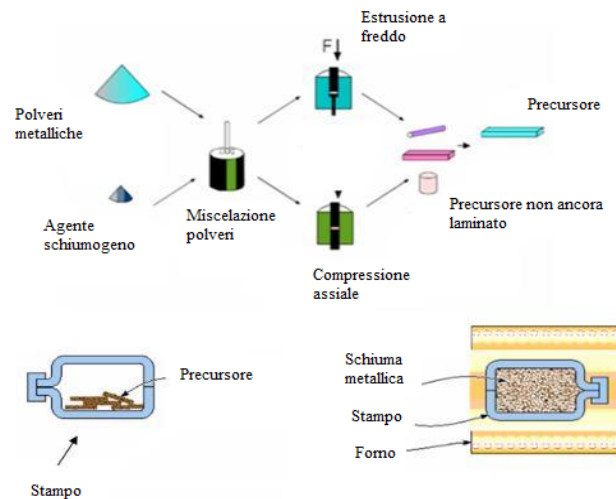


Figura 2. 4: Metodo di produzione tramite compattazione delle polveri [1]

I metalli più utilizzati sono Alluminio, Zinco e Acciaio. Solitamente con Alluminio e Zinco si usa il TiH_2 come agente schiumogeno, mentre con l'Acciaio il $SrCO_3$. Tuttavia questo metodo può essere applicato anche a materiali come Ottone, Piombo, Oro e Stagno. Con questo processo si possono ottenere strutture a celle chiuse con porosità elevate comprese fra il 60% e il 90%, con una resistenza meccanica superiore a quelle a celle aperte e dotate di un rapporto rigidità-peso elevato. I nomi commerciali delle schiume di Alluminio fatte in questo modo sono *Foaminal* e *Alulight*.

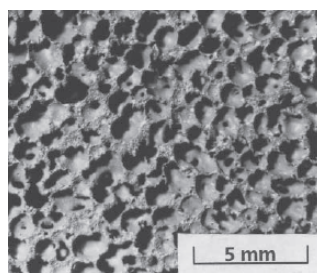


Figura 2. 5: Tipica sezione di una schiuma formata con il metodo di compattazione delle polveri. [15]

In particolare le schiume ottenute sono adatte soprattutto ad applicazione in cui si richiedono poco peso ed elevata capacità di assorbire energia. Si possono fare facilmente anche pannelli sandwich ponendo un cuore di schiuma racchiusa fra lastre metalliche di Alluminio, Titanio o Acciaio o

strutture tubolari. Esistono vari metodi per riempire tubi con la schiuma, ad esempio per schiumatura diretta o per incollaggio. Nel corso di questo studio la schiumatura diretta è quello di interesse. Il precursore di schiuma viene posizionato all'interno della struttura da riempire e insieme vengono messi nel forno, affinché il precursore incominci il processo di schiumatura. L'importante è che cuore e rivestimento presentino punti di fusione differenti per evitare la fusione delle lastre durante la schiumatura, ad esempio acciaio accoppiato alla schiuma di Alluminio. Solitamente la struttura ottenuta in questo modo è particolarmente adatta ad impieghi in cui si richiedono elevata capacità di assorbire energia e basso peso.

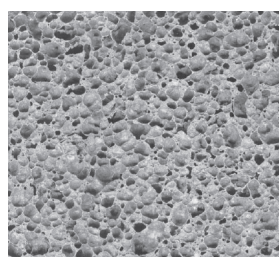
- *Schiumatura diretta con agente schiumogeno*: in questo metodo si aggiunge al metallo fuso un agente schiumogeno, ad esempio TiH_2 , in grado, mediante un riscaldamento, di far diventare la miscela ottenuta schiuma. Successivamente la schiuma, una volta raffreddata, solidifica.
- *Schiumatura diretta con iniezione di gas*: nel metallo liquido viene iniettato del gas proveniente da una fonte esterna, ad esempio aria, azoto o argon. La miscela ottenuta viene mescolata con giranti rotanti in modo da ottenere bolle di gas molto piccole e distribuite uniformemente, che risalgono verso la superficie e vengono tolte dalla miscela con l'ausilio di nastri trasportatori. Successivamente viene fatta raffreddare e solidificare.
- *Microfusione con schiume polimeriche*: in questo procedimento si parte con l'aver una schiuma polimerica, ad esempio poliuretano, dotata di una struttura a celle aperte. Tale schiuma, dopo esser stata riempita con un impasto liquido di un materiale resistente al calore, viene rimossa con un trattamento termico e sostituita dalla colata di metallo fuso di cui si vuole ottenere una struttura schiumata. Così il metallo, raffreddandosi, solidifica e l'impasto liquido precedentemente inserito viene rimosso con l'ausilio di acqua in pressione, permettendo di avere una struttura metallica uguale a quella polimerica iniziale.
- *Deposizione del vapore*: sulla superficie fredda del precursore che definisce la forma della schiuma voluta (schiume di poliuretano o lattice block) viene depositato del vapore metallico che, condensando, crea un film. Una volta che la struttura si è raffreddata, è possibile rimuovere il precursore mediante trattamenti termici e ottenere la schiuma metallica della forma desiderata.

Si riporta una tabella riguardante i 5 metodi di produzione in cui vengono riassunte le loro principali caratteristiche, ossia i nomi commerciali delle schiume prodotte, la porosità raggiunta e i metalli utilizzati.

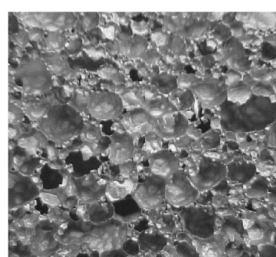
Tabella 2. 1: Caratteristiche metodi di produzione usati industrialmente [15].

<i>Metodo di produzione</i>	<i>Nome commerciale schiume</i>	<i>Porosità raggiungibile</i>	<i>Metalli usati</i>
<i>Compattazione di polveri</i>	<i>Foaminal Alulight</i>	60-90%	<i>Alluminio Zinco Piombo</i>
<i>Schiumatura diretta con agente schiumogeno</i>	<i>Alporas</i>	91-93%	<i>Alluminio Zinco</i>
<i>Schiumatura Diretta con iniezione di gas</i>	<i>Hydro Alluminium</i>	80-97.5%	<i>Alluminio Zinco</i>
<i>Microfusione con schiume polimeriche</i>	<i>Duocel</i>	80-97%	<i>Alluminio Zinco</i>
<i>Deposizione del vapore</i>	<i>Incofoam</i>	93-97.5%	<i>Nichel Rame</i>

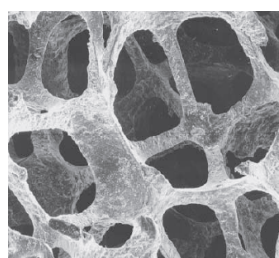
Si riporta, poi, una figura che mostra la morfologia delle quattro schiume:



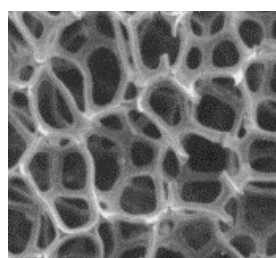
a)



b)



c)



d)

Figura 2. 6: Sezione delle schiume. a) Alporas . b) Hydro Alluminium. c) Duocel. d) Incofoam. [15]

2.3 Proprietà schiume

I materiali schiumati generalmente mostrano una serie di caratteristiche interessanti grazie alla loro struttura porosa, poiché combinano proprietà derivanti dalla matrice metallica con quelle derivanti dalla loro morfologia.

Le proprietà dipendono principalmente dalla densità relativa ρ^* , definita come il rapporto fra densità della schiuma ρ_f e densità del materiale solido delle pareti delle celle ρ_s , e dalla tipologia del processo di produzione scelto, poiché quest'ultimo influenza la morfologia, dunque la forma, la grandezza e il numero dei pori e il grado di apertura delle celle. [16]

Per valutare l'effetto della frazione di porosità e, dunque, anche della densità relativa, sulla variazione delle proprietà morfologiche, si riportano due grafici riguardanti sette campioni di schiuma Al6061 fabbricati nello studio di Youn et al. [17] attraverso il metodo di compattazione delle polveri:

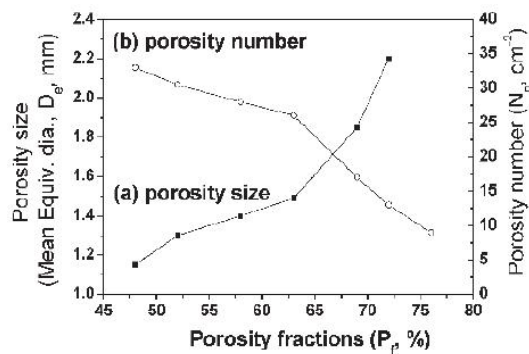


Figura 2. 7: Legame fra la frazione i porosità e la dimensione dei pori. [17]

Si nota come all'aumentare della porosità il numero di pori diminuisca e la grandezza aumenti.

Gran parte delle proprietà delle schiume, dunque, seguono una legge generale, che è funzione della densità relativa del tipo:

$$\frac{x_f}{x_s} = k \cdot (\rho^*)^n \quad (2.1)$$

in cui x_f e x_s rappresentano rispettivamente una proprietà generica della schiuma e del solido, k e n sono due costanti solitamente con valori compresi rispettivamente fra 0.1 e 4 e 1.5 e 2 e ρ^* è la densità relativa. Ad esempio il

Modulo di Young, il Modulo Trasversale G e lo sforzo di Plateau della schiuma sono calcolabili con la formula scritta sopra. [18]

Esistono indici di performance per poter paragonare diverse tipologie di schiume fra loro e fare una scelta in base a ciò di cui si necessita e ai vincoli esistenti. Gli indici sono un gruppo di proprietà di un materiale che, se minimizzati o massimizzati, massimizzano alcuni aspetti di una performance di un componente ingegneristico [18]. A questo proposito, si riporta un diagramma di Ashby [18] riguardante la rigidezza e la densità relativa delle tipologie disponibili di schiume prodotte con metodi differenti. In tale diagramma si ha sull'ascissa il Modulo di Young e sulla ordinata la densità, indicata anche nelle parentesi all'interno del grafico. Le rette invece, rappresentano alcuni indici utilizzati per descrivere le performance delle schiume.

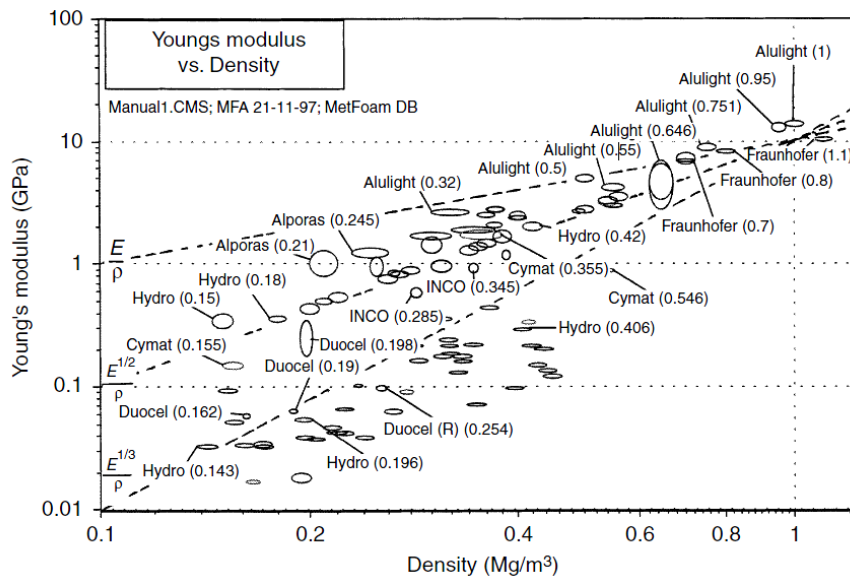


Figura 2. 8: Diagramma di Ashby [18].

Per cui i tipi di schiume posti sulla medesima retta possiedono lo stesso indice di performance e sono dunque equivalenti da quel punto di vista. In questo caso gli indici presenti riguardano le rigidezze specifiche [18]:

- E/ρ_f : ha l'obiettivo di avere il minimo peso con il vincolo di una data rigidezza, per svolgere la funzione di supporto.
- $E^{1/2}/\rho_f$: ha l'obiettivo di avere il minimo peso con il vincolo di una data rigidezza per svolgere la funzione di trave
- $E^{1/3}/\rho_f$: ha l'obiettivo di avere il minimo peso con il vincolo di una data rigidezza per svolgere la funzione di pannello

Dunque, poiché le schiume di Alluminio possono avere un vasto range di densità e proprietà, in base alle applicazioni è necessario ricavare le proprietà che la struttura in schiuma deve avere per ottenere il comportamento desiderato. Si sposti ora l'attenzione sulle principali caratteristiche delle schiume metalliche, quali peso specifico basso, elevata capacità di assorbire energia, elevata rigidità specifica, bassa conduttività termica ed elettrica, buon smorzamento meccanico e acustico, resistenza al fuoco, permeabilità e buona lavorabilità. Quella di maggiore interesse è l'assorbimento di energia, su cui si basa il successivo paragrafo.

Parlando, invece, della proprietà di smorzamento acustico, un'onda sonora che cade su una struttura porosa in parte si riflette e in parte si trasmette da cella a cella nella struttura. L'impulso di pressione dell'onda acustica trasmessa determina la vibrazione del reticolo interno, con conseguenti emissioni di onde che vengono smorzate maggiormente, trasformandosi così in calore. L'efficienza di assorbimento risulta essere inversamente proporzionale alla dimensione dei pori e, in alcuni casi, aumenta se vi sono molti pori aperti. [16]

Un'altra caratteristica delle schiume è che rispetto ai materiali solidi, presentano valori di conduttività termica ed elettrica molto minori, a causa del fatto che vi è una piccola quantità di metallo in un dato volume di schiuma metallica. Per l'alluminio schiumato con densità di 460 kg/m^3 si ha una conduttività termica di 4.2 kJ/(mhk) , contro 824 kJ/(mhk) per l'Alluminio solido. Spesso, dunque, le schiume metalliche vengono utilizzate anche come isolanti termici ed elettrici [16].

2.3.1 Assorbimento di energia

La capacità di assorbire energia durante gli impatti è una delle principali caratteristiche delle schiume metalliche, in particolare delle schiume d'alluminio. Queste, infatti, sono più efficienti rispetto alle schiume polimeriche poiché si deformano plasticamente all'impatto senza ritorni elastici. Infatti è fondamentale che la schiuma sia in grado di assorbire energia senza che il massimo sforzo superi il limite massimo oltre il quale si verificano danni.

I fattori che in particolar modo caratterizzano l'assorbimento d'energia sono la scelta del materiale della matrice, la geometria cellulare e la densità relativa.

Si riporta un diagramma *Sforzo di compressione-Energia assorbita per unità di volume*, in funzione del tipo e dalla densità della schiuma usata (Figura 2.9).

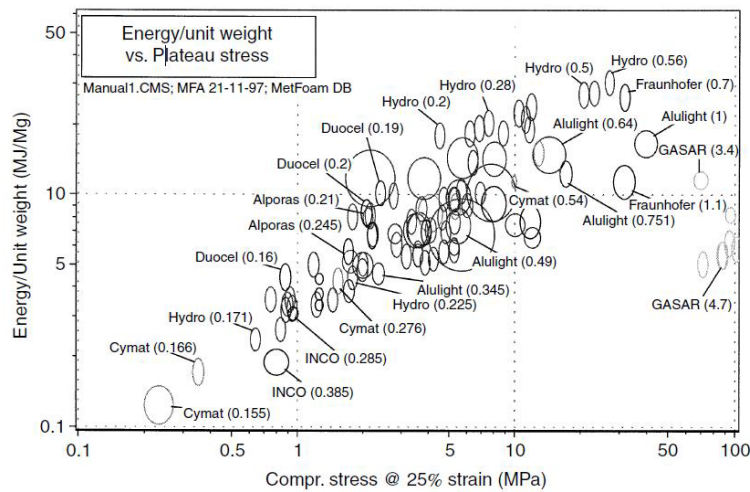


Figura 2. 9: Diagramma Sforzo di compressione-Energia assorbita per unità di volume in funzione della densità della schiuma [18].

Per una schiuma di alluminio prodotta con il metodo di compattazione delle polveri, ad esempio Al6061, e densità circa 0.5 kg/dm^3 si hanno valori di energia assorbita e sforzo di compressione di circa 10 MJ/mg e 10 MPa .

Si riporta un andamento schematico della curva Sforzo-Deformazione per una schiuma metallica sottoposta a compressione:

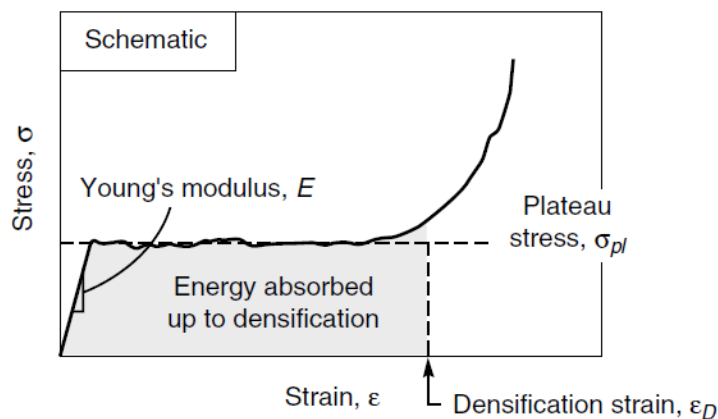


Figura 2. 10: Curva di compressione schematica di una schiuma metallica [18]

Come è visibile nella figura, lo sforzo di deformazione, denominato sforzo di Plateau (σ_p), risulta essere costante fino circa alla deformazione di densificazione (ϵ_D), così da poter assorbire energia di deformazione che verrà poi convertita in modo irreversibile in energia di deformazione plastica.

L'energia assorbita, dunque, corrisponde all'area sottesa dalla curva fino alla deformazione ε_D :

$$E_{abs} = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.2)$$

Si nota inoltre, come la curva in Figura 2.10 possa essere divisa in tre zone: una regione di elasticità lineare, una regione di collasso e una regione di densificazione. Nella prima regione lo sforzo si mantiene basso, per poi rimanere costante nella seconda, in cui il meccanismo di collasso si propaga da una cella all'altra. Quando il collasso si è propagato totalmente si arriva nella terza zona, in cui lo sforzo smette di essere costante e inizia a crescere rapidamente, accompagnato da un ulteriore aumento della deformazione. Teoricamente per avere una ottima capacità di assorbire energia, occorre avere un comportamento della curva Sforzo-Deformazione più rettangolare possibile. In sostanza, il comportamento ideale di un assorbitore è quello che si vedrebbe nel diagramma Sforzo-Deformazione di un materiale elastico perfettamente plastico. Le schiume presentano un comportamento molto simile, malgrado la piccola pendenza di tale legame. L'andamento della curva per una schiuma può dipendere da alcuni fattori. Alcuni di questi sono la densità, la velocità di deformazione e la direzione di applicazione del carico rispetto alla direzione di schiumatura.

Legame della curva Sforzo-Deformazione con la densità

Dagli studi effettuati da vari autori si osserva un aumento dell'energia assorbita con l'aumentare della densità.

Hall et al. [19] hanno studiato il legame con la densità delle curve di sforzo-deformazione ottenute da un test di compressione quasi statico effettuato a $1.5 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ e da un test di compressione dinamico a $2 \cdot 10^3 \text{s}^{-1}$. Questi test sono stati effettuati su provini di schiuma in alluminio 6061 a celle chiuse, caratterizzati da diversi valori di densità. Si riportano le curve ottenute per basse (Figura 2.11 a) ed alte velocità di deformazione (Figura 2.11 b).

Nella Figura 2.11a, dunque, sono stati riportati tre esempi di curve Sforzo-Deformazione per ciascuna delle due densità considerate, 0.82 g/cm^3 e 0.34 g/cm^3 . Come si può notare la forma di tali curve ricorda quella schematica descritta in precedenza e in entrambe le curve si raggiunge una deformazione superiore al 60%. Si nota subito come lo sforzo nella zona di collasso e la velocità di densificazione aumentino con l'aumentare della densità. Nelle curve a bassa densità si può notare, invece, una piccola caduta di carico dopo la fase elastica e delle lievi oscillazioni dello sforzo nella regione di collasso. Al contrario, nelle curve ad alta densità ciò non si verifica. Vi è infatti un andamento monotono crescente dello sforzo. In Figura 2.11b è riportato

l'andamento della curva Sforzo-Deformazione per tre valori di densità: 0.84 g/cm^3 , 0.45 g/cm^3 , 0.31 g/cm^3 . Si vede una forte dipendenza dalla densità che, però, non è lineare, come è dimostrato anche nella Figura 2.12, in cui sono rappresentati i valori dell'energia assorbita in funzione della densità.

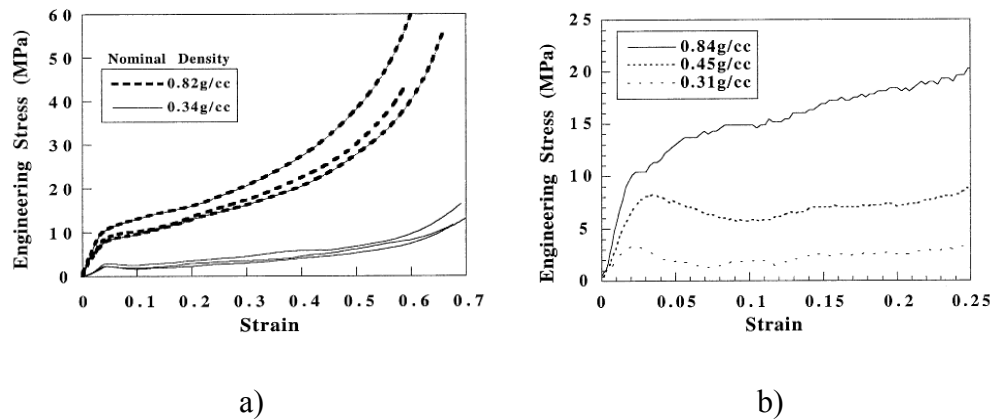


Figura 2. 11: Curva Sforzo-Deformazione a) Quasi-statica nel caso di due valori di densità. b) a $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ nel caso di tre valori di densità [19].

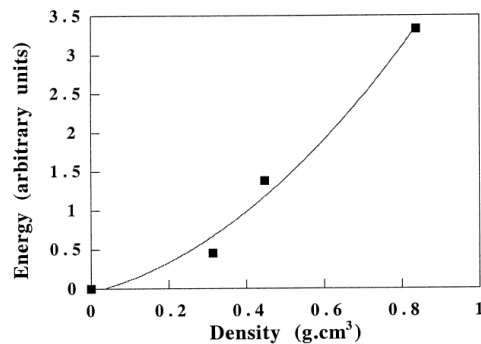


Figura 2. 12: Legame Energia assorbita-Densità nel caso di compressione [19].

Si nota come all'aumentare della densità, aumenti anche la quantità di energia assorbita.

Il legame fra sforzo di flessione e densità, invece, è stato studiato da Yu et al. [20], eseguendo prove di flessione su tre punti di provini rettangolari in schiuma d'alluminio di dimensioni $20 \times 25 \times 200 \text{ mm}^3$. Come risultato hanno ricavato un legame lineare in un piano logaritmico fra lo sforzo di flessione e la densità, riportato in Figura 2.13.

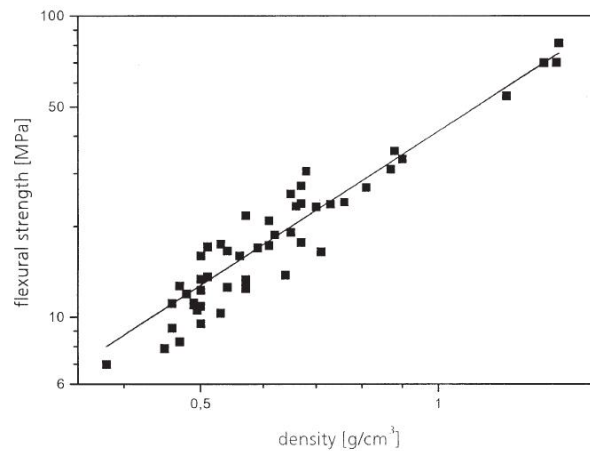


Figura 2. 13: Legame Energia assorbita-Densità nel caso di flessione in un piano logaritmico[20].

Sensitività alla velocità di deformazione

Si affronta ora l'argomento riguardante la sensitività della curva Sforzo-Deformazione alla velocità di deformazione. In letteratura esistono opinioni divergenti, dal momento che le prove effettuate dai diversi autori hanno spesso parametri di prova molto differenti l'uno dall'altro e dunque è plausibile giungere a conclusioni diverse.

In particolare Hall et al. [19], hanno effettuato test di compressione a velocità di deformazione diverse comprese fra $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a 2000 s^{-1} su schiume d'alluminio preparate con il metodo di compattazione delle polveri con densità pari a 0.52 g/cm^3 . In base ai risultati ottenuti, non è stata trovata una particolare sensitività delle curve di compressione alla velocità di deformazione. In figura 2.14 si mostrano le curve ottenute per velocità di deformazioni molto basse (*Quasi-static*), e per valori superiori (970 s^{-1} e 2000 s^{-1}).

Anche Youn et al. [17] hanno analizzato questo aspetto effettuando gli stessi test, sempre su schiume derivanti dalla compattazione delle polveri, ma considerando velocità di deformazioni minori (0.01 s^{-1} e 10 s^{-1}), arrivando alla medesima conclusione. Un altro studio, poi, è stato effettuato da Deshpande et al. [21], attraverso test di compressione di schiume Alulight a velocità di 10^{-3} s^{-1} e 3000 s^{-1} . In figura 2.15 sono mostrate le due curve ottenute. Si nota come anche in questo caso non vi sia una evidente dipendenza dalla velocità.

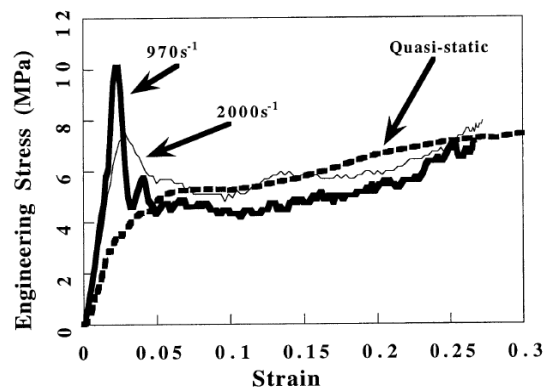


Figura 2. 14: Tre esempi di curve Sforzo-Deformazione con velocità di deformazione differente e densità di 0.52g/cm^3 [19].

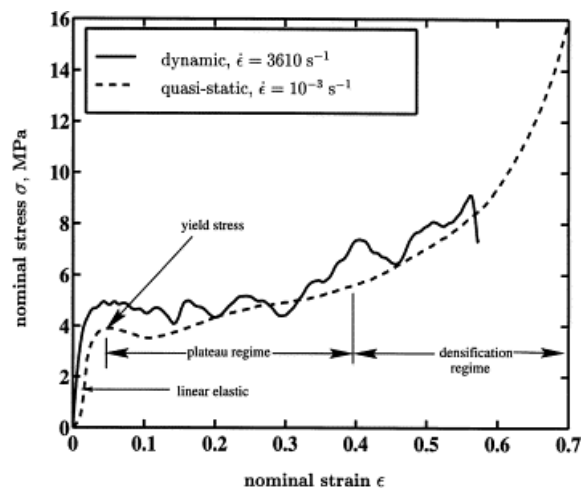


Figura 2. 15: Curve di compressione di schiume Alulight per velocità di deformazione pari a 10^{-3} e 3610 s^{-1} [21]

Paul et al. [22] invece, hanno eseguito test di compressione su schiume d'alluminio di tipo Alporas e hanno evidenziato una particolare sensibilità alla velocità di deformazione degli andamenti delle curve ricavate.

I test sono stati eseguiti su provini rettangolare e con velocità che variano da $3.3 \cdot 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ a $1.6 \cdot 10^{-1}\text{ s}^{-1}$. Hanno notato, dunque, una variazione della σ_{pl} e dell'energia assorbita in funzione della velocità di deformazione. Si riportano i grafici su scala logaritmica in Figura 2.16.

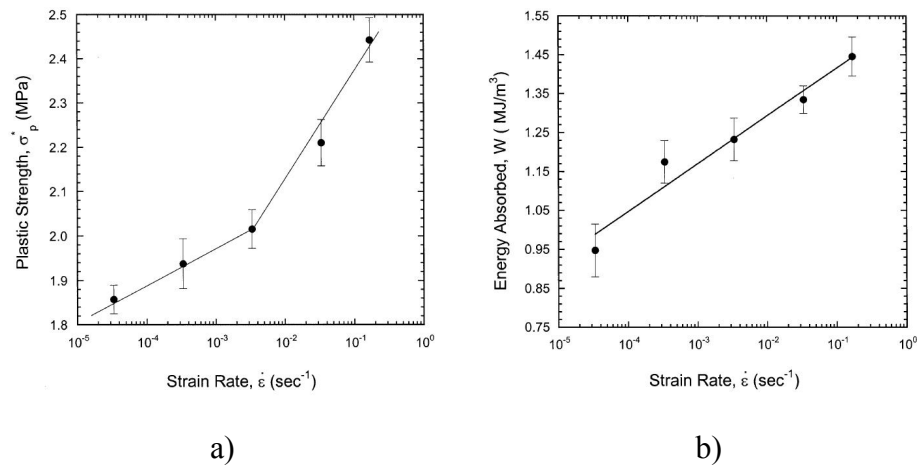


Figura 2. 16: a) Legame Sforzo plastico-Velocità di deformazione. b) Legame Energia assorbita-Velocità di deformazione.[22]

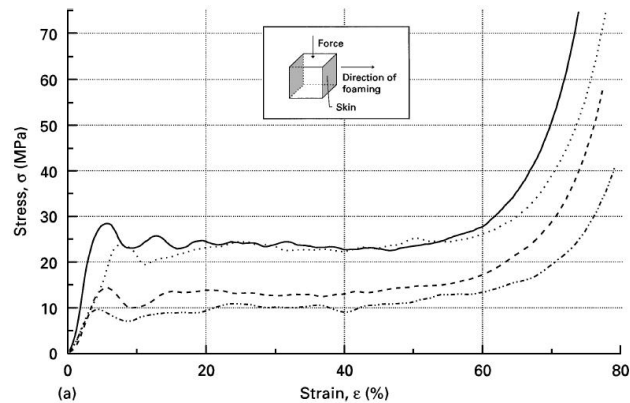
Si osserva come un aumento della velocità di deformazione comporti un crescita dello sforzo di plateau, inizialmente lieve e poi maggiore per velocità superiori a circa 10^{-2}s^{-1} . Conseguentemente se aumenta lo sforzo, cresce anche l'energia assorbita, a causa dell'allargamento dell'area sottesa dalla curva Sforzo-Deformazione. Tuttavia nella Figura 2.16b, che rappresenta il legame fra energia assorbita e velocità di deformazione, non si manifesta la stessa bi-linearità trovata per lo sforzo, a causa del diverso meccanismo di deformazione che le celle presentano a differenti velocità di deformazione. Solitamente, infatti, durante una compressione, la deformazione tende a localizzarsi in una fascia sottile, causando l'instabilità delle pareti cellulari. La localizzazione della deformazione in questo modo comporta una maggiore velocità di deformazione localizzata rispetto a quella nominale. In genere, il cedimento ad alta velocità si manifesta in una sola fascia a contatto con la superficie di applicazione del carico e si propaga uno strato dopo l'altro. A basse velocità le microinerzie, che nel lavoro sono definite utilizzando la teoria di Klintworth et al. [23] hanno poco effetto, mentre domina l'instabilità delle pareti che è il consueto meccanismo di deformazione delle schiume. Tuttavia ad elevate velocità di deformazione l'instabilità è contrastata dall'inerzia delle celle. Questa aumenta la resistenza plastica e riduce la concentrazione.

Risultati simili per le schiume Alporas sono stati ricavati anche da Mukai et al. [24]. e Cady et al. [25].

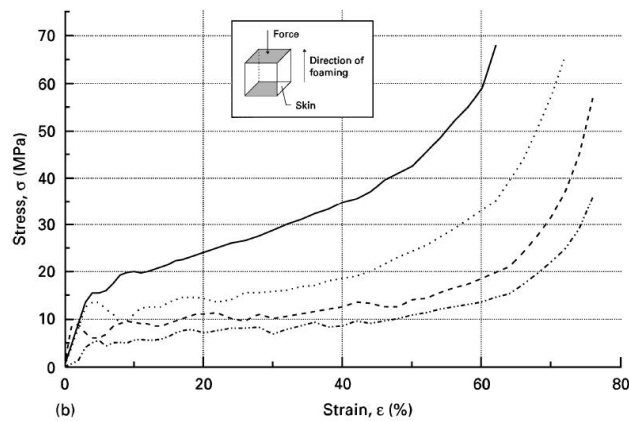
Sensitività alla direzione di applicazione del carico

Per quanto riguarda, invece, il comportamento isotropo delle schiume d'alluminio, Banhart et al. [26] hanno condotto uno studio sulla compressione di una schiuma in alluminio sollecitata in direzioni diverse. Hanno utilizzato

blocchi di schiuma preparati con il metodo di compattazione delle polveri, di dimensioni $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, con densità che variano da 0.2 a 0.8 g/cm^3 . Inizialmente sono stati eseguiti test di compressione su blocchi di schiuma con pelli compatte, derivanti dalla schiumatura, su due facce apposte e quattro facce libere con porosità aperta dovute al taglio. Il carico è stato imposto prima parallelo alle due pelli, poi perpendicolare, come è mostrato in figura



a)



b)

Figura 2. 17: Curve Sforzo-Deformazione di compressione a) carico applicato parallelo alle due pelli. b) carico applicato perpendicolare alle due pelli. [26]

È stato, dunque, ricavato che la curva cambia a seconda dell'orientamento del carico applicato rispetto alle pelli. Nella Figura 2.17a, si nota la presenza di sforzi, prima dell'inizio della deformazione plastica, molto maggiori e costanti in alcuni tratti. Nella Figura 2.17b, invece, si nota un tratto di sforzo costante

soltanto per basse densità. Il motivo del comportamento del caso con carico e pelli parallele, è l'effetto del supporto fornito dalla parte verticale della pelle esterna che mostrerebbe il tipico comportamento di buckling senza la schiuma collegata. L'interazione della schiuma con le pareti comporta una sovrapposizione del comportamento di buckling con le proprietà della sola schiuma.

Tuttavia, un'altra possibile causa di questo comportamento potrebbe essere l'anisotropia della schiuma stessa. Per cui Banhart et al. [26] hanno analizzato anche il comportamento di campioni di schiuma senza pelli, sollecitati sia in direzione perpendicolare sia parallela alla direzione di schiumatura.

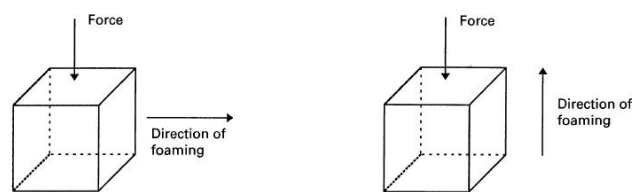


Figura 2. 18: Schiume senza la presenza di pelli con la direzione di applicazione del carico a) perpendicolare, b) parallela alla direzione di schiumatura.[26]

Come risultato si è ricavato che per la schiuma con la direzione dell'applicazione del carico perpendicolare alla direzione di schiumatura, lo sforzo di compressione è leggermente superiore (Figura 2.19). Questo comportamento, che causa una leggera anisotropia delle proprietà meccaniche della schiuma, può essere attribuito alla non perfetta sfericità dei pori, ottenuta durante il processo di schiumatura.

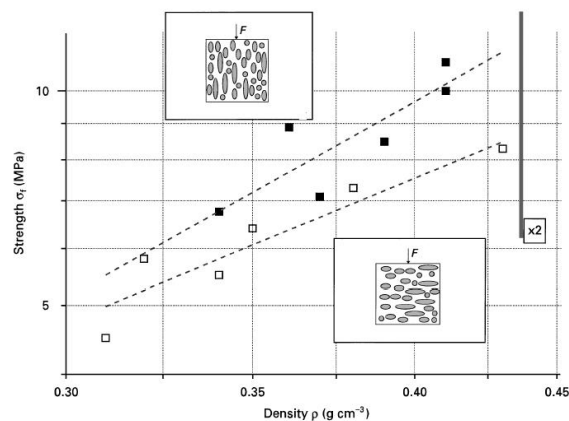


Figura 2. 19: Sforzo di compressione con direzione di carico perpendicolare e parallela alla direzione di schiumatura. [26]

Effetto della geometria

Inoltre Pan et al. [27] hanno esaminato anche l'effetto della geometria di una struttura sull'assorbimento di energia. Questo è un aspetto che è stato in parte trascurato. Hanno eseguito test di compressione su schiume a forma cubica e cilindrica, ricavando che per entrambe si ha un calo dell'energia assorbita e della deformazione con l'aumentare delle dimensioni della geometria. In particolare, aumentando il diametro del materiale si ha un aumento dello sforzo di compressione e un calo della deformazione.

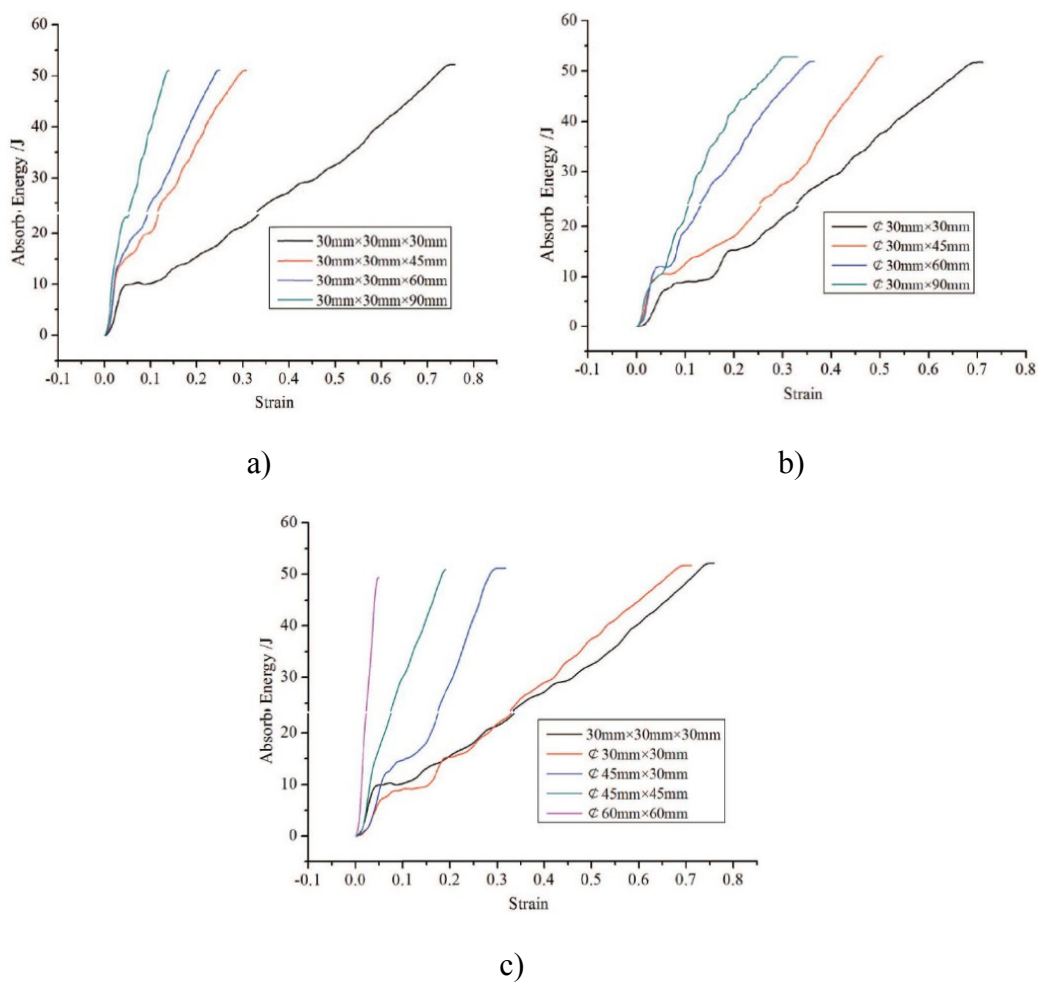


Figura 2. 20: Assorbimento di energia per campioni di diversa lunghezza a)rettangolari. b) cilindrici. c) Confronto dell'assorbimento di energia per dimensioni differenti. [27]

Benefici dell'inserimento della schiuma in tubi

È bene specificare che, non necessariamente, una struttura semplice di schiuma di alluminio possiede ottime capacità di assorbire energia. A volte è possibile inserire la schiuma metallica in profili cavi fatti in materiali tradizionali, ad esempio tubi di acciaio o di alluminio, in modo tale da ottenere una struttura complessiva in grado di assorbire meglio energia. Generalmente riempimenti di schiuma di profili cavi comportano forze di deformazione maggiori nel caso siano sottoposti a flessione, mentre comportano un incremento di assorbimento di energia se sottoposti a impatti scontri assiali. [28]

Peroni et al. [29] hanno notato che, sia nella flessione che nella compressione assiale, l'inserimento della schiuma comporta un importante aumento dell'energia di deformazione. Infatti l'energia assorbita dell'assieme tubo-schiuma risulta maggiore di quella assorbita della somma della schiuma e del tubo presi singolarmente. Si riportano due grafici in cui sono rappresentati rispettivamente gli andamenti del carico di compressione (Figura 2.21) e flessione (Figura 2.22) in funzione dello spostamento, considerando il tubo e la schiuma sia separatamente sia insieme.

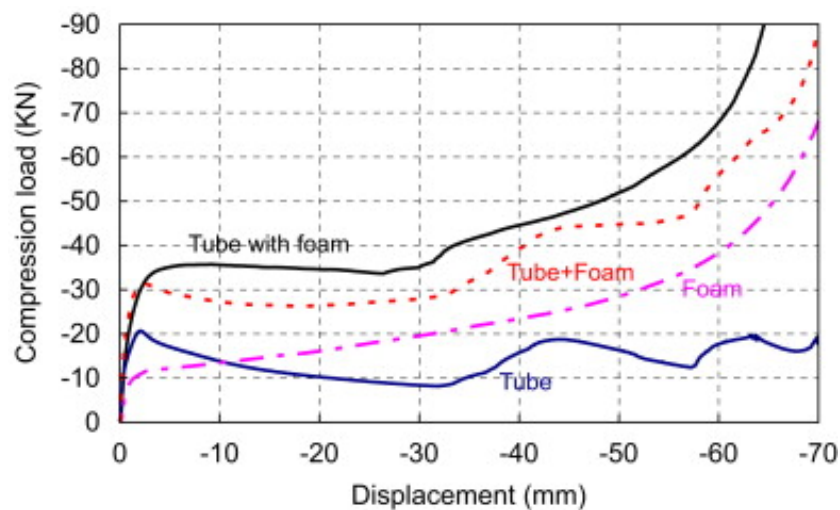


Figura 2. 21: Carico di compressione sulle strutture composite.[29]

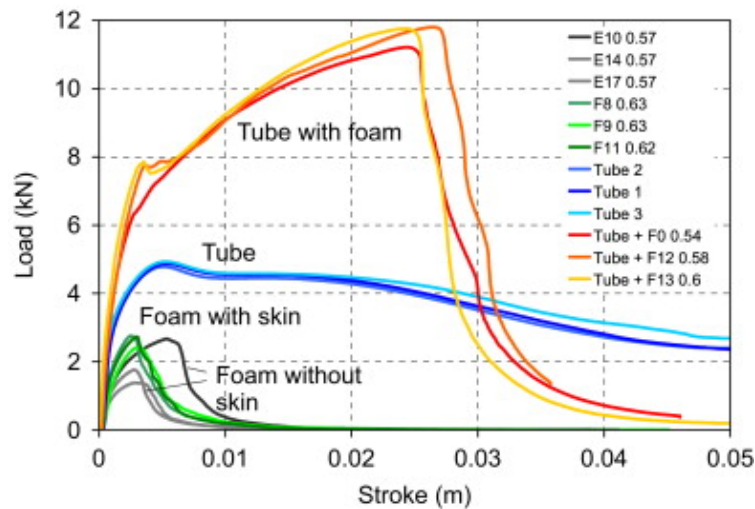


Figura 2. 22: Carico di flessione sulle strutture composite.[29]

Nella Figura 2.21 si nota un'energia di assorbimento molto maggiore per la configurazione che considera la schiuma inserita all'interno del tubo, rispetto a quella ottenuta con il solo tubo e la sola schiuma. Si vede poi come l'energia assorbita dall'insieme tubo-schiuma sia superiore anche alla somma delle energie fornite dai singoli componenti, come affermano anche Banhart [26] e Ashby [18]. Nella flessione, invece, (Figura 2.22) la schiuma da sola, con o senza la pelle esterna, assorbe poca energia di deformazione, al contrario di quanto accade per l'insieme tubo-schiuma. In quest'ultimo, la presenza della schiuma varia il meccanismo di collasso del tubo. Infatti, anche se la schiuma si rompe, il tubo funge da vincolo e evita il tipico meccanismo di collasso a flessione, in cui la ridotta resistenza a trazione della schiuma limita la resistenza di tutto l'insieme. Tuttavia il nuovo meccanismo aumenta lo sforzo di trazione nelle pareti del tubo, così si ha la frattura del tubo e la diminuzione del carico e dell'energia assorbita.

2.4 Applicazioni principali e limiti nell'utilizzo

Le applicazioni delle schiume metalliche teoricamente coprono un grande spazio. Tuttavia vi sono limiti che ne impediscono una elevata espansione. Srivastava et al. in ha riportato un sondaggio effettuato dalla *National Physical Laboratory* (UK) sui i principali settori industriali di potenziale utilizzo delle schiume metalliche attuali, ma anche futuri. Vengono riportati in figura 2.23:

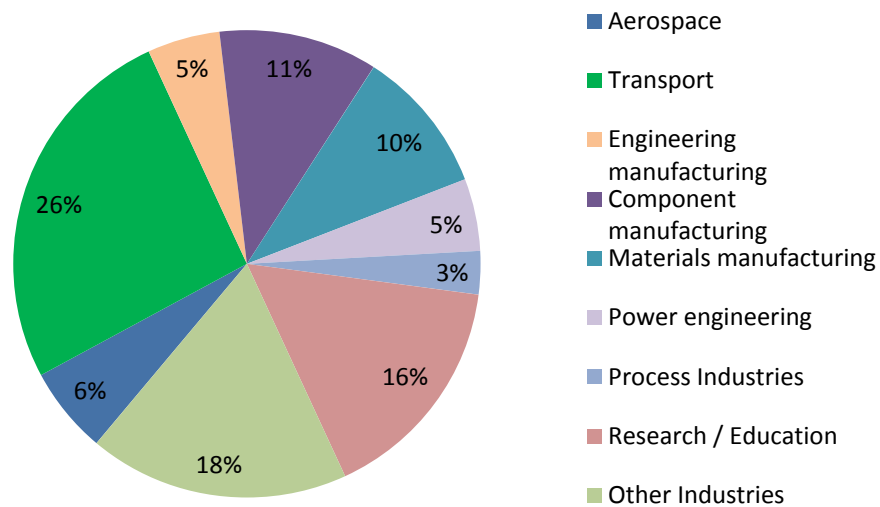


Figura 2. 23: Settori principali attuali e futuri dell'utilizzo delle schiume [14].

Si può notare come i settori di maggiore utilizzo siano quello aerospaziale e quello automobilistico, dati i vantaggi che materiali di questo genere possono fornire. Tuttavia le schiume metalliche trovano impiego anche in altri settori, come nella costruzione delle navi, nell'industria ferroviaria e nell'edilizia. Le schiume infatti possiedono proprietà termo-meccaniche che suggeriscono il loro utilizzo in settori dove si rende necessaria una buona capacità di assorbire energia, dissipazione del calore, riduzione delle emissioni acustiche e componenti con basso peso. [14]

Nel settore aerospaziale si richiedono materiali di basso peso, con caratteristiche isotrope e con buone performance, come pannelli sandwich con cuore di schiuma in grado di sostituire le strutture honeycomb. In particolare, in questo settore le schiume d'alluminio trovano impiego nella costruzione di elicotteri, di turbine e perfino nel rinforzo delle strutture portanti nei satelliti, poiché adatte alle condizioni ambientali nello spazio come cambiamenti di temperatura e vuoti.

Nel settore dei trasporti una delle applicazioni principali delle schiume, in particolare quelle d'alluminio, è assorbire energia durante gli impatti, sia a basse che ad alte velocità.

Le schiume di Nichel e Acciaio, invece, possono essere usate come filtri porosi in grado di separare le particelle solide dai liquidi come olio, benzina e refrigeranti. Le schiume di Nichel trovano inoltre un largo impiego come scambiatori di calore, grazie alla grande superficie di scambio.

Come silenziatori o riduttori di pressione nelle centrali a vapore e nei motori delle macchine, invece, si utilizzano le schiume di rame, grazie alle loro proprietà acustiche nello smorzare il rumore. [16]

Tuttavia, come accennato in precedenza, vi sono problemi nel pieno utilizzo di questi materiali nell'ambito industriale e le ragioni possono essere svariate. Innanzitutto vi è la mancanza di una sufficiente conoscenza delle proprietà e l'incapacità di fare schiume con un livello di qualità costante, unite al fatto che presentano un costo elevato. Una produzione in serie potrebbe diminuire i costi, ma le schiume restano comunque materiali costosi e dunque è necessario conoscere in modo esaustivo le caratteristiche prima di poter utilizzare tali materiali per la sperimentazione di nuove applicazioni [30].

2.4.1 Applicazione nell'ambito automobilistico

Il settore dell'industria automobilistica include il maggior utilizzo delle schiume metalliche, a causa delle caratteristiche che esso richiede:

- basso peso in modo da diminuire il consumo di carburante
- alto assorbimento di energia durante gli impatti per la sicurezza dei passeggeri
- alto assorbimento dei suoni prodotti dalla macchina.

Infatti per quanto riguarda il basso peso le schiume, come già detto, possiedono un range di deformazione quasi elastica e un alto rapporto rigidità – massa.

La seconda caratteristica richiesta è una delle principali proprietà delle schiume metalliche. Nella scelta di una vettura, infatti, fondamentale è la sicurezza che questa può offrire ai suoi passeggeri, come già spiegato nel Capitolo 1. Per cui è vantaggioso utilizzare le schiume per costruire componenti in grado di ridurre i danni causati dagli impatti, siano essi di qualsiasi tipologia. Ancora più efficace è l'effetto dell'utilizzo di strutture formate da un cuore di schiuma e un avvolgimento in materiale convenzionale, ad esempio i pannelli sandwich.

La *Karmann* all'*Fraunhofer-Institute* di Bremen in Germania ha progettato una macchina con alcuni componenti in schiuma di alluminio. In particolare ha posto pannelli sandwich nella parte anteriore e nella parte posteriore della vettura, sostituendo i convenzionali componenti fatti in lamiere di acciaio stampato. Come è riportato nella figura 2.23, si vede che il 67% delle lesioni è dovuto a scontri frontali, mentre il 22% a impatti laterali.

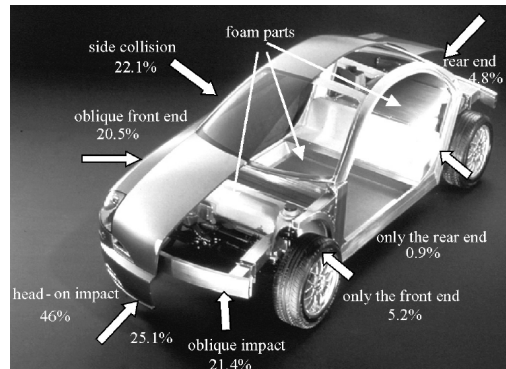


Figura 2. 24: Macchina Karmann con componenti in schiuma di Alluminio. [14]

Di conseguenza l'utilizzo delle schiume come assorbitori di energia all'impatto, nella costruzione dei veicoli può essere fondamentale per la sicurezza dei passeggeri visto che la possibilità di scontri su qualunque lato della vettura sono molto frequenti. Si dovrebbero avere teoricamente componenti in schiuma nella parte anteriore per motivi di sicurezza e nella parte posteriore per ridurre il peso della macchina in sostituzione alle lamiere di acciaio stampato. In questo modo si ottiene una riduzione del peso del 25% e un incremento della rigidità del 700%. [14]

Focalizzandosi dunque sulle barre anti-intrusione, queste devono essere dotate di elevata rigidità, elevata capacità di assorbire energia durante un impatto e devono trovare un compromesso fra la massimizzazione della deformazione e la minimizzazione del carico trasmesso. Queste proprietà infatti raramente sono trovate contemporaneamente dai materiali convenzionali, poiché solitamente se hanno elevata resistenza, hanno bassa tenacità e viceversa. Tuttavia per avere queste proprietà è necessario usare acciai alto-resistenziali con molti trattamenti termici. Tuttavia, vista l'attuale necessità di diminuire il peso delle macchine, sarebbe bene usare materiali compositi, come le schiume [31]. Infatti le schiume metalliche sono preferibili alle schiume polimeriche per la loro maggiore resistenza. L'alluminio, ad esempio, presenta un basso ritorno durante i crash dinamici, minore del 3%, contro il 15% delle schiume in poliuretano.

Generalmente si utilizza la combinazione fra cuore in schiuma e ricoprimento in metallo, ad esempio schiuma di alluminio e acciaio, o schiuma di alluminio e alluminio, in modo da garantire una maggior assorbimento di energia. Infatti l'utilizzo delle schiume permette di ottenere componenti con minor peso, data la possibilità di ottenere pari energia di deformazione, diminuendo, però, gli spessori dei tubi.

In particolare un riempimento in schiuma di alluminio possiede un elevato rapporto resistenza al crash – peso che rende la schiuma in grado di ritardare il crush della sezione durante un impatto a flessione.

Zarei et al. [32] hanno condotto dei test di flessione su tre punti su barre di sezione quadrata di alluminio 6060 di diametro 55 mm e spessore 2 mm vuote e riempite in schiuma di alluminio (*Alporas*), ricavando che per quelle riempite vi è un incremento del carico massimo di flessione del 25% .

Capitolo 3

Metamodelli

Lo studio di sistemi reali ha sempre comportato grosse difficoltà a causa di problemi legati a vincoli che il più delle volte impediscono sperimentazioni dirette, come ad esempio i costi e i tempi. È nata così l'esigenza di costruire dei modelli dei sistemi reali analizzati per avere la possibilità di studiarli direttamente e poter prendere le decisioni migliori riguardo la loro progettazione. Un modello infatti, non è altro che un'astrazione di un sistema reale che permette di prevedere il comportamento del sistema stesso. Un tipico strumento per la creazione dei modelli sono le simulazioni che permettono di rappresentare un sistema complesso in maniera più semplice, focalizzandosi sulle caratteristiche di interesse e adottando opportune semplificazioni per aspetti trascurabili in quel contesto [33]. Analizzando dunque i modelli creati, si dovrebbero ottenere risultati uguali a quelli forniti dai sistemi reali, a patto che i modelli usati siano corretti. Spesso, però, accade che non tutti i modelli siano molto precisi oppure corretti in determinati aspetti, ma ciò non significa che siano automaticamente inadeguati. Nel migliore dei casi, le imprecisioni possono non influenzare le caratteristiche d'interesse, mentre, nel peggiore dei casi, possono distorcere i risultati. [34]

Tuttavia, però, anche i modelli di simulazione a volte possono risultare troppo complessi e dunque troppo costosi dal punto di vista computazionale, necessitando così di ulteriori semplificazioni. In aggiunta, spesso gli spazi delle variabili di progetto sono molto ampi e dunque per la loro esplorazione occorre un numero elevato di simulazioni. È per questo motivo che si può costruire un modello del modello, o meglio un *metamodello*, ovvero una relazione che lega le variabili di progetto e le performance da misurare. I principali scopi dell'uso dei metamodelli sono:

- determinare piani di simulazioni
- capire il comportamento dei sistemi reali prevedendone il comportamento
- ottimizzare alcuni parametri d'interesse.

Negli approcci tradizionali per costruire un metamodello si usa un piccolo set di risultati sperimentali per mettere a punto o verificare un modello di simulazione e poi si costruisce un metamodello basandosi soltanto sui dati generati dalle simulazioni. Solitamente nei metamodelli basati su simulazioni deterministiche

non è rappresentata l'aleatorietà che si riscontra nei sistemi reali. In questo caso, dunque, l'obiettivo è ricavare una accurata stima della risposta, minimizzando lo sforzo computazionale richiesto. Se, invece, le simulazioni svolte sono stocastiche, si deve considerare che la misura della performance è dotata di media e varianza. In questo caso dunque si fanno ripetute simulazioni con le stesse condizioni in modo da ridurre l'effetto randomico nei risultati. Al contrario, nelle simulazioni deterministiche si cerca di progettare simulazioni in modo da riempire tutto lo spazio di progettazione. [35]

La costruzione di un metamodella si basa in primis sulla selezione di un set di simulazioni nello spazio di progetto e poi sulla scelta di modelli statistici da adattare ai punti scelti. Di fatto i metamodelli non sono altro che superfici di risposta. Sono relazioni matematiche che forniscono una approssimazione della relazione che vi è fra gli input e gli output formulata dalle simulazioni. La caratteristica di risposta è l'output d'interesse della simulazione, come ad esempio uno sforzo di picco o una frequenza modale, mentre i parametri di input sono le caratteristiche d'interesse della simulazione, come le proprietà del materiale, il coefficiente d'attrito, le caratteristiche geometriche. Come si nota nella Figura 3.1, il metamodella con la sua superficie di risposta sostituisce le simulazioni a elementi finiti, diventandone un surrogato e diminuendo notevolmente il costo computazionale.

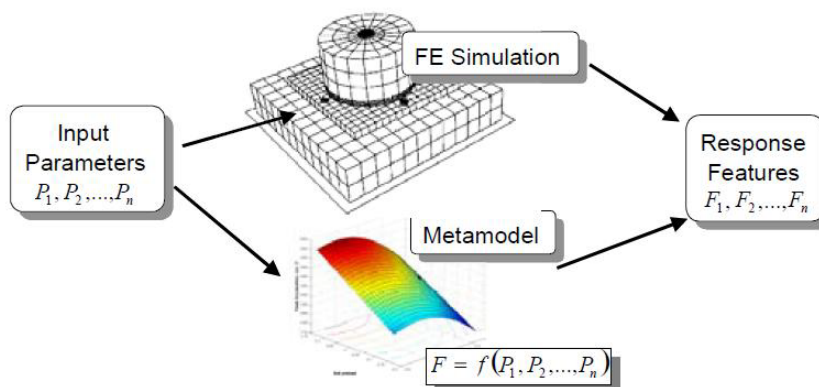


Figura 3. 1: Il metamodella come surrogato delle simulazioni FE. [36]

Non vi è un limite al numero di input da fornire, ma i dati richiesti e il numero di simulazioni da svolgere aumentano con l'aumentare dello spazio degli input. [36]

L'accuratezza di un metamodella è determinata dal piano dei punti di simulazione scelto, dall'ampiezza dello spazio di progettazione, dall'accuratezza delle simulazioni svolte in ogni punto scelto e dal numero dei punti usati per costruire il metamodella. L'accuratezza, insieme al costo computazionale, deve

essere tenuta in considerazione per la scelta della tipologia di modello surrogato. [37]

Un vantaggio che si ottiene dall'utilizzo dei metamodelli è la riduzione del costo computazionale per l'esplorazione dell'ampio spazio di progettazione. Tuttavia rimane ugualmente un alto costo computazionale nel fare simulazioni accurate, per cui sono stati introdotti approcci alternativi a quelli tradizionali per cercare di ridurre lo sforzo nella messa a punto di simulazioni complesse. In alternativa, dunque, questi approcci propongono la costruzione del metamodello basandosi su dati sia provenienti da simulazioni accurate o prove sperimentali, sia provenienti da simulazioni più approssimate. Si hanno, dunque, a disposizione due fonti diverse di dati e con gradi di accuratezza differenti. Questi prendono il nome di *metamodelli gerarchici*, nel senso che un set di dati, quello delle prove sperimentali o delle simulazioni dettagliate, viene considerato più accurato dell'altro set di dati, le simulazioni approssimate. Generalmente per simulazioni approssimate e dettagliate si intendono simulazioni rispettivamente con una mesh grossolana e più fine.

È bene inoltre trovare un buon compromesso fra accuratezza del metamodello costruito e risorse impiegate. Infatti, se si hanno a disposizione pochi punti, si avrà un metamodello meno accurato di uno costruito su più punti, per cui solitamente si preferisce sostituire prove sperimentali con costi elevati o simulazioni dettagliate con simulazioni più approssimate, così da avere più punti con costi e tempo minori. Tuttavia in questo modello però si ottiene un metamodello che può produrre risultati distorti, per cui solitamente si preferisce eseguire in gran numero le simulazioni approssimate e in piccolo numero le prove sperimentali o le simulazioni più dettagliate. In questo modo si può migliorare l'accuratezza del metamodello derivante dalle simulazioni approssimate aggiungendo pochi risultati provenienti da simulazioni più dettagliate e con costo computazionale maggiore. Si ottiene così un metamodello più accurato di quello che si costruirebbe sulla base di sole simulazioni approssimate e meno costoso dal punto di vista computazionale di quello che si costruirebbe sulla base delle sole simulazioni dettagliate [37].

3.1 Introduzione al Fusion Metamodel

In questo studio si applica un approccio gerarchico, studiato da Colosimo et al. [38] denominato "*Fusion Metamodel*", per l'analisi del comportamento a flessione di tubi riempiti di schiuma metallica. In tale approccio vengono combinati dati provenienti da fonti differenti e con un diverso grado di accuratezza. Sono infatti presenti dati derivanti da prove sperimentali e dati derivanti da simulazioni. I primi presentano una elevata accuratezza malgrado le approssimazioni derivanti dal sistema di misura e della intrinseca natura

aleatoria degli esperimenti, ma sono disponibili in minor numero a causa del maggiore costo: vengono, dunque, etichettati dati ad “Alta risoluzione”. I secondi, invece, denominati dati a “Bassa risoluzione”, si ricavano più velocemente, sono meno costosi, ma portano a risultati più approssimati.

Questo tipo di metamodello può avere vari obiettivi, tra cui la messa a punto di un piano di simulazioni e l’ottimizzazione di un parametro d’interesse.

Un approccio di questo tipo è stato utilizzato da Quian et al. [37], in cui per la costruzione di un metamodello sono stati utilizzati esperimenti e simulazioni deterministiche negli stessi punti, in modo da non dover considerare la variabilità di risposta del modello di simulazione. Un esempio simile si può trovare anche in Colosimo e Pacella [39]. Invece, un esempio di modello gerarchico che considera la variabilità della risposta è l’approccio bayesiano di Xia et al. [40].

L’approccio utilizzato per costruire il *Metamodello Fusion* si articola in due fasi, nella prima delle quali si considerano i dati provenienti dalle simulazioni, mentre nella seconda si aggiungono quelli derivanti dalle prove sperimentali.

Il primo step è dunque costruire modelli basati su processi gaussiani che, grazie alla loro flessibilità e capacità di interpolare dati derivanti da simulazioni deterministiche, sono in grado di descrivere i risultati provenienti dalle simulazioni. In questo modo si ottiene un modello approssimato, vista la deviazione dai dati reali attesa. Per cui si passa al secondo step in cui il modello precedentemente creato viene unito sempre mediante un processo gaussiano ai dati provenienti dalle prove sperimentali. Si può inoltre, introdurre un nuovo parametro, denominato “Nugget”, che tiene conto della variabilità di processo.

Procedendo poi con la fase di ottimizzazione, per questo scopo si utilizza un algoritmo proposto da Jones et al. [41], chiamato *Efficient Global Optimization (EGO)*, grazie a cui si vuole trovare un minimo globale di una generica funzione deterministica usando un processo gaussiano per la previsione della funzione.[38]

3.2 “Fusion Metamodel”

Si suppone di avere n_l simulazioni deterministiche dipendenti da q parametri (si specifica che viene utilizzato il pedice l per indicare i dati a bassa risoluzione). La funzione di risposta in un generico punto x_i si suppone sia descritta dalla seguente relazione:

$$y_l(x_i) = f_l'(x_i)\beta + \eta(x_i) \quad i = 1, \dots, n_l \quad (3.1)$$

in cui $f'_l(x_i)$ è una funzione delle variabili di progetto x_i trasposta e appartenente a \mathbb{R}^r , $\beta \in \mathbb{R}^r$ è un vettore di parametri non noti, $\eta(x_i) \sim GP(0, \sigma_\eta^2, \theta_l)$ è il processo gaussiano di media zero e matrice di varianza-covarianza definita da un kernel anisotropo mediante i parametri di σ_η^2 e $\theta_l \in \mathbb{R}^r$. Tale covarianza viene riportata nell'equazione (3.2):

$$\text{Cov}[\eta(x_i), \eta(x_j)] = \sigma_\eta^2 \exp\{-d(x_i, x_j)\} = \sigma_\eta^2 \exp\left\{-\sum_{k=1}^q \theta'_k (x_{i,k} - x_{j,k})^{p_k}\right\} \quad (3.2)$$

in cui $d(x_i, x_j)$ una distanza che dipende dalla direzione.

Grazie allo stimatore BLUP (*Best Linear Unbiased Predictor*) è possibile stimare la funzione di risposta in nuovo punto x_0 :

$$\hat{y}_l(x_0) = f'_l(x_0)\hat{\beta} + \hat{r}'_\eta \hat{R}_\eta^{-1} (y_l - F_l \hat{\beta}) \quad (3.3)$$

In cui $y_l = (y_l(x_1), \dots, y_l(x_{n_l}))'$ è il vettore dei valori osservati,

$F_l = (f'_l(x_1), \dots, f'_l(x_{n_l}))'$ è la matrice del modello, $\hat{\beta} = (F'_l R_\eta^{-1} F_l)^{-1} F'_l R_\eta^{-1} y_l$ è lo stimatore di massima verosimiglianza di β e $r_\eta = (R(x_1, x_0), \dots, R(x_{n_l}, x_0))$ è il vettore di correlazione fra i punti a disposizione e il nuovo punto x_0 .

Gli altri parametri sono stati calcolati massimizzando il logaritmo della funzione di massima verosimiglianza utilizzando un algoritmo di ottimizzazione *Quasi-Newton*, riportata nell'equazione :

$$l_{\hat{\beta}} = -\frac{n_l - r}{2} \log 2\pi + \frac{1}{2} \log(F'_l F_l) - \frac{n_l - r}{2} \hat{\sigma}_\eta^2 - \frac{1}{2} \log|R_\eta| - \frac{1}{2} \log|F'_l R_\eta^{-1} F_l| - \frac{n_l - r}{2} \quad (3.4)$$

in cui $\hat{\sigma}_\eta^2$ è lo stimatore di massima verosimiglianza di σ_η^2 .

Una volta fatto ciò si passa alla seconda fase, in cui si uniscono al modello precedente i punti sperimentali a disposizione. Solitamente questi sono nettamente inferiori rispetto al numero di simulazioni a disposizione e difficilmente sono disponibili negli stessi punti. Nell'equazione (3.5) si riporta il modello di unione fra i punti sperimentali e di simulazione (il pedice h viene usato per indicare i dati ad alta risoluzione):

$$y_h(x_i) = \rho(x_i) \hat{y}_l(x_i) + \delta_0 + \delta(x_i) + \varepsilon_h(x_i) \quad i = 1, \dots, n_h \quad (3.5)$$

in cui $\rho(x_i)$ è il parametro di scala, $\delta_0 + \delta(x_i)$ è il parametro di posizione e $\varepsilon_h(x_i)$ è il *Nugget*, ossia l'errore casuale indipendente dei punti sperimentali. In questa fase è bene mettere il *Nugget* perché la risposta di un singolo esperimento non è deterministica.

Per il parametro di scala si utilizza la relazione riportata nell'equazione (3.6):

$$\rho(x_i) = f'_h(x_i) \rho \quad (3.6)$$

in cui $f'_h(x_i)$ è una funzione e ρ è un vettore di parametri non noti. Il parametro di posizione, invece, è formato da un termine costante δ_0 a cui si somma un termine che segue una distribuzione gaussiana (3.7):

$$\delta(x_i) \sim GP(0, \sigma_\delta^2, \mathcal{G}_h) \quad (3.7)$$

Soltanto il parametro δ_0 può essere stimato analiticamente (3.8), mentre gli altri si ricavano dalla massimizzazione del logaritmo della massima verosimiglianza (3.9):

$$\hat{\delta}_0 = \frac{\mathbf{1}'_{n_h} \Sigma_h^{-1} (y_h - P\hat{y}_l)}{\mathbf{1}'_{n_h} \Sigma_h^{-1} \mathbf{1}_{n_h}} \quad (3.8)$$

$$l_{\hat{\delta}_0} = -\frac{n_h}{2} \log 2\pi + \frac{1}{2} \log(F'_h F_h) - \frac{1}{2} \log |\Sigma_h| - \frac{1}{2} \log |F'_h \Sigma_h^{-1} F_h| + \frac{1}{2} (y_h - P\hat{y}_l - \hat{\delta}_0 \mathbf{1}_{n_h})' \Sigma_h^{-1} (y_h - P\hat{y}_l - \hat{\delta}_0 \mathbf{1}_{n_h}) \quad (3.9)$$

in cui P è la matrice sulla cui diagonale ci sono i $\rho(x_i)$ con $i = 1, \dots, n_h$, $\Sigma_h = P\Sigma_0 P' + \sigma_\delta^2 R_\delta + \sigma_{\varepsilon_h}^2 I_{n_h}$ è la matrice di varianza-covarianza del modello e Σ_0 è la matrice di varianza-covarianza dei punti sperimentali, nota come MSPE (*Mean square prediction error*).

Per cui la previsione della risposta nel nuovo punto x_0 è:

$$\hat{y}_h(x_0) = \hat{\rho}(x_0) \hat{y}_l(x_0) + \hat{\delta}_0 + (\hat{\sigma}_\delta^2 \hat{r}_\delta + \hat{\sigma}_0)' \hat{\Sigma}_h^{-1} (y_h - P\hat{y}_l - \hat{\delta}_0 \mathbf{1}_{n_h}) \quad (3.10)$$

in cui $\hat{r}_\delta = \text{Corr}(y_h, y_h(x_0))$, σ_0 è un vettore con componenti $\sigma_{0i} = \rho(x_i) \rho(x_0) \text{Cov}(\hat{y}_l(x_i), \hat{y}_l(x_0))$. [38]

3.2.1 Efficienza del meta-modello

Per dimostrare l'efficienza di questo approccio Colosimo et al. [38] hanno messo a confronto quattro differenti tipologie di metamodelli, costruiti sulla base di dati artificiali, sia per quanto riguarda le simulazioni, sia per le prove sperimentali. I punti di simulazione dunque, sono stati creati a partire da una funzione nota (*Funzione Peaks di MatLab*) a cui è stata aggiunta una realizzazione di un processo gaussiano con σ^2 pari a 0.5 e correlazione esponenziale anisotropa con parametri 0.3 e 0.1. I punti ad alta risoluzione, invece, sono stati creati a partire sempre da una funzione nota (*Funzione Peaks di MatLab*) a cui è stata aggiunta una realizzazione di un processo gaussiano con σ^2 , però, pari a 0.1 e correlazione esponenziale anisotropa con parametri 0.1 e 0.1. Per questa tipologia di punti è stato aggiunto inoltre, un errore casuale (*Nugget*) distribuito come una normale di media nulla e varianza pari a 10^{-2} .

I quattro metamodelli confrontati sono:

- Modello “*Bassa Risoluzione*”: è basato unicamente su dati provenienti da simulazioni, in particolare su 200 punti.
- Modello “*Alta Risoluzione*”: è basato unicamente su dati provenienti da prove sperimentali, in particolare su 20 punti.
- Modello “*ADD*”: è basato sull'unione iniziale dei 20 punti sperimentali e dei 200 punti derivanti dalle simulazioni usati nei due modelli precedenti, ma entrambi considerati come provenienti dalla stessa fonte
- Modello “*Fusion*”: è il modello appena spiegato nel paragrafo precedente, ossia costruito inizialmente soltanto su 200 simulazioni e successivamente corretto con l'aggiunta di 20 prove sperimentali.

Il parametro di risposta desiderato nei quattro casi è y ed è dipendente da due variabili, x_1 e x_2 .

Le superfici di previsione dei meta modelli costruiti e le rispettive sezioni nel punto $x_1=0.04$ sono confrontati :

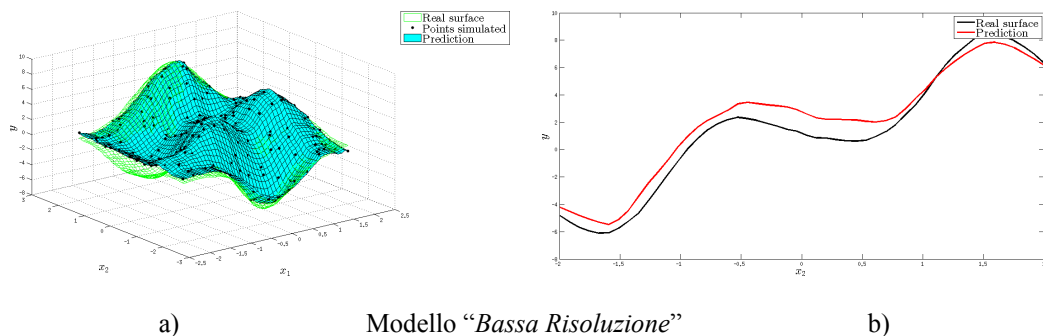


Figura 3. 2: Metamodello “*Bassa Risoluzione*”: a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]

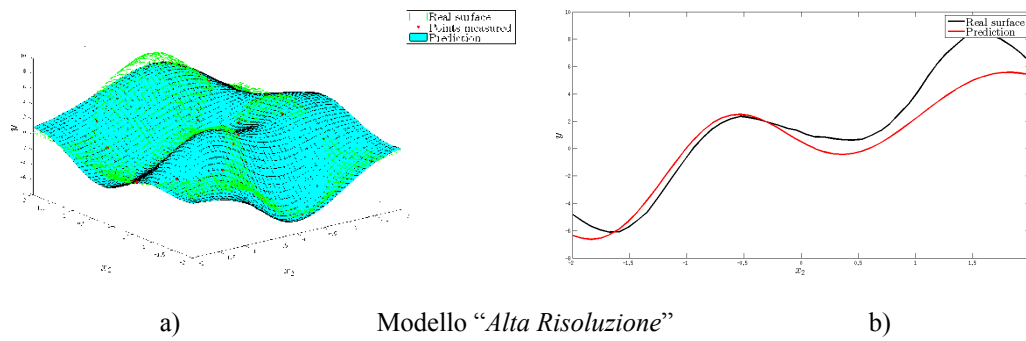


Figura 3. 3: Metamodello “Alta Risoluzione”: a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]

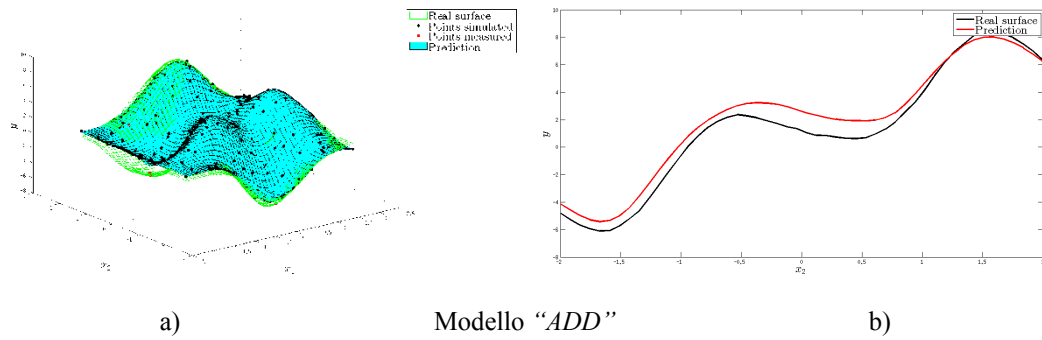


Figura 3. 4: Metamodello “ADD”: a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]

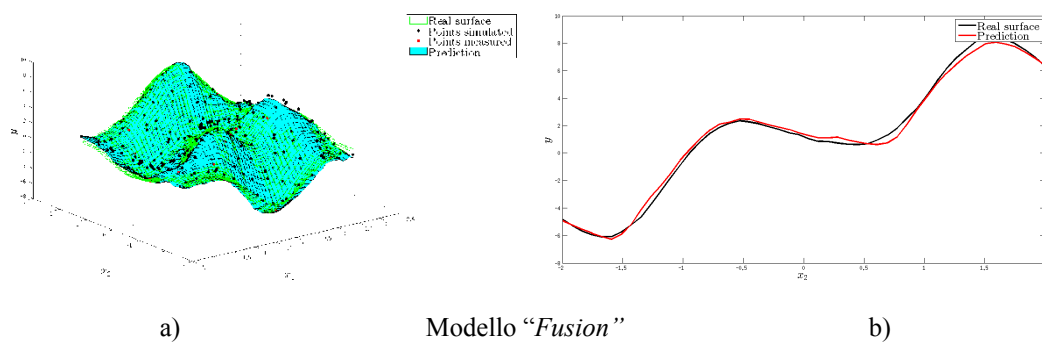


Figura 3. 5: : Metamodello “Fusion”: a) Superficie di previsione. b) Sezione delle superfici reali e di previsione in $x_1=0.04$. [38]

Come si può notare della figure il Metamodello “*Fusion*” è il migliore visto che la superficie reale è molto vicina a quella prevista. Infatti nel Modello “*Bassa Risoluzione*” la superficie di previsione è abbastanza piatta, ma vi è un errore aggiunto alla superficie reale dovuto al processo gaussiano. Nel Modello “*Alta Risoluzione*” vi è una superficie di previsione più piatta di quella del Modello “*Bassa Risoluzione*”, ma non si riesce a fare una buona previsione dal momento che sono stati usati pochi punti sperimentali. Nel Modello “*ADD*” invece si ha un comportamento della superficie di previsione simile al primo modello ma con lo stesso andamento piatto del secondo. Infatti calcolando i rispettivi MSE (3.11) al 95% di livello di confidenza e considerando 10 repliche, per il meta modello “*Fusion*” si ricava un valore basso e con un piccolo intervallo di confidenza.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (3.11)$$

in cui y_i è il valore reale i -esimo e \hat{y}_i è il valore previsto.

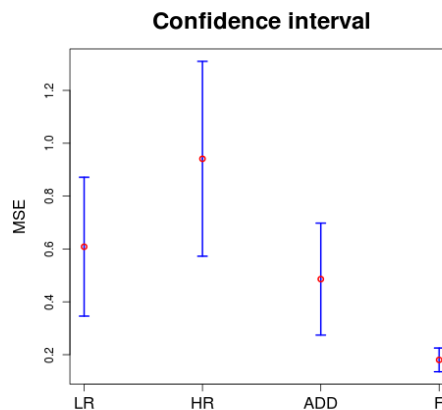


Figura 3. 6: Confronto fra le performance dei quattro metamodelli.[38]

3.3 Ottimizzazione del Metamodello Fusion

Per l'ottimizzazione del metamodello, come già anticipato, è stato usato l'algoritmo EGO (chiamato *Efficient Global Optimization*) che permette di trovare un minimo globale di una generica funzione deterministica. Per avere una approssimata valutazione della superficie della risposta, inizialmente vengono usati $10q$ punti iniziali, dove q è la dimensione del dominio della funzione. Ottenuta la superficie, si aggiunge un nuovo punto dove la funzione *Expected Improvement* (EI), proposta da Mockus [42], risulta essere massima e si esegue una nuova stima della funzione di risposta. Si procede in modo uguale continuando ad aggiungere nuovi punti, finché il rapporto fra il valore dell' EI al passo i_{esimo} e il valore dell'EI iniziale non è minore di un valore stabilito.

Il minimo della funzione da minimizzare $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$ è una variabile casuale $\hat{f}_{\min} \sim N(\mu_F, \sigma_F^2)$. Queste due variabili risultano essere correlate per cui la covarianza σ_{YF} risulta essere diversa da zero. Si definisce dunque una nuova variabile X:

$$X = \hat{f}_{\min} - Y \sim N(\mu_X = \mu_F - \mu_Y; \sigma_X^2 = \sigma_F^2 + \sigma_Y^2 - 2\sigma_{YF}) \quad (3.12)$$

L'EI può essere definito come:

$$EI = E(\max\{X, 0\}) = \int_0^{+\infty} \frac{x}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} e^{-\frac{1(x-\mu_X)^2}{2\sigma_X^2}} dx \quad (3.13)$$

L'integrale (3.13) può essere risolto ponendo $t = \frac{x - \mu_X}{\sigma_X}$:

$$EI = \int_{-\frac{\mu_X}{\sigma_X}}^{+\infty} \frac{\sigma_X t + \mu_X}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt = \sigma_X \varphi\left(\frac{\mu_X}{\sigma_X}\right) + \mu_X \Phi\left(\frac{\mu_X}{\sigma_X}\right) \quad (3.14)$$

Si assegna ora a \hat{f}_{\min} il minimo dei valori di previsioni a disposizione:

$$\hat{f}_{\min}(x_{\min}) = \min_{i \in V_i \cup V_h} \hat{y}_h(x_i) \quad (3.15)$$

in cui $V_i \cup V_h$ sono rispettivamente i domini delle simulazioni e degli esperimenti.

Si può dimostrare che vale (3.16):

$$\hat{E} \left(\begin{bmatrix} \hat{y}_h(x_0) \\ \hat{f}_{\min}(x_{\min}) \end{bmatrix} \right) \approx N_2(\mu_{ego}, \Sigma_{ego}) \quad (3.16)$$

Con:

$$\begin{aligned} \mu_{ego} &= P_{X_0} \hat{y}_l(X_0) + \hat{\delta}_0 \mathbf{1}_2 + \left(\hat{\sigma}_\eta^2 \hat{R}_{\delta_{X_h, X_0}} + \hat{\Sigma}_{l_{X_h, X_0}} \right)' \hat{\Sigma}_h^{-1} (y_h - \hat{P} \hat{y}_l - \hat{\delta}_0 \mathbf{1}_{n_h}) \\ \Sigma_{ego} &= \hat{\Sigma}_{h_{X_0}} - \hat{\Sigma}'_{h_{X_h, X_0}} \hat{\Sigma}_h^{-1} \hat{\Sigma}_{h_{X_h, X_0}} + \frac{\left(\mathbf{1}_2 - \hat{\Sigma}'_{h_{X_h, X_0}} \hat{\Sigma}_h^{-1} \mathbf{1}_{n_h} \right) \left(\mathbf{1}_2 - \hat{\Sigma}'_{h_{X_h, X_0}} \hat{\Sigma}_h^{-1} \mathbf{1}_2 \right)'}{\mathbf{1}'_{n_h} \hat{\Sigma}_h^{-1} \mathbf{1}_{n_h}} \end{aligned}$$

dove $X_0 = [x_0 \ x_{\min}]'$, $\hat{R}_{\delta_{X_h, X_0}}$ è la matrice di correlazione fra i punti sperimentali e X_0 , $\hat{\Sigma}_{l_{X_h, X_0}}$ è la matrice di covarianza fra $\rho(X_h) \hat{y}_l(X_h)$ e $\rho(X_0) \hat{y}_l(X_0)$, $\hat{\Sigma}_{h_{X_0}}$ è la matrice di covarianza fra $X_0 e X_h$. X si può ricavare con la teoria della statistica multivariata:

$$X \approx N(c' \mu_{ego}, c' \Sigma_{ego} c) \quad (3.17)$$

in cui $c = (-1, 1)'$. Si esegue dunque questa ottimizzazione con il software MatLab. [38]

3.3.1 Dimostrazione dell'ottimizzazione

Per dimostrare l'abilità di ottimizzazione del metamodello, Colosimo et al. [38] hanno preso in considerazione 30 simulazioni e 10 prove sperimentali, sempre creati artificialmente. I punti di simulazione sono stati creati a partire da una funzione nota (*Funzione Peaks di MatLab*) a cui è stata aggiunta una realizzazione di un processo gaussiano con σ^2 pari a 0.5 e correlazione esponenziale anisotropa con parametri 0.3 e 0.1. I punti ad alta risoluzione, invece, sono stati creati a partire sempre da una funzione nota (*Funzione Peaks di MatLab*) a cui è stata aggiunta una realizzazione di un processo gaussiano con σ^2 pari a 0.1 e correlazione esponenziale anisotropa con parametri 0.1 e 0.1. A questi è stato inoltre, aggiunto un errore casuale (*Nugget*) distribuito come una normale di media nulla e varianza pari a 10^{-2} .

L'obiettivo è la minimizzazione del parametro y che è funzione delle variabili x_1 e x_2 . Si riporta la superficie di previsione stimata con il metamodello prima dell'applicazione dell'algorithm EGO (Figura 3.7).

Come si può notare la stima della superficie è approssimativa a causa dei pochi punti a disposizione. Per migliorare la previsione sono stati aggiunti iterativamente nuovi punti. Si può infatti notare come dopo 6 iterazioni la previsione risulti migliore nel punto di minimo (Figure 3.8). Infatti la differenza fra minimo reale e minimo previsto è 0.07.

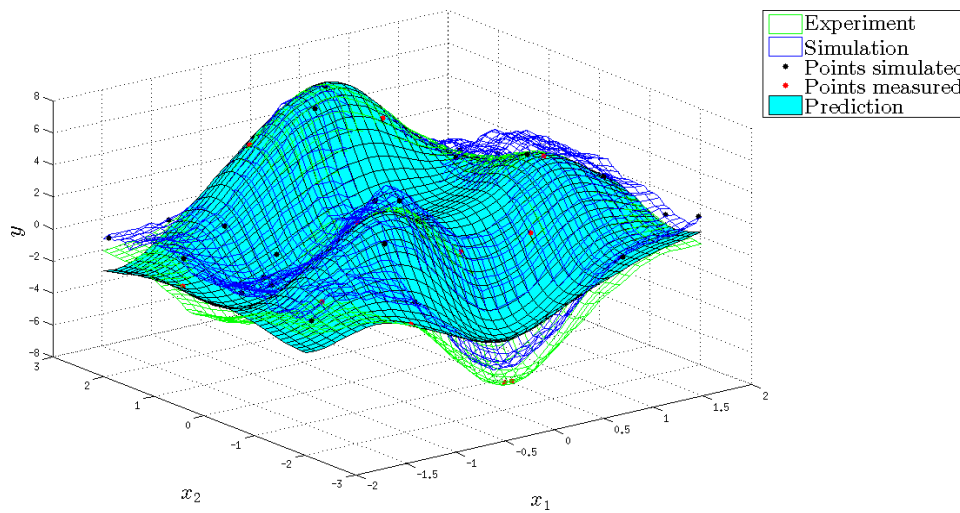


Figura 3. 7: Superficie di previsione prima dell'utilizzo dell'algorithm EGO. [38]

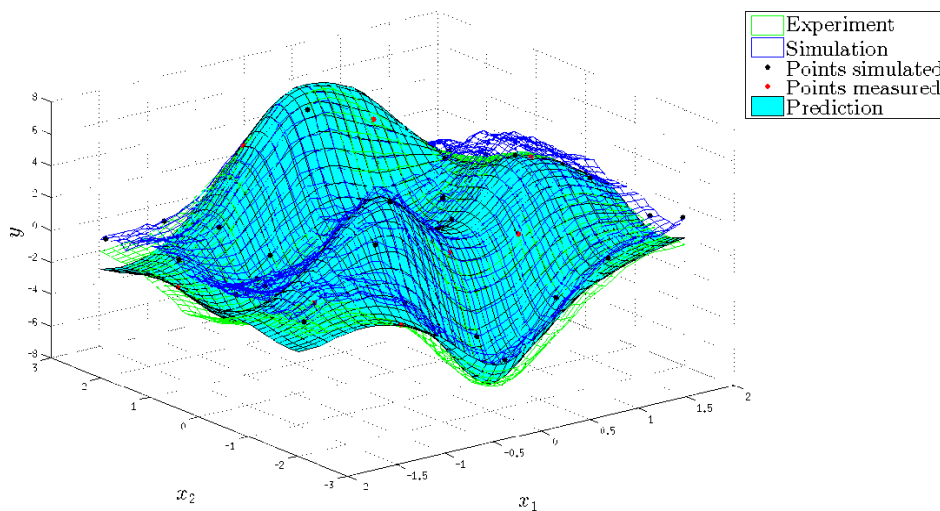


Figura 3. 8: Superficie di previsione dopo l'utilizzo dell'algorithm EGO. [38]

Capitolo 4

Obiettivi e struttura dell'analisi

In questo capitolo ci si occupa di illustrare gli obiettivi e la struttura dell'analisi svolta.

Come già anticipato, il tema di questo lavoro è lo studio del comportamento di tubi anti-intrusione riempiti di schiuma metallica d'alluminio negli urti laterali. Dal momento che questi componenti lavorano a flessione, si vogliono sfruttare i vantaggi forniti dalla presenza della schiuma all'interno dei tubi. Essa infatti si comporta come un rinforzo contro gli impatti, siano essi laterali o assiali, conferendo alla struttura rigidità e ottime proprietà di assorbimento di energia. Nel Capitolo 2 sono già stati spiegati i vantaggi forniti dall'inserimento della schiuma all'interno dei tubi. Negli impatti laterali, quindi, i tubi sono sottoposti a flessione e la presenza della schiuma incrementa la rigidità e l'assorbimento d'energia, appiattendolo il profilo del carico. A questo, poi, si deve aggiungere l'ulteriore vantaggio ricavato dal comportamento isotropo della schiuma, ovvero un assorbimento di energia uguale in tutte le direzioni d'impatto. Ciò è vantaggioso dal momento che, durante un incidente, non si conosce mai tale direzione [43].

4.1 Obiettivi

Ci si propone, dunque, di eseguire un'ottimizzazione delle caratteristiche di tubi riempiti di schiuma metallica, in modo da massimizzare l'assorbimento di energia durante una flessione su tre punti dei componenti.

È bene sottolineare che saranno esaminati tubi con lunghezze inferiori a quelle dei componenti reali (240 *mm*, anziché 878 *mm*) e dunque si otterrà un comportamento più rigido. D'altra parte, però, è anche bene osservare che i componenti reali sono vincolati nelle estremità con un doppio incastro e quindi con una configurazione più rigida. Per cui per valutare il comportamento flessionale dei tubi è opportuno effettuare prove di flessione su tre punti.

Già in passato alcuni autori si sono occupati di studi simili, alcuni massimizzando l'energia assorbita, altri volendo minimizzare il peso delle strutture, imponendosi però sempre l'obiettivo di avere un elevato assorbimento di energia. Zarei et al.[32], ad esempio, hanno eseguito un'ottimizzazione di una

barra a sezione quadrata riempita di schiuma d'alluminio, con lo scopo di massimizzare l'*Energia specifica assorbita*, e dunque l'energia assorbita. Chen et al. [44], invece, si sono occupati dell'ottimizzazione strutturale di una barra con sezione quadrata riempita di schiuma al fine di minimizzare il peso della struttura sottoposta a flessione, tenendo in considerazione, però, il vincolo di rigidità a flessione e di assorbimento di energia. Anche Kim et al. [45] hanno eseguito un'ottimizzazione di una barra con forma ad "S", con sezione quadrata riempita di schiuma d'alluminio, con l'obiettivo di minimizzare il peso della struttura, utilizzando come variabili di progetto il lato della sezione, lo spessore e la densità della schiuma. A dimostrazione del vantaggio fornito dalla presenza della schiuma, il risultato ottenuto da quest'ultimo è stato poi confrontato con quello ricavato dall'ottimizzazione eseguita non considerando la presenza della schiuma. La configurazione con la schiuma è mostrato un incremento dell'energia assorbita del 75%.

In questo studio, l'ottimizzazione viene eseguita mediante l'utilizzo di un metamodulo. Nei sottocapitoli seguenti vengono riportati l'indice di performance scelto da massimizzare nel corso dell'analisi e le variabili di progetto da ottimizzare.

4.1.1 Indice di performance

Nell'obiettivo di rendere massimo l'assorbimento di energia durante un impatto, è stato proposto un indice di performance da Strano et al. [43]. Tale indice permette il confronto delle prestazioni di assorbitori di energia negli impatti laterali con diverse sezioni e fatti di differenti materiali. Questo indice, denominato Y e misurato in $[N/mmkg]$, è funzione dell'inflexione massima δl_{max} e dipende da altri tre indicatori: l'*Energia Specifica di assorbimento* $SEA(\delta l_{max})$ durante la flessione, l'*Efficienza Energetica* $\eta(\delta l_{max})$ e l'*Ingombro medio orizzontale* della sezione del tubo W_m . Di seguito si riporta il legame di Y con i parametri appena introdotti:

$$Y(\delta l_{max}) = \frac{SEA(\delta l_{max}) \cdot \eta(\delta l_{max})}{W_m \cdot \delta l_{max}} \quad (4.1)$$

L'*Energia assorbita* $E_{abs}(\delta l_{max})$, misurata in $[Nmm]$, è definita dal prodotto fra il carico medio e lo spostamento massimo ottenuti durante un impatto:

$$E_{abs}(\delta l_{max}) = P_{med}(\delta l_{max}) \cdot \delta l_{max} \quad (4.2)$$

L'Energia Specifica di assorbimento $S.E.A.(\delta l_{max})$, misurata in $[Nmmkg^{-1}]$, è definita dal rapporto fra l'energia assorbita durante un impatto e la massa della struttura:

$$S.E.A.(\delta l_{max}) = \frac{E_{abs}(\delta l_{max})}{M} \quad (4.3)$$

L'Efficienza Energetica $\eta(\delta l_{max})$, grandezza adimensionale, è definita come il rapporto fra il carico medio e il carico massimo :

$$\eta(\delta l_{max}) = \frac{P_{med}(\delta l_{max})}{P_{max}(\delta l_{max})} \quad (4.4)$$

in cui $P_{med}(\delta l_{max})$ e $P_{max}(\delta l_{max})$ rappresentano rispettivamente il carico medio e massimo di flessione in funzione dello spostamento massimo scelto in un tipico grafico che descrive il legame Carico–Spostamento durante una flessione.

Per massimizzare l'indice $Y(\delta l_{max})$ occorre dunque:

- massimizzare l'energia specifica assorbita $S.E.A.(\delta l_{max})$, ovvero massimizzare l'Energia assorbita $E_{abs}(\delta l_{max})$ contenendo la massa M della struttura;
- massimizzare l'efficienza energetica $\eta(\delta l_{max})$;
- minimizzare l'ingombro della sezione W_m e l'intrusione massima δl_{max} nel veicolo.

Tale indice incrementa il suo valore nel passaggio da tubi vuoti a tubi riempiti di schiuma. A prova di ciò, si riporta un grafico che mostra l'andamento dell'indice Y in funzione della deflessione, ottenuto dalla flessione di tubi in acciaio riempiti in schiuma d'alluminio, aventi sezione tonda. In particolare, si analizza l'andamento di $Y(\delta l_{max})$ per valori differenti di densità della schiuma, includendo due casi limite: $\rho_f = 0$ (caso con il tubo vuoto) e $\rho_f = 1$ (caso con cuore di schiuma solido).

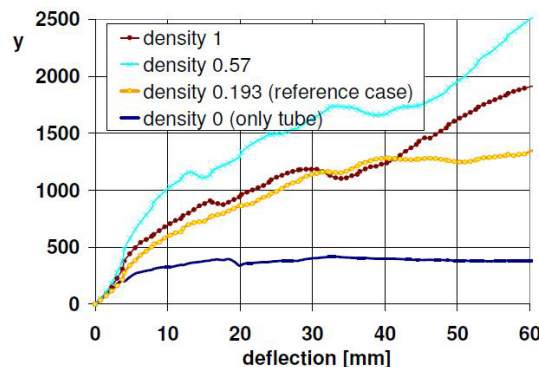


Figura 4. 1: $Y(\delta l_{max})$ in funzione della densità della schiuma. [43]

Si nota come per il tubo vuoto i valori di $Y(\delta l_{max})$ siano inferiori agli altri casi che considerano, invece, la presenza della schiuma all'interno del tubo. Inoltre si può osservare che esiste, dunque, un valore ottimo di densità della schiuma che massimizza il parametro $Y(\delta l_{max})$, visto l'andamento delle curve al variare della densità.

Anche per quanto riguarda lo spessore del tubo, si può concludere che vi sia l'esistenza di un valore ottimo un grado di massimizzare l'indice di performance. Guardando la Figura 4.2 si vede nuovamente come, considerando la sola schiuma (caso dunque con spessore del tubo pari a 0 mm), $Y(\delta l_{max})$ abbia valori minori rispetto agli altri casi esaminati. Soffermandosi, invece, sulla variazione dello spessore del tubo, si osserva come per la curva arancione, che rappresenta uno spessore pari a 0.95 mm , risultino valori dell'indice maggiori rispetto alla curva verde, che rappresenta uno spessore di 2 mm .

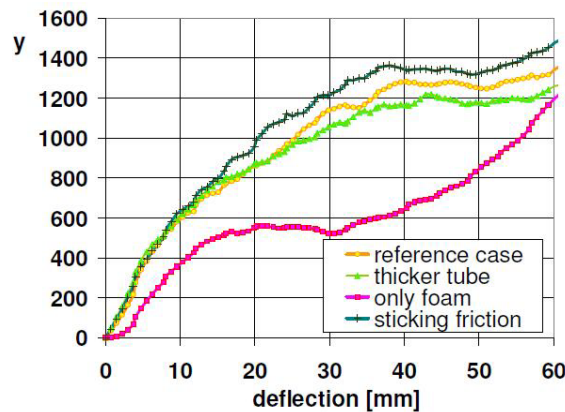


Figura 4. 2: $Y(\delta l_{max})$ in funzione dello spessore del tubo. [43]

Si può dunque concludere che l'indice di performance è maggiore per spessori del tubo minori. Tuttavia occorre considerare che vi sia un limite inferiore allo spessore, a causa del rischio della frattura del tubo durante la flessione al diminuire dello spessore stesso. Infine, si può osservare sempre dalla Figura 4.2 l'effetto delle condizioni di contatto all'interfaccia tubo-schiuma. $Y(\delta l_{max})$ non aumenta in modo significativo passando da un modello di attrito coulombiano standard, con coefficiente di 0.2, a una condizione di aderenza senza alcun movimento permesso, con coefficiente pari a 1 (curva verde). Di conseguenza, dal momento che la variazione provocata dal modifica dell'attrito, non è significativa e vista la difficoltà pratica di utilizzare questo fattore come variabile di ottimizzazione, non è stato considerato interessante andare ad esaminare questo aspetto.

È stato riscontrato, poi, che l'incremento $Y(\delta l_{max})$, passando da un tubo vuoto a un tubo contenente schiuma, è più significativo per una sezione tonda rispetto ad

una quadrata e in particolar modo, considerando come materiale l'acciaio al posto dell'alluminio (Figura 4.3). Tuttavia ovviamente in termini assoluti, ad esempio considerando la *S.E.A.*, il migliore risultato è dato dalla sezione quadrata in acciaio.

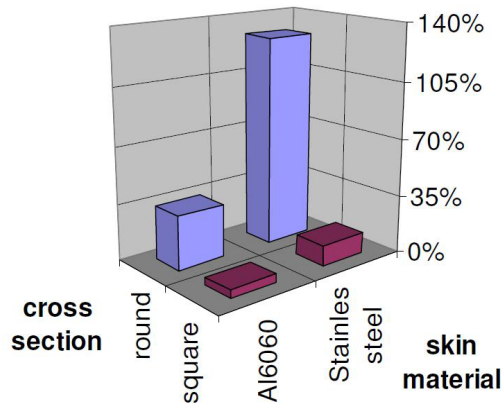


Figura 4. 3: Incremento percentuale su Y . [43]

Tale indice $Y(\delta l_{max})$, in questo studio, sarà semplificato perché i due a fattori a denominatore (W_m e δl_{max}) sono considerati meno importanti dei due fattori a numeratore ($\eta(\delta l_{max})$ e $S.E.A(\delta l_{max})$). Di conseguenza, la dipendenza dalla deflessione massima δl_{max} viene tolta, definendola con il valore fisso di 48 mm. La dipendenza dall'ingombro W_m , invece, viene eliminata, introducendo Y'_{48} in (4.5), anche se comunque W_m sarà contenuto nel denominatore di una delle due variabili di progetto. Tuttavia, l'ingombro diventerà anche uno dei vincoli nell'eseguire un'ottimizzazione vincolata. Il nuovo indice di prestazione, pertanto diventa:

$$Y'_{48} = Y_{48} \cdot W_m = \frac{SEA(\delta l_{max}) \cdot \eta(\delta l_{max})}{48} \quad (4.5)$$

Il motivo legato alla scelta del valore di 48 mm per la deflessione massima, è che, in questa analisi, non si considerano componenti reali incastrati agli estremi, ma componenti di lunghezza inferiore (240 mm). Villa [1] ha ricavato che per una barra di dimensioni reali, l'angolo di piegatura è pari a 134.06°, avendo imposto una deflessione massima di 120 mm, valore di deflessione ottimale secondo letteratura. Per cui il valore di deflessione che permette di ottenere un angolo di flessione simile per i componenti di 240 mm di lunghezza, è 48 mm. Infatti l'angolo di piegatura corrispondente è 132.84°, leggermente inferiore di quello dei componenti reali.

4.1.2 Variabili di progetto

Le variabili di progetto da ottimizzare scelta per massimizzare il valore di Y'_{48} sono due, x_1 e x_2 .

Queste rappresentano rispettivamente il materiale e la forma e sezione del tubo. In particolar modo la variabile:

- x_1 rappresenta il rapporto fra il momento d'inerzia della sezione e il suo ingombro, misurato in mm^3 :

$$x_1 = \frac{J}{W_m} \quad (4.6)$$

- x_2 rappresenta la *Tenacità* del materiale, ovvero l'energia assorbita prima di giungere a rottura, misurata in MPa :

$$x_2 = \frac{n^{n+1}K}{n+1} \quad (4.7)$$

La variabile x_2 , come già preannunciato, è la tenacità del materiale. Per ricavare tale formula occorre fare riferimento al *Criterio di Considère*, secondo cui la strizione del materiale in una curva di trazione reale inizia nel punto di massima forza applicata. Di conseguenza vale la seguente relazione:

$$dF = 0 \quad (4.8)$$

Dato che $F = \sigma \cdot A$, si ottiene:

$$dF = d\sigma \cdot A + dA \cdot \sigma = 0 \quad (4.9)$$

Da cui si ricava che nel punto di carico massimo vale:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{d\sigma}{\sigma} \quad (4.10)$$

Considerando inoltre che per la conservazione del volume, questo rimane costante durante la deformazione plastica, si può affermare che:

$$dV = 0 \rightarrow dV = d(A \cdot l) = l \cdot dA + Adl = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dl}{l} = -d\varepsilon \quad (4.12)$$

Combinando le equazioni (4.10) e (4.12), si ricava, dunque, il *Criterio di Considere* per la determinazione del punto di strizione:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = d\varepsilon \rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (4.13)$$

È opportuno, poi, considerare che la curva di trazione di un materiale può essere approssimata con la *legge di Ramberg-Osgood*:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (4.14)$$

in cui K è il coefficiente di resistenza, mentre n è il coefficiente di incrudimento. Sostituendo in questa relazione il *criterio di Considere*, si ricava:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \rightarrow \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = K \cdot n \cdot \varepsilon^{n-1} \quad (4.15)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \rightarrow K \cdot n \cdot \varepsilon^{n-1} = K \cdot \varepsilon^n \quad (4.16)$$

In base alla (4.16) si può dunque affermare che:

$$n = \varepsilon \quad (4.17)$$

È possibile ora introdurre il concetto di Tenacità del materiale, che rappresenta l'area sottesa dallo sforzo di trazione. Tuttavia questo può essere ritenuto valido, solo se si considerano curve di trazione reali, mentre nel caso ingegneristico questa rappresenta la migliore approssimazione possibile.

$$W = \int_{l_1}^l F \cdot dl = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma \cdot A \cdot l \cdot d\varepsilon \rightarrow \frac{W}{V} = \int_0^n \sigma \cdot d\varepsilon = \int_0^n K \cdot \varepsilon^n \cdot d\varepsilon = K \cdot \frac{n^{n+1}}{n+1} \quad (4.18)$$

Si ricorda che si fa riferimento a sforzi reali e deformazioni logaritmiche.

Tornando ora al discorso delle variabili di progetto scelte, si rende noto che è stato semplificato il problema, ponendo limiti alla scelta delle geometrie utilizzabili e del materiale.

Per quanto riguarda la geometria, la scelta può ricadere solo su tubi riempiti in schiuma aventi sezione tonda, quadrata e a rombo.

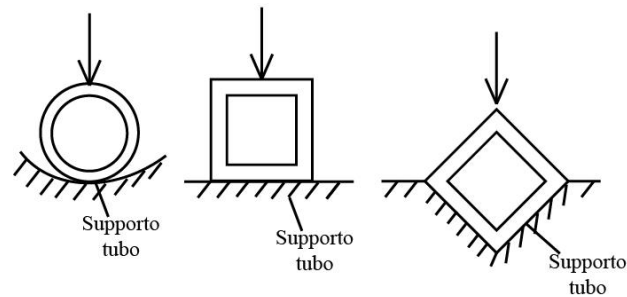


Figura 4. 4: Geometrie delle sezioni possibili.

Sono state scelte queste configurazioni poiché sono le geometrie più comuni. In particolar modo la configurazione a rombo, non è altro che la geometria quadrata posizionata con una rotazione di 45° rispetto all'asse longitudinale del tubo. I fattori collaborazione delle geometrie analizzate, calcolati come il rapporto fra il momento limite e il momento elastico della sezione, per sezioni piene sono pari a 1.5 per la sezione la sezione quadrata, 1.7 per la sezione tonda e 2 per la sezione romboidale (sono state considerate sezioni piene dal momento che i tubi sono riempiti di schiuma e quindi teoricamente la sezione è piena).

$$f = \frac{M_{lim}}{M_{el}} \quad (4.19)$$

Un fattore di collaborazione maggiore significa avere un momento limite maggiore e dunque avere un guadagno in resistenza per l'effetto dell'innalzamento del limite elastico. È per questo motivo che anche la configurazione a rombo è stata presa in considerazione, visto che possiede un fattore f maggiore delle altre due.

Per il materiale, invece, si è deciso di considerare soltanto gli acciai, visto anche quanto affermato da Strano et al.[43], ovvero che valori elevati dell'indice Y si ottengono per sezioni in acciaio.

4.2 Struttura dell'analisi

In questo sottocapitolo si illustra il procedimento che sarà svolto nei capitoli seguenti per raggiungere l'obiettivo di ottimizzazione, precedentemente definito. Lo strumento di ottimizzazione utilizzato è il *metamodello "Fusion"*, il cui scopo è ricavare i valori ottimi delle due variabili di progetto, in grado di massimizzare l'indice di prestazione scelto.

Come spiegato precedentemente nel Capitolo 3, questo metamodello si serve di due set di dati: un set ad "*Alta Risoluzione*", ovvero prove sperimentali, e uno a "*Bassa Risoluzione*", ovvero simulazioni. In questa analisi, dunque, al primo set di dati corrispondono prove sperimentali di flessione di tubi riempiti di schiuma d'alluminio, precedentemente eseguite da Villa [1]. L'autore si è occupato della produzione di barre tubolari anti-intrusione riempite in schiuma d'alluminio, investigando quale sia la migliore configurazione guscio-schiuma. In particolare per il riempimento dei tubi è stata usata una schiuma in alluminio AlMg1Si0.6 (6061). Ha ricavato, dunque, che dal punto di vista produttivo, il miglior compromesso fra prestazioni e costo è dato dalla configurazione con schiumatura diretta. Ha poi, come già detto, eseguito test di flessione.

Per il secondo set di dati, invece, si utilizza un piano di simulazioni ("*Design of Experiments*") determinato con il metodo statistico *Latin Hypercube*, a partire dalle simulazioni delle prove sperimentali svolte. I parametri che tale metodo fornisce, caratterizzanti le nuove simulazioni da svolgere, sono i valori delle due variabili di progetto, discusse in precedenza. Di conseguenza in base alle coppie di valori fornite, rappresentanti la tenacità del materiale e il rapporto fra il momento d'inerzia e l'ingombro della sezione, verranno poi scelti i materiali e le caratteristiche geometriche dei tubi più adatti ai singoli casi.

Il procedimento svolto viene ora riassunto:

- svolgimento delle simulazioni delle prove sperimentali eseguite da Villa [1]
- determinazione del "*Design of Experiments*" da fornire al metamodello per creare la superficie di previsione
- ottimizzazione mediante l'*algoritmo EGO* di tale superficie.

Si anticipa che si è scelto di affrontare due scenari di ottimizzazione, entrambi basati sui medesimi dati sperimentali iniziali a disposizione. Ciò che differenzia i due scenari e che sarà spiegato in modo dettagliato nel Capitolo 6, riguarda la descrizione all'interno delle simulazioni del comportamento plastico dei materiali usati nelle prove di Villa [1], in particolare la curva di incrudimento. Nel primo dunque, le simulazioni non saranno calibrate in modo da ottenere risultati più prossimi possibile a quelli sperimentali, contrariamente a quanto accadrà nel secondo. Il primo scenario che verrà affrontato pertanto, viene definito "*Scenario non calibrato*", mentre il secondo "*Scenario calibrato*".

In teoria, utilizzando metamodelli di tipo gerarchico, la calibrazione delle simulazioni dovrebbe ricoprire un ruolo meno rilevante di quanto accade per

quelli tradizionali. Pertanto, la scelta di affrontare questi due scenari, partendo dallo stesso punto di inizio, ovvero le prove sperimentali, viene dall'intenzione di capire che importanza assume la calibrazione nell'utilizzo di un metamodulo di ottimizzazione gerarchico, visto il tempo e le risorse richieste da questa operazione.

Si riassume ora il lavoro che sarà svolto nei prossimi capitoli.

Nel Capitolo 5 verrà spiegato il metodo di simulazione usato per riprodurre le prove di flessione.

Nel Capitolo 6 saranno introdotti i due scenari di simulazione analizzati, soffermandosi sugli aspetti comuni e sulle differenze. Verranno inoltre mostrate le prove sperimentali eseguite da Villa [1] e i loro risultati.

Nei Capitoli 7 e 8 si procederà con l'ottimizzazione non vincolata rispettivamente dello "*Scenario di simulazione non calibrato*" e dello "*Scenario di simulazione calibrato*".

Nel Capitolo 9 si affronterà l'ottimizzazione vincolata dal costo al pezzo del tubo e dall'ingombro della sezione, per entrambi gli scenari d'analisi.

Nel Capitolo 10 sarà ampliato il piano sperimentale dello "*Scenario di simulazione calibrato*", eseguendo altre due serie di prove di flessione per poi eseguire nuovamente l'ottimizzazione non vincolata e vedere l'effetto dell'aggiunta di punti sperimentali.

Infine nel Capitolo 11 si formuleranno le conclusioni derivanti da questa analisi.

Capitolo 5

Simulazione della prova di flessione

Nel corso del capitolo viene illustrato il metodo di simulazione usato per riprodurre le prove di flessioni dei tubi.

Nel primo sottocapitolo si riporta il metodo di svolgimento delle prove, mentre nella restante parte si spiegano nel dettaglio le caratteristiche delle simulazioni.

5.1 Prova di flessione

La norma di riferimento per i test di flessione è la UNI 559.

Questo test è eseguito per determinare o verificare il carico corrispondente a una determinata freccia permanente del tubo da testare, oppure in alternativa la freccia permanente corrispondente a un determinato carico. Solitamente per i materiali fragili, come la ghisa, si verifica o si determina la freccia o il carico all'istante della rottura. Per i materiali che si inflettono senza rompersi, invece, si verifica o si determina la freccia corrispondente al carico massimo raggiunto durante le prova.

Nella Figura 5.1 si schematizza la flessione su tre punti di un tubo, i cui principali componenti sono il penetratore, il tubo da flettere e i due supporti:

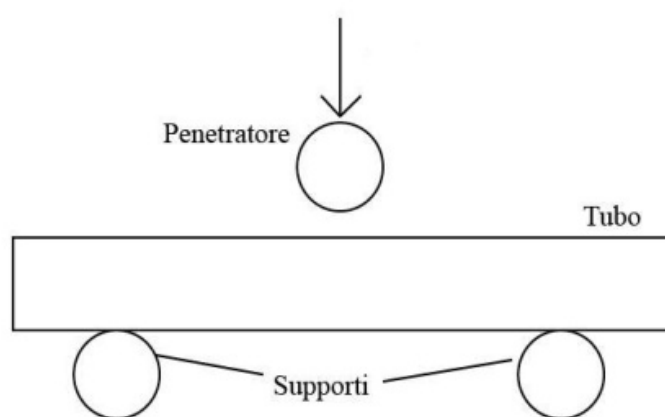


Figura 5. 1: Flessione su tre punti di un tubo.

Il tubo testato, avente una sezione costante lungo tutta la sua lunghezza e simmetrica rispetto al piano di flessione, è appoggiato su due supporti, costituiti da due rulli circolari aventi assi paralleli. Nella mezzeria del tubo, a distanza pari dai due rulli, è applicato un carico concentrato con direzione perpendicolare all'asse dei rulli. La freccia ottenuta dalla prova deve essere misurata perpendicolarmente al piano degli appoggi, a metà distanza fra gli appoggi e deve essere riferita al piano mediano del tubo.

In questo studio dalla prova di flessione si vuole conoscere l'andamento del carico in funzione di una freccia limite, imposta pari a 48 mm. [46]

5.2 Metodo di simulazione

Il software di simulazione utilizzato è Abaqus 6.10. Di seguito si illustrano le principali caratteristiche sulle simulazioni svolte. Per le spiegazioni teoriche si è fatto riferimento all'Abaqus Analysis User's Manual. [47]

5.2.1 Modellazione del materiale tubi e della schiuma

Per modellare le barre anti-intrusione bisogna descrivere il comportamento sia del materiale del fascio tubolare, sia della schiuma metallica contenuta all'interno.

I parametri utili per descrivere il comportamento di un materiale riguardano il comportamento elastico e plastico, uniti ad alcune proprietà di carattere generale. In particolar modo i parametri d'interesse vengono riportati nella Figura 5.2.

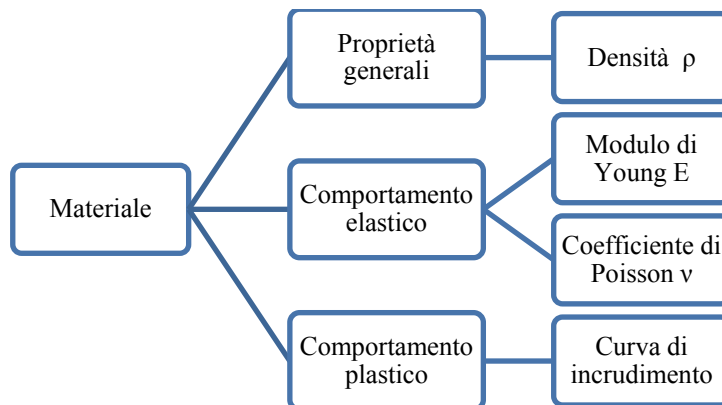


Figura 5. 2: Parametri d'interesse per la descrizione del comportamento dei materiali.

In questo caso, sia per i materiali del fascio tubolare sia per la schiuma, l'unica proprietà di carattere generale inserita è la densità.

Campo elastico

Per quanto riguarda il campo elastico, in entrambi i componenti si utilizza il tipo di elasticità più semplice, ovvero quella *isotropica*. Tale comportamento viene descritto dal *Modulo di Young* e dal *coefficiente di Poisson*, grazie ai quali poi è possibile ricavare anche il *Modulo di elasticità trasversale*, attraverso la relazione che segue:

$$G = \frac{E}{2(\nu + 1)} \quad (5.1)$$

Per cui la relazione fra sforzo e deformazione è data da (5.2):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

Campo plastico

Per quanto riguarda la plasticità, invece, sono stati utilizzati due modelli differenti per modellare la schiuma in alluminio e gli acciai:

- per gli *acciai* si utilizza il modello di *plasticità classica* con un incrudimento isotropico.
- per la *schiuma* il modello di plasticità *crushable foam*.

Il primo modello può essere utilizzato in vari casi in unione al modello di elasticità lineare, come in analisi di impatti, studi di *metal-forming*, analisi di collasso e per qualsiasi altra procedura che utilizza elementi con gradi di libertà di spostamento. Per questo modello di plasticità si è considerato un incrudimento isotropico, in cui la superficie di snervamento cambia dimensioni uniformemente in ogni direzione. Lo sforzo di snervamento, dunque, cresce o decresce in tutte le direzioni non appena le deformazioni plastiche occorrono. Abaqus offre un modello di incrudimento isotropico che è utile per le situazioni in cui ci sono deformazioni plastiche grossolane o nel caso in cui vi siano deformazioni in ogni punto che hanno la stessa direzione nello spazio di

deformazione per tutta l'analisi. È dunque necessario fornire una curva di incrudimento del materiale, ponendo lo sforzo di snervamento come una funzione tabulare della deformazione. Come prima coppia di valori è necessario, però, inserire lo sforzo di snervamento e la deformazione nulla. Tutti i valori di sforzo-deformazione tabulati vengono poi interpolati poi dal software.

Per costruire la curva di Sforzo-Deformazione dei materiali in esame è stata utilizzata la legge costitutiva di *Ramberg-Osgood*:

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_{pl})^n \quad (5.3)$$

in cui ε_{pl} è la deformazione plastica, σ è lo sforzo, E è il Modulo di Young. K e n , invece, sono rispettivamente il coefficiente di resistenza e l'esponente d'incrudimento.

Il modello di plasticità utilizzato per modellare la schiuma, invece, è di tipo *crushable foam*. Tale modello può essere usato per le strutture utilizzate come assorbitori di energia, per studiare la risposta di un materiale sottoposto essenzialmente a un carico monotono e anche per modellare la capacità di una schiuma di deformarsi a compressione a causa dell'instabilità delle pareti cellulari. Non è stata considerata alcuna dipendenza dalla velocità di deformazione, mentre il modello di incrudimento utilizzato in questo caso è quello *volumetrico*, che utilizza una superficie di snervamento con una dipendenza ellittica dallo sforzo deviatorico sullo sforzo di pressione. È dunque necessario inserire due parametri nel software:

- il *Compression Yield Stress Ratio* k , che rappresenta il rapporto fra l'iniziale sforzo di snervamento sotto una compressione uniassiale σ_c^0 e lo sforzo iniziale sotto compressione idrostatica p_c^0
- l'*Hydrostatic Yield Stress Ratio* k_t , che rappresenta il rapporto fra la resistenza di snervamento nella tensione idrostatica p_t e l'iniziale sforzo nella compressione idrostatica p_c^0 .

$$k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0} \quad k_t = \frac{p_t}{p_c^0} \quad (5.4)$$

Solitamente il coefficiente k è compreso fra 0 e 3, mentre il coefficiente k_t deve essere maggiore o uguale a 0.

È stata, infine, inserita la legge di incrudimento della schiuma, anch'essa in forma tabulare. La tabella deve iniziare anche in questo caso con una deformazione plastica zero e le voci tabulari devono essere riportati in ordine crescente di grandezza.

5.2.2 Modellazione dei componenti

Il sistema da modellare è composto da quattro componenti:

- Il penetratore
- Il supporto
- Il tubo
- La schiuma

Le geometrie di tali componenti, ad eccezione di quella del penetratore, variano in base alla configurazione da testare, ossia barra anti-intrusione a sezione tonda, quadrata o romboidale. Tuttavia i metodi di modellazione rimangono uguali per tutte e tre le configurazioni.

Il *penetratore* è stato modellato come un elemento *analiticamente rigido* di forma semicilindrica nello spazio tridimensionale. Il diametro del semicilindro è 20 mm e la lunghezza è 70 mm. Nella mezzeria è stato creato un *Reference Point*, utile poi per il successivo assemblaggio fra punzone e fascio tubolare.

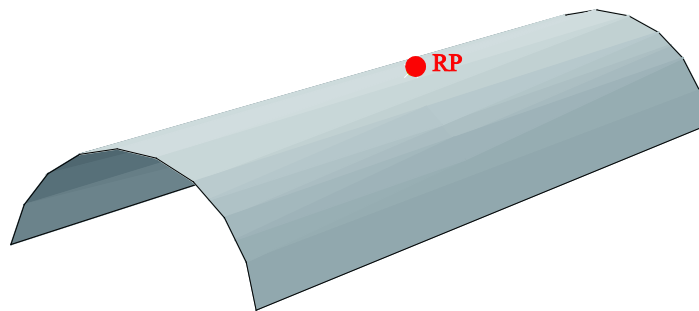


Figura 5. 3: Penetratore

I *supporti* sono stati modellati con elementi *shell discretamente rigidi*. Per quanto riguarda le geometrie dei supporti si è cercato di riprodurre al meglio quelle che utilizzate nel corso delle prove sperimentali [1]. Infatti a seconda delle forme delle sezioni delle barre usate, la struttura del supporto varia, mantenendo, però, sempre una larghezza di 21.4 mm.

- Geometria tonda: l'assieme tubo-schiuma si appoggia su una concavità semicilindrica di raggio 28 mm .

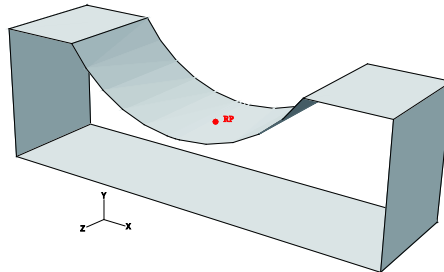


Figura 5. 4: Supporto per il tubo con geometria tonda.

Si riporta un disegno con le misure usate.

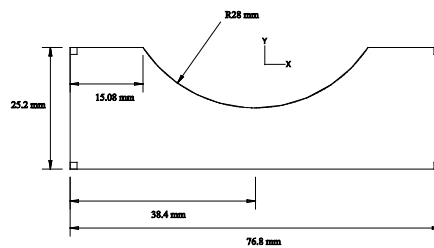


Figura 5. 5: Misure supporto per geometria tonda.

- Geometria quadrata: l'assieme tubo-schiuma si appoggia su un semplice parallelepipedo, le cui misure sono riportate in Figura 5.7.

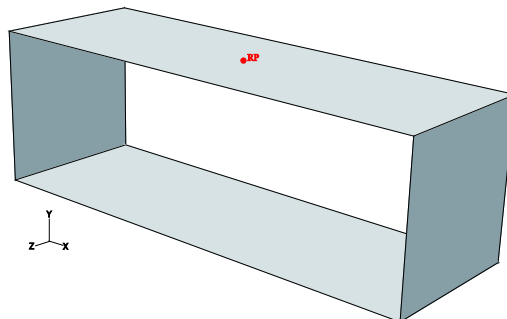


Figura 5. 6: Supporto per il tubo con geometria quadrata.

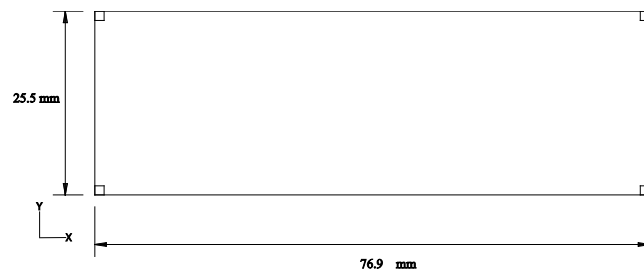


Figura 5. 7: Misure supporto per geometria quadrata

- Geometria a rombo: l'assieme tubo-schiuma si appoggia su una concavità a spigolo vivo.

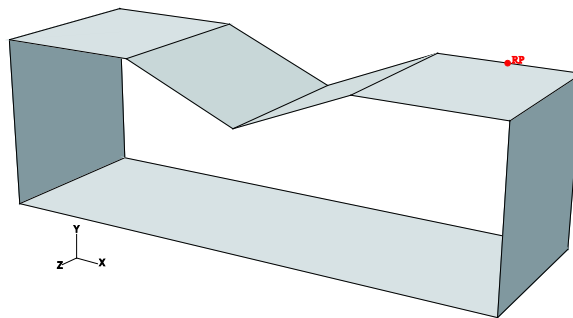


Figura 5. 8: Supporto per il tubo con geometria a rombo.

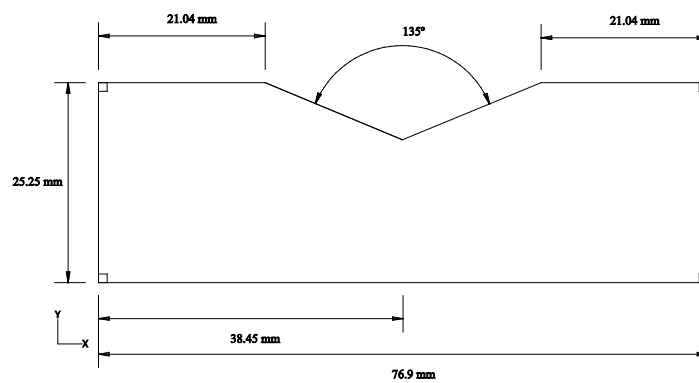


Figura 5. 9: Misure supporto per geometria a rombo.

Il tubo e la schiuma sono stati modellati con elementi *tridimensionali solidi deformabili*. La loro lunghezza è 240 mm. Anche in questo caso si riportano le tre geometrie:

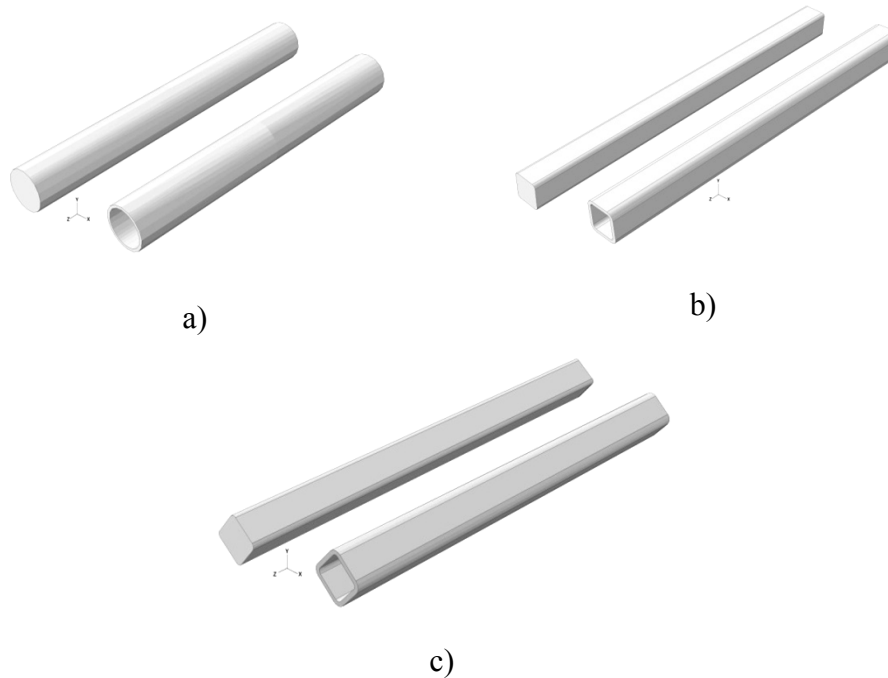


Figura 5. 10: Fasci tubolari e schiume a sezione a) Tonda. b) Quadrata. c) Romboidale.

Per rendere la simulazione più veloce si è deciso di non utilizzare la struttura intera, ma soltanto un quarto di essa, sfruttando opportuni vincoli di simmetria che saranno mostrati nel sottocapitolo 5.2.4.

Per cui, una volta creati i quattro componenti e tagliati in modo da ottenere un quarto della struttura complessiva, sono stati assemblati nel modo mostrato in Figura 5.11.

Per tutte e tre le geometrie il supporto modellato è stato posizionato a 75 mm di distanza dalla mezzeria della struttura e la schiuma è stata inserita nel tubo in modo coassiale, fornendo solo la legge di contatto. Per le geometrie considerate, l'insieme tubo - schiuma è stato appoggiato sul supporto attraverso un contatto nel *Reference Point*. Il punzone, infine, è stato posizionato nelle mezzeria dell'intera struttura attraverso l'altro *Reference Point*.

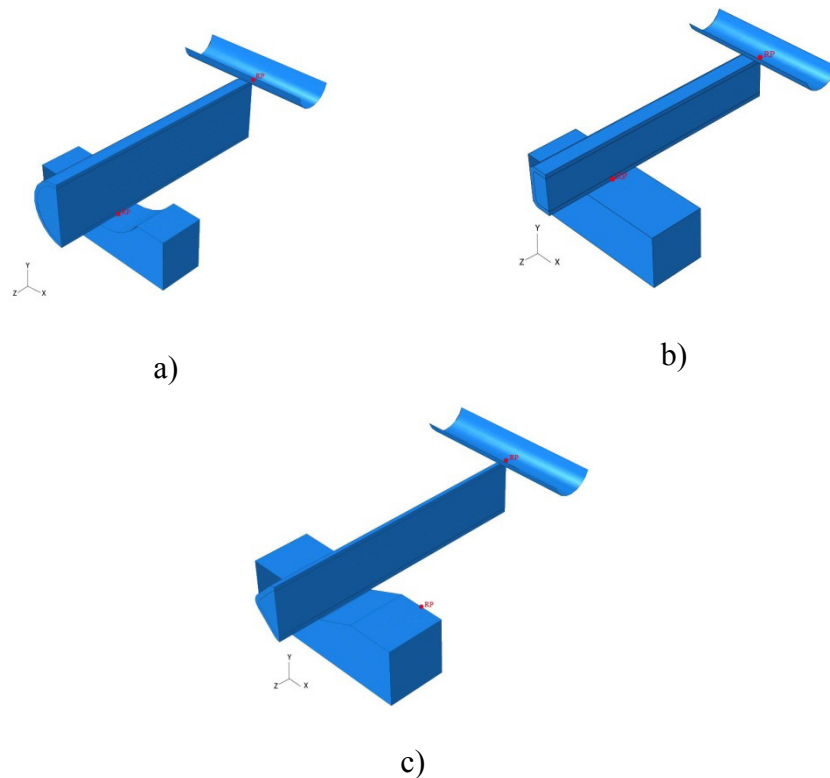


Figura 5. 11: Assemblaggio a)Tondo. b) Quadrato. c)Rombo

La legge di contatto fornita fra le superfici è un *General Contact* del tipo “*All with self*”. Tale tipologia di contatto è associata alla proprietà meccanica di contatto di comportamento tangenziale, con una formulazione di attrito di tipo *Penalty*. Tale formulazione permette un movimento relativo fra le superfici, ovvero una specie di “scorrimento elastico”, quando dovrebbero essere aderenti fra loro. Quando le superfici aderiscono fra loro, ossia il τ è minore del τ critico, lo scorrimento è limitato a questo scorrimento elastico. La direzionalità scelta è isotropa, in modo da dover inserire un solo coefficiente d’attrito, scelto pari a 0.6.

5.2.3 Tipologia di analisi svolta

È stato poi creato definita il tipo di analisi che si intende svolgere sulla struttura. In questo caso si vuole affrontare un’*analisi dinamica esplicita*, che permette di affrontare problemi di risposta dinamica utilizzando una regola di esplicita di integrazione, basata sul tempo delle differenze centrate. Il tempo dell’analisi è stato impostato pari a 0.06 s, che rappresenta 1/100 del tempo impiegato nelle

prove sperimentali effettuate da Villa [1]. Nell'analisi dunque, vengono dati in numero elevato di incrementi di piccola misura e relativamente poco costosi, se paragonati a quelli presenti in altre tipologie di analisi, poiché non si deve risolvere un gruppo di equazioni simultaneamente. Infatti l'equilibrio del sistema di equazioni viene sistemato all'inizio dell'incremento t ; l'accelerazione al tempo t viene poi utilizzata per calcolare la velocità al tempo $t+\Delta t/2$ e lo spostamento al tempo $t+\Delta t$.

Nell'implementazione numerica del metodo le equazioni di moto vengono integrate utilizzando le regole esplicite di integrazione delle differenze centrate.

$$\begin{cases} \dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N = \dot{u}_{\left(i-\frac{1}{2}\right)}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)}^N \\ u_{(i+1)}^N = u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N \end{cases} \quad (5.5)$$

in cui u^N è il grado di libertà che può essere una componente di spostamento o rotazione, l'indice i rappresenta il numero di incremento nell'analisi. Come si può vedere in (5.5) il metodo è esplicito, poiché al passo i -esimo si usano valori tutti noti dei passi precedenti. Il problema è che tale algoritmo non è *self-starting*, per cui l'accelerazione all'inizio dell'incremento non è nota, ma è calcolabile con la matrice di Massa:

$$\ddot{u}_{(i)}^N = (M^{NJ})^{-1} (P_{(i)}^J - I_{(i)}^J) \quad (5.6)$$

M^{NJ} è la matrice di massa, P^J è il vettore dei carichi applicato e I^J è il vettore delle forze interne.

L'operatore delle differenze centrate è condizionatamente stabile e il limite di stabilità può essere approssimato con:

$$\Delta t \approx \frac{L_{\min}}{c_d} \quad (5.7)$$

In cui L_{\min} è la dimensione del più piccolo elemento nella mesh e c_d è la velocità di dilatazione dell'onda che dipende dalle costanti di Lamè $\hat{\lambda}$ e $\hat{\mu}$.

$$c_d = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}} \quad (5.8)$$

Per un materiale isotropo ed elastico si ha:

$$\hat{\lambda} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5.9)$$

$$\hat{\mu} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Abaqus di default da un incremento automatico all'analisi e stimare il Δt_{lim} globalmente, non elemento per elemento.

Per quanto riguarda i costi computazionali, il periodo impiegato dalla simulazione è proporzionale al periodo dell'evento da simulare. L'incremento temporale può essere scritto nel seguente modo:

$$\Delta t \leq \min\left(\frac{L_c}{c_d}\right) \quad (5.10)$$

in cui il minimo è preso su tutti gli elementi della mesh. Il numero di incrementi richiesti dunque è:

$$n = \frac{T}{\Delta t} \approx T \max\left(\frac{c_d}{L_c}\right) \quad (5.11)$$

Per cui nei modelli 3D, ad esempio, rendere più fine la mesh di un fattore 2 in tutte le direzioni comporta l'aumento del tempo di simulazione di un fattore 16.

5.2.4 Vincoli imposti e tecnica di meshatura

Per riprodurre una prova di flessione su tre punti, è necessario fornire alcune condizioni al contorno nello step di analisi. In particolare bisogna fornire vincoli meccanici di spostamento e rotazioni al supporto e al penetratore, vincoli meccanici di velocità al penetratore e vincoli di simmetria per poter utilizzare nella simulazione un quarto del modello intero, come detto in precedenza.

Per cui i vincoli inseriti sono:

- *Incastro del supporto*: è stato inserito un vincolo di spostamento e rotazione applicato al *Reference Point* posizionato sul supporto, in cui sono state bloccate tutte le rotazioni e gli spostamenti.
- *Spostamento verticale del penetratore*: è stato inserito un vincolo di spostamento e rotazione applicato al *Reference Point* posizionato sul

penetratore, in cui sono state bloccate tutte le rotazioni e gli spostamenti, ad eccezione dello spostamento nelle direzione verticale.

- *Legge di velocità al movimento verticale del penetratore*: è stato inserito un vincolo di velocità applicato al *Reference Point* posizionato sul penetratore, in cui è stata imposto un andamento di velocità uniforme nella direzione verticale di discesa del punzone. Il valore imposto è 833.33 mm/s, circa 1/100 della velocità delle prove sperimentali [1].
- *Vincoli di simmetria* in direzione x e z sulla superficie del tubo e della schiuma.

Si riporta una figura in cui si mostrano le condizioni di vincolo:

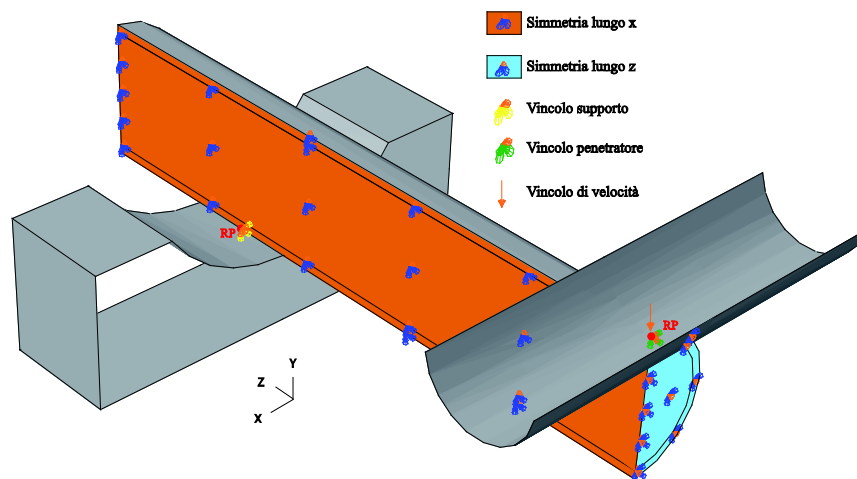


Figura 5. 12: Vincoli applicati sull'intero assieme.

Per quanto riguarda la mesh, esistono vari livelli di automazione e di controllo che si possono usare, a seconda delle necessità dell'analisi svolta. Bisogna dunque definire alcune caratteristiche, quali la tecnica di meshatura, il tipo di elemento usato e la dimensione degli elementi.

Gli elementi utilizzati sono di primo ordine (lineari) esaedrici. Questi sono elementi 3D e sono definiti C38DR a 8 nodi, con integrazione ridotta e controllo dell'*hourglass*. Risulta conveniente usarli quando vi sono problemi che riguardano il contatto o grandi distorsioni. Gli elementi esaedrici con una buona mesh hanno la stessa accuratezza degli elementi tetraedrici (sempre elementi 3D), ma hanno un costo inferiore. Presentano inoltre, una migliore velocità di convergenza e hanno una migliore prestazione se la loro forma iniziale è rettangolare, contrariamente a quanto accade per i tetraedrici che non presentano una particolare sensibilità alla forma iniziale.

L'integrazione ridotta utilizza un ordine basso di integrazione per formare la rigidità dell'elemento. Riduce il tempo di simulazione specialmente nel 3D, anche se l'accuratezza raggiunta da elementi di primo ordine con integrazione ridotta o piena è largamente dipendente dalla natura del problema.

L'Hourglass, invece, è un problema che si può avere con elementi di primo ordine con integrazione ridotta in analisi di sforzi/spostamenti. Visto che gli elementi presentano un solo punto di integrazione è possibile che risulti che gli sforzi calcolati in quel punto di integrazione siano tutti nulli. Ciò comporta una incontrollata distorsione della mesh. Per cui per evitare questo fenomeno, oltre al controllo occorre utilizzare mesh ragionevolmente fini e distribuire i carichi e le condizioni al contorno su un numero di nodi adiacenti.

È stata definita, poi, una *Global seed* in cui si è posto la misura globale di un elemento. Per strutture con spessori dei tubi uguali o inferiori a 1 mm, è stata utilizzata una seed di 0.5, mentre negli altri casi un valori di 1.

Le *tecniche di meshatura* usate sono state diverse in base alla geometria analizzata. Per la geometria quadrata e a rombo è stata usata un tecnica strutturata, mentre per la geometria tonda una tecnica sweep.

La *tecnica strutturata* è in grado di formare una mesh strutturata formata da tipologie predefinite e semplici di mesh. Il software trasforma la mesh di una regione regolare, un quadrato o un cubo, nella geometria della regione che si vuole meshare.

La *tecnica di sweep* è utilizzata per solidi complessi e regioni superficiali e si articola in due fasi. Nella prima fase Abaqus crea la mesh su un lato della regione (*source side*). Successivamente continua a copiare i nodi di questa mesh su tutti i lati fino all'ultimo (*target side*), facendo uno strato alla volta. Il bordo lungo il quale Abaqus copia i nodi è chiamato *percorso di sweep*. Se questo è un bordo dritto, la mesh che ne risulta prende il nome di *estrude swept mesh*, mentre, se è un bordo circolare, prende il nome di *revolved swept mesh*.

5.2.5 Risultati ottenuti

Una volta svolta la simulazione la configurazione deformata ottenuta è sempre simile a quella riportata in figura. Come esempio, si riporta la deformazione di una barra a sezione tonda al termine della simulazione (Figura 5.13).

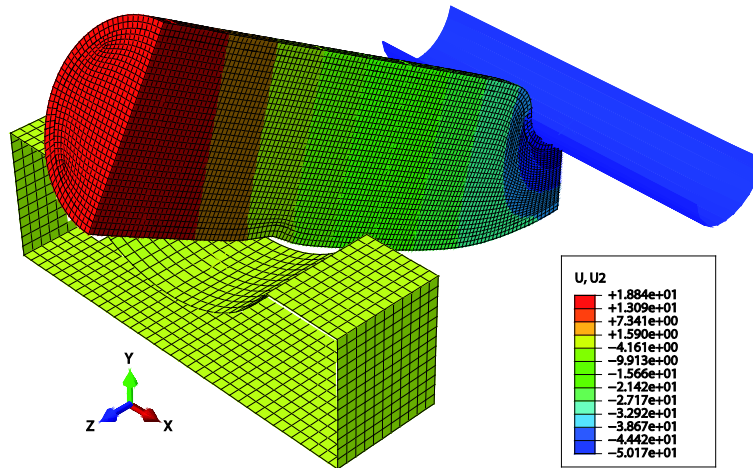


Figura 5.13: Configurazione deformata al termine della simulazione.

Nel riquadro si indicano i valori di spostamento in direzione y , che rappresenta la direzione di interesse in quanto direzione di discesa del penetratore. Al termine della simulazione il supporto ha uno spostamento nullo in quanto è un elemento fermo vincolato a terra, mentre il penetratore presenta uno spostamento di circa 50 mm .

Ciò che si vuole analizzare del sistema è l'andamento del legame *Forza – Spostamento* in direzione verticale, o meglio direzione y , necessario per ricavare i parametri precedentemente illustrati ($P_{med}(\delta l_{max})$ e $P_{max}(\delta l_{max})$), utili per il calcolo di Y'_{48} . Per cui poi per ogni simulazione è stato ricavato tale grafico considerando però uno spostamento massimo di 48 mm visto che per l'indicatore di performance Y' si è scelto di considerare una inflessione massima di tale valore. Inoltre i dati Forza-Deflessione ricavati sono stati filtrati da un filtro di tipo *Smooth*, ed è per questo motivo che le curve di simulazione non iniziano con un valore nullo di forza.

Capitolo 6

Introduzione ai due scenari di simulazione

Nel Capitolo 4.2 era già stato anticipato che sarebbero stati analizzati due scenari di simulazione, riportando anche la motivazione di tale scelta. In questo capitolo vengono, dunque, introdotti i due contesti di analisi, evidenziandone le caratteristiche comuni e le differenze.

Per la determinazione dei *Design of Experiments* di entrambi gli scenari, che saranno affrontati poi nei Capitoli 7 e 8, sono state utilizzate infatti, come dati iniziali, le sette simulazioni eseguite delle sette serie di prove sperimentali di flessione, effettuate da Villa. [1]

Ciò che differenzia lo “*Scenario non calibrato*” dallo “*Scenario calibrato*” riguarda la descrizione, nelle simulazioni, del comportamento plastico dei materiali dei tubi usati nelle prove sperimentali. In particolare ci si riferisce alla curva di incrudimento. In entrambi gli scenari affrontati, il comportamento plastico è descritto dalla *legge esponenziale di Ramberg – Osgood*, già illustrata nel Capitolo 5.2.1, ma i valori dei due coefficienti di incrudimento k e n cambiano.

Si procede, inizialmente, con l'analisi dei risultati delle prove sperimentali, per poi continuare con la caratterizzazione dei materiali nei due scenari di simulazione e, infine, confrontare i due set di risultati ottenuti.

6.1 Prove sperimentali di flessione

Villa [1] ha effettuato in totale 27 prove sperimentali di flessione su tre punti, suddivise in sette serie di prove, utilizzando tubi riempiti in schiuma d'alluminio Al6061 variando fra tre tipologie di sezione e di materiali. Per ciascuna serie di prove sono state eseguite dunque almeno tre repliche. Le sezioni dei tubi utilizzate sono tonda, quadrata e romboidale equilatera, mentre i materiali sono un acciaio comune (Fe360), un acciaio alto-resistenziale (DOCOL800DP) e un acciaio inossidabile (AISI 304). La lunghezza dei tubi testati è pari a 240 mm, come già specificato nel Capitolo 4.

Nella Tabella 6.1 si riporta un riassunto delle configurazioni, riguardanti la geometria della sezione e il materiale, analizzate.

Tabella 6. 1: Riassunto condizioni sperimentali effettuate da Villa in [1].

Materiale	Geometria della sezione					
	Tonda		Quadra		Rombo	
	D[mm]	s [mm]	L [mm]	s [mm]	L [mm]	s [mm]
Fe 360	27	2.5	20	2	20	2
DOCOL800DP	32	2	30	1.5	30	1.5
AISI 304	25	1.5	-	-	-	-

La macchina utilizzata da Villa [1] per la prova di flessione è una pressa da 100 kN della *MTS modello Alliance RT/100*, sulla quale è stata montata una cella di carico da 100 kN. Sotto la cella è stato posizionato il penetratore di diametro 20 mm. La deformazione massima imposta è stata 50 mm per i tubi a sezione tonda e 75 mm per quelli a sezione quadrata, anche se poi i dati sono stati analizzati fino a 48 mm.

Per ogni tipologia delle sette condizioni sperimentali sono stati testati più tubi, in modo da poterne analizzare il comportamento medio.

Si riportano, tuttavia, soltanto i comportamenti medi ottenuti.

In **Appendice 1** vengono riportati i risultati ricavati per tutti i singoli tubi testati.

6.1.1 Prove di flessione con tubi in Fe 360

Nelle prove di flessione con tubi in acciaio comune Fe 360, sono state testate sezioni a rombo, quadrate e tonde. Per ciascuna delle tre tipologie sono stati eseguiti almeno tre prove:

- *Condizione sperimentale 1*: tre prove con tubi con sezione a rombo di lato 20 mm e spessore 2 mm.
- *Condizione sperimentale 2*: quattro prove con tubi con sezione quadrata di lato 20 mm e spessore 2 mm.
- *Condizione sperimentale 3*: quattro prove con tubi con sezione tonda di diametro 27 mm e spessore 2.5 mm.

Di seguito, nella Figura 6.1, si riportano i legami medi Forza-Deflessione ottenuti e i rispettivi valori dei parametri d'interesse (Tabella 6.2), utili per il calcolo dell'indice di performance Y'_{48} .

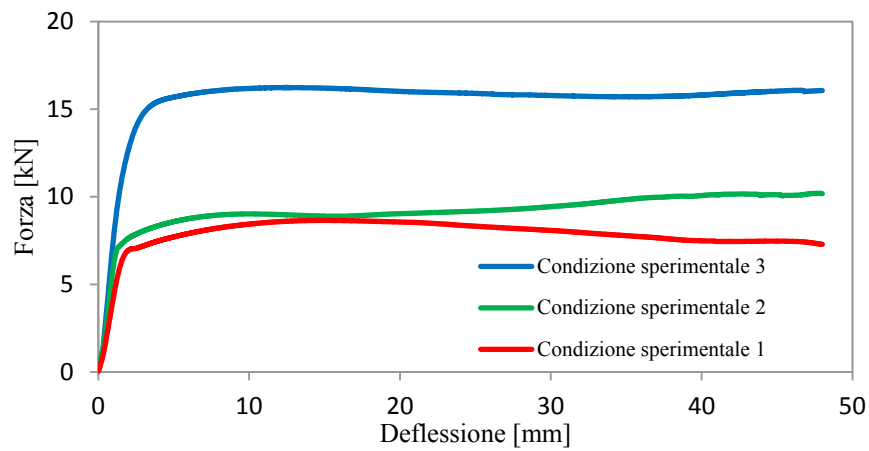


Figura 6. 1: Legami medi Forza-Deflessione delle condizioni sperimentali 1, 2, 3.[1]

Tabella 6. 2: Risultati medi delle condizioni sperimentali 1, 2, 3.[1]

Condizione sperimentale	1	2	3
Sezione	Rombo 20x20x2 [mm ³]	Quadrata 20x20x2 [mm ³]	Tonda 27x2.5 [mm ²]
N° Prove	3	4	4
M [g]	295.43	283.26	410.29
ρ_f [kg/dm ³]	0.560	0.567	0.559
W_m [mm]	28.28	20	27
P_{medio} [kN]	7.66	8.91	15.24
P_{max} [kN]	8.64	10.30	16.49
η	0.89	0.87	0.92
E_{abs} [kNmm]	367.83	427.83	731.47
S.E.A. [kNmm/kg]	1245.11	1512.64	1782.53
Y_{48} [N/mmkg]	813.19	1366.39	1276.76
Y'_{48} [N/kg]	23000.60	27327.71	34344.88

Dalla Tabella 6.2, considerando che si sta usando lo stesso materiale del tubo, si nota come il valore dell'indice Y'_{48} sia maggiore per la sezione tonda rispetto alle altre. Infatti, tale configurazione possiede anche energia specifica d'assorbimento ed efficienza energetica maggiori. La configurazione peggiore,

invece, risulta essere quella a rombo, che presenta una diminuzione percentuale su Y'_{48} del 33% rispetto a quella tonda. Questo risulta essere in controtendenza con quanto affermato nel Capitolo 4, a proposito della sezione romboidale.

6.1.2 Prove di flessione con tubi in DOCOL800DP

Anche per prove di flessione con l'acciaio alto-resistenziale sono state testate sezioni a rombo, quadrate e tonde. Per ciascuna tipologia di sezione sono state effettuate quattro prove:

- *Condizione sperimentale 4*: quattro prove con tubi con sezione a rombo di lato di 30 mm e spessore 1.5 mm
- *Condizione sperimentale 5*: quattro prove con tubi con sezione quadrata di lato di 30 mm e spessore 1.5 mm
- *Condizione sperimentale 6*: quattro prove con tubi con sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 1.5 mm

Si riportano nella Figura 9.2 i legami medi Forza-Deflessione ottenuti, seguiti dalla Tabella 6.3, riportante i valori dei parametri d'interesse:

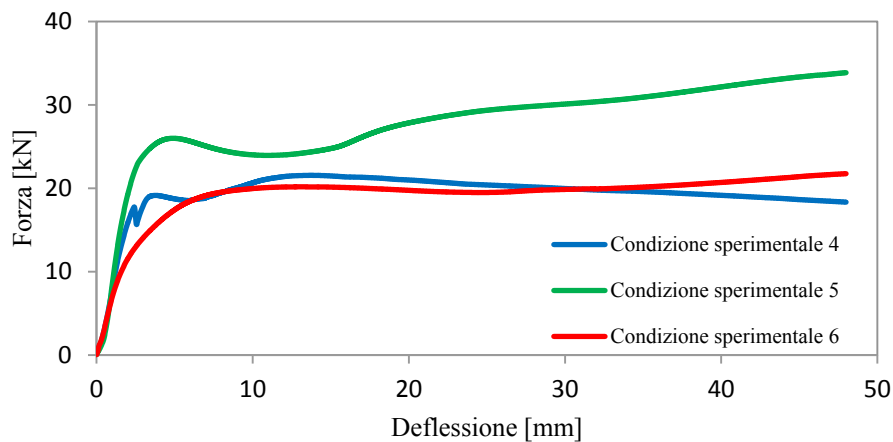


Figura 6. 2: Legami medi Forza-Deflessione delle condizioni sperimentali 4, 5, 6. [1]

Tabella 6. 3: Risultati medi delle condizioni sperimentali 4, 5, 6. [1]

Condizione sperimentale	4	5	6
Sezione	Rombo 30x30x1.5 [mm ³]	Quadrata 30x30x1.5 [mm ³]	Tonda 32x2 [mm ²]
N° Prove	4	4	4
M [g]	411.07	422.54	416.84
ρ_f [kg/dm ³]	0.573	0.567	0.547
W_m [mm]	42.43	30	32
P_{medio} [kN]	18.83	26.97	18.66
P_{max} [kN]	22.04	33.86	22.32
η	0.85	0.80	0,84
E_{abs} [kNmm]	903,78	1294.69	895.58
S.E.A. [kNmm/kg]	2197.90	3063.72	2148.04
Y_{48} [N/mmkg]	923.44	1695.40	1171.08
Y'_{48} [N/kg]	39178.20	50862.09	37474.71

Nel caso di acciaio alto-resistenziale, si nota chiaramente che la configurazione migliore è quella con la sezione quadrata, mentre la peggiore è quella con la sezione tonda. Infatti il valore di Y'_{48} per la *condizione sperimentale 2* è maggiore circa del 35 % rispetto alla *condizione 3* e del 30 % rispetto alla *1*. Nella Figura 6.2, inoltre, si osserva come la *condizione 2* abbia valori di forza maggiori e un maggiore assorbimento di energia, a pari deflessione massima. Infatti i tubi con la sezione quadrata hanno un valor medio di energia specifica di assorbimento *S.E.A.* nettamente maggiore a quello delle altre due sezioni. Confrontando i risultati ottenuti utilizzando l'acciaio alto-resistenziale con quelli ricavati con l'acciaio comune, si ricava che il tubo in DOCOL800 con sezione quadrata presenta il miglior assorbimento di energia e il valore di Y'_{48} maggiore.

6.1.3 Prove di flessione con tubi in AISI 304

Nel caso di acciaio inox sono stati effettuate prove soltanto con sezioni tonde. Per cui si ha un'unica condizione sperimentale in cui sono stati testati quattro tubi:

- *Condizione sperimentale 7*: quattro prove con tubi con sezione tonda di diametro 25 mm e spessore 1.5 mm.

Viene, pertanto, riportato l'unico legame Forza-Deflessione medio ricavato (Figura 6.3):

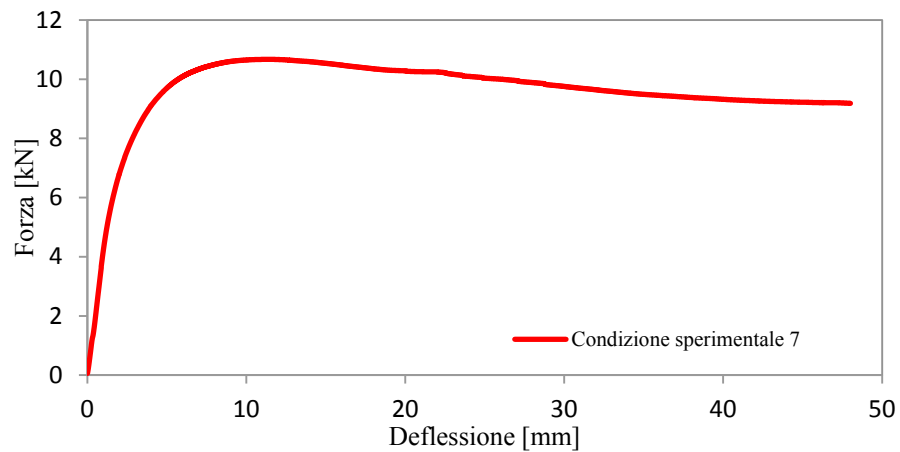


Figura 6. 3: Legame medio Forza-Deflessione della condizione sperimentale 7. [1]

I valori medi ricavati sono riportati nella Tabella 6.4:

Tabella 6. 4: Risultati medi della condizione sperimentale 7. [1]

<i>Condizione sperimentale</i>	7
<i>Sezione</i>	Tonda 25x1.5 [mm ²]
<i>N°Prove</i>	4
<i>M [g]</i>	247.39
<i>ρ_f [kg/dm³]</i>	0.535
<i>W_m [mm]</i>	25
<i>P_{medio} [kN]</i>	9.31
<i>P_{max} [kN]</i>	10.68
<i>η</i>	0.87
<i>E_{abs} [kNmm]</i>	446.94
<i>S.E.A. [kNmm/kg]</i>	1806.40
<i>Y_{48} [N/mmkg]</i>	1313.08
<i>Y'_{48} [N/kg]</i>	32827.03

Il valore di Y'_{48} ottenuto con l'uso di una sezione tonda del tubo in AISI 304, se paragonato con le altre configurazioni tonde testate, ma in materiale differente, è il più piccolo. Infatti rispetto al tubo con la sezione tonda in acciaio comune è minore circa del 4%, mentre per quello in acciaio alto-resistenziale circa del 12%.

Si può dunque concludere che per queste prove sperimentali, la *condizione sperimentale 5* è quella che presenta materiale e caratteristiche geometriche migliori per la massimizzazione dell'energia assorbita (sezione quadrata di dimensioni $30 \times 30 \times 1.5 \text{ mm}^3$ in DOCOL800DP).

6.2 Caratterizzazione dei due scenari di simulazione

In questo sottocapitolo ci si occupa di mostrare le principali differenze fra i due scenari di simulazione analizzati. In particolar modo ci si occupa della caratterizzazione dei materiali delle simulazioni delle sette condizioni sperimentali appena illustrate, differenziando lo “*Scenario non calibrato*” dallo “*Scenario calibrato*”.

Come già detto, la differenza che è alla base dei due contesti di analisi è la curva di incrudimento utilizzata per descrivere il comportamento plastico dei materiali dei tubi dei 27 punti sperimentali iniziali.

6.2.1 Caratterizzazione dei materiali dei tubi

I materiali utilizzati nelle sette condizioni sperimentali sono stati l'acciaio comune Fe360, l'acciaio alto-resistenziale DOCOL800DP e l'acciaio inossidabile AISI304.

Per entrambi gli scenari di simulazione, ciascuno dei tre materiali presenta gli stessi valori dei parametri che descrivono il comportamento plastico. Si riportano tali valori nella Tabella 6.5:

Tabella 6. 5: Caratteristiche elastiche degli acciai utilizzati.

	Fe 360	DOCOL800DP	AISI 304
$\rho \text{ [kg/dm}^3\text{]}$	7.85	7.87	8.00
$E \text{ [MPa]}$	206000	180498	190000
ν	0.3	0.3	0.3

Per quanto riguarda la parte plastica, come già illustrato nel Capitolo 5, la legge di incrudimento segue la *legge di Ramberg – Osgood*. Ciò che differenzia i due scenari di simulazione sono i valori dei due coefficienti di incrudimento K e n utilizzati per le prime sette simulazioni:

- **“Scenario non calibrato” di simulazione:** si utilizzano valori di K e n calcolati analiticamente nel seguente modo (6.1):

$$n = \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{ing}) = \ln\left(1 + \frac{A\%}{100}\right) \quad (6.1)$$

$$K [MPa] = \frac{R_m}{\varepsilon^n} = \frac{R_m}{n^n}$$

in cui $A\%$ rappresenta l’allungamento percentuale del materiale e R_m il carico di rottura. I valori di queste due grandezze ($A\%$ e R_m) sono i migliori disponibili, essendo stati ricavati o da prove sperimentali, come prove di trazione, qualora disponibili, o da un software contenente le caratteristiche dei materiali, *Ces EduPack 2012*. In particolare nel caso del Fe 360 e del DOCOL800DP, i valori di carico di rottura, snervamento e allungamento, sono stati ricavati da prove di trazione [1], mentre per l’AISI 304 si è fatto riferimento al programma *CES EduPack 2012*.

- **“Scenario calibrato” di simulazione:** i valori dei coefficienti K e n dei tre materiali iniziali sono stati ricavati, non analiticamente, ma attraverso una calibrazione delle simulazioni, vale a dire cercando quei valori tali da ottenere una differenza percentuale minima fra gli indici di performance Y'_{48} delle simulazioni e delle prove sperimentali, illustrate nel sottocapitolo 6.1 Di conseguenza, se per alcune simulazioni la differenza percentuale era già minima considerando valori di K e n analitici, può accadere che tali valori rimangano uguali a quelli utilizzati nell’altro scenario di simulazione.

Una volta ricavati i valori dei due coefficienti per le due situazioni di simulazione, si può calcolare poi la *Tenacità* dei materiali che rappresenta una delle due variabili indipendenti da ottimizzare (6.2).

$$\frac{W}{V} [MPa] = \frac{n^{n+1}K}{n+1} \quad (6.2)$$

Si riportano ora le i parametri utilizzati per la caratterizzazione dei materiali nei due scenari analizzati.

Per quanto riguarda lo scenario non calibrato di simulazione si osservi la Tabella 6.6, mentre per quello calibrato si osservi la Tabella 6.7.

Come si può vedere per lo “Scenario calibrato” si è effettuata per ogni materiale una distinzione anche in base alla geometria della sezione dei tubi. Questo perché comunque, sebbene si consideri sempre lo stesso materiale, le

condizioni e il modo in cui i tubi con diverse geometrie vengono prodotti, oltre ai trattamenti termici che possono subire, non sono mai uguali e dunque, è plausibile pensare a una variazione dei parametri del materiale. In aggiunta vi è anche il fatto che possono essere prodotti da fornitori diversi e pertanto, anche se teoricamente sono lo stesso materiale, nella pratica possono avere caratteristiche differenti. Di conseguenza i valori di K e n per lo stesso materiale sono differenti a seconda che la sezione sia tonda o quadrata/romboideale. Inoltre si nota come il range di valori di Tenacità vari fra i due scenari: nel primo infatti il range va da 72.65 MPa a 153.66 MPa, nel secondo, invece, da 72.65 MPa a 235.01 MPa.

Tabella 6. 6: Caratteristiche Fe360, DOCOL800DP, AISI304 del campo plastico per lo scenario non calibrato.

<i>Scenario di Simulazione Non Calibrato</i>			
	Fe 360	DOCOL800DP	AISI 304
R_m [MPa]	438	690	515
σ_{sn}	ND	390	205
A [%]	22	20	53
K [MPa]	603.90	943.51	740.84
n	0.20	0.18	0.43
W/V [MPa]	72.65	107.38	153.66

Tabella 6. 7: Caratteristiche Fe360, DOCOL800DP, AISI304 del campo plastico per lo scenario calibrato.

<i>Scenario di Simulazione Calibrato</i>					
<i>Sezione</i>	Fe 360		DOCOL800DP		AISI 304
	<i>Tonda</i>	<i>Quadrata, Rombo</i>	<i>Tonda</i>	<i>Quadrata, Rombo</i>	<i>Tonda</i>
R_m [MPa]	438		690		515
σ_{sn}	ND		390		205
A [%]	22		20		53
K [MPa]	603.90	530.00	700.00	943.51	1133.00
n	0.20	0.26	0.17	0.18	0.43
W/V [MPa]	72.65	77.05	75.89	107.38	235.01

Osservando le due Tabelle 6.6 e 6.7, si può intuire che le simulazioni 3, 5 e 6, avendo gli stessi valori di K e n in entrambi gli scenari, avranno la stessa curva d'incrudimento, oltre che gli stessi risultati.

Si riportano le curve di incrudimento utilizzate per la caratterizzazione dei materiali utilizzati per “Scenario non calibrato” di simulazione (Figura 6.4).

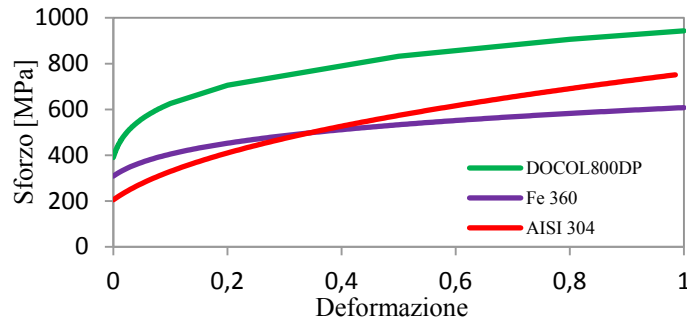


Figura 6. 4: Curva d'incrudimento DOCOL800DP, Fe360, AISI 304 per lo “Scenario non calibrato”.

Per lo “Scenario calibrato”, invece, si faccia riferimento alle Figure 6.5, 6.6 e 6.7.

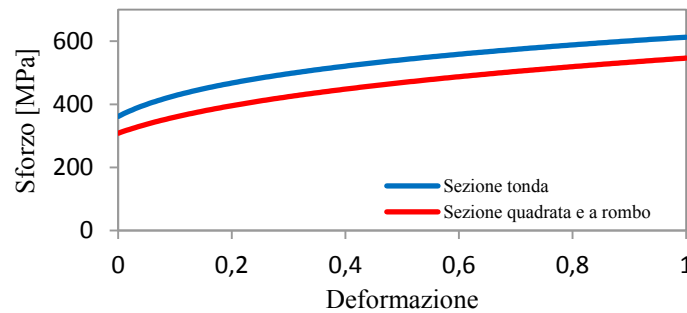


Figura 6. 5: Curve d'incrudimento Fe 360 per lo “Scenario calibrato”.

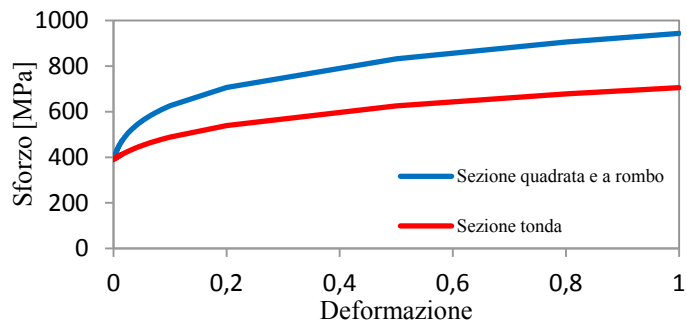


Figura 6. 6: Curve d'incrudimento DOCOL800DP per lo “Scenario calibrato”.

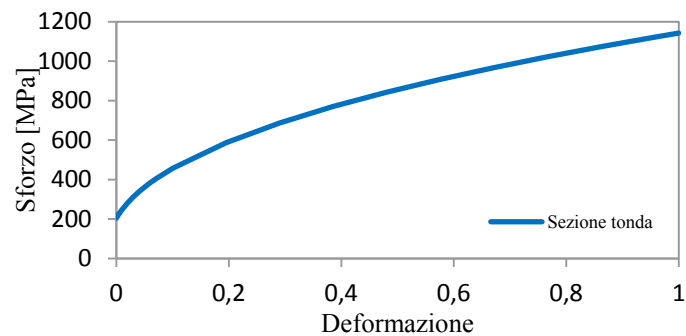


Figura 6. 7: Curva d'incrudimento AISI 304 per lo "Scenario calibrato"..

6.2.2 Caratterizzazione della schiuma d'alluminio

La schiuma utilizzata per il riempimento dei tubi è la Al6061. La sua caratterizzazione all'interno delle simulazioni è uguale per i due scenari analizzati. I parametri di interesse da inserire nel software di simulazione sono già stati illustrati nel Capitolo 5. Tuttavia, i valori che i coefficienti d'interesse assumono, non sono ancora stati detti. Come valori per la caratterizzazione della schiuma, si utilizzano, dunque, quelli ricavati nello studio di Villa [1]. Quest'ultimo, mediante prove di compressione su cilindri di schiuma, ha ritenuto ragionevole attribuire i seguenti valori ai parametri d'interesse.

Tabella 6. 8: Parametri caratteristici della schiuma. [1]

	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	k	k_t
Al 6061	0.555	3687.89	0.3	1.5	0.1

Per quanto riguarda il comportamento plastico, questo è stato ricavato mediante prove di compressione ed è visibile nella Figura 6.8.

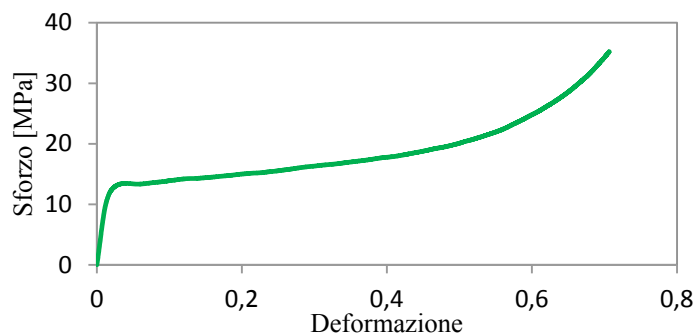


Figura 6. 8: Curva che caratterizza il comportamento plastico della schiuma. [1]

In **Appendice 2** si riporta il procedimento eseguito da Villa [1] per la caratterizzazione della schiuma.

6.3 Risultati delle simulazioni nei due scenari e confronto con le prove sperimentali

I risultati ottenuti dalle sette simulazioni eseguite per i due contesti analizzati vengono ora riportati e confrontati fra loro, paragonandoli inoltre ai risultati sperimentali già mostrati nel sottocapitolo 6.1.

6.3.1 Flessione di tubi in Fe 360

Per ciascun scenario di interesse sono state eseguite le tre simulazioni in corrispondenza delle tre condizioni sperimentali a disposizione:

- *Simulazione 1*: tubo con sezione a rombo di lato 20 mm e spessore 2 mm;
- *Simulazione 2*: tubo con sezione quadrata di lato 20 mm e spessore 2 mm;
- *Simulazione 3*: tubo con sezione tonda di diametro 27 mm e spessore 2.5 mm.

Nella Figura 6.9 segue l'andamento Forza–Deflessione per le *simulazioni 1* svolte per entrambi gli scenari analizzati, confrontato con quello medio ottenuto dalla corrispondente condizione sperimentale.

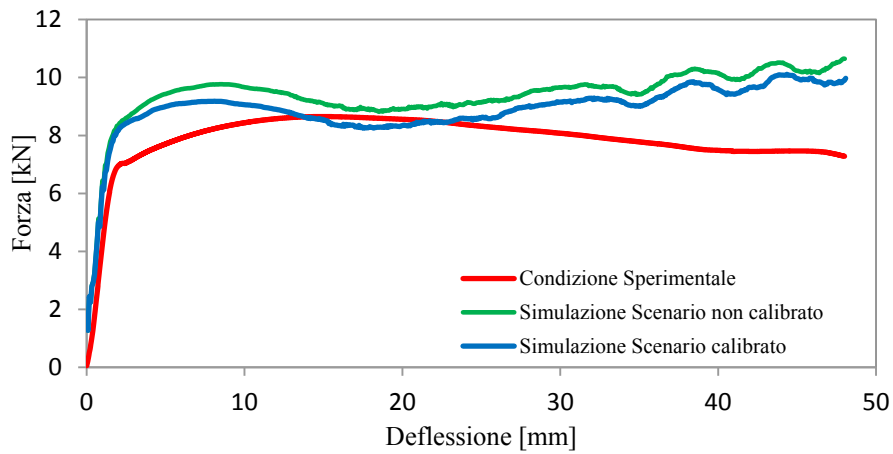


Figura 6. 9: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 1 e per le simulazioni 1 .

Come si può notare, per la curva ottenuta dalla simulazione dello scenario non calibrato vi è uno scostamento dalla curva sperimentale. Infatti si hanno differenze percentuali sui parametri utilizzati per il calcolo di Y'_{48} abbastanza elevate. Invece per la curva di simulazione ottenuta nello scenario calibrato, lo scostamento dalla curva sperimentale è inferiore, comportando differenze percentuali inferiori rispetto al caso precedente. A dimostrazione di questo, si riporta la Tabella 6.9 contenente i parametri calcolati e la differenza percentuale rispetto ai parametri derivanti dalle prove sperimentali.

Tabella 6. 9: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 1 e delle simulazioni 1, svolte per i due scenari.

	Cond.Sp. 1	Scenario non calibrato		Scenario calibrato	
		Sim. 1	Diff.%	Sim. 1	Diff.%
M [g]	295.25	295.43	-	295.25	-
W_m [mm]	28.28	28.28	-	28.28	-
P_{medio} [kN]	7.66	9.38	22.42	8.89	16.05
P_{max} [kN]	8.64	10.65	23.29	10.11	16.99
η	0.89	0.88	-1.08	0.88	-1.19
E_{abs} [kNmm]	367.83	450.13	22.37	426.68	16.00
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1245.11	1524.57	22.44	1445.16	16.07
Y_{48} [N/mmkg]	813.19	988.62	21.57	936.09	15.11
Y'_{48} [N/kg]	23000.60	27962.52	21.57	26476.72	15.11

Si nota come per lo scenario non calibrato, tutte le grandezze siano sovrastimate almeno del 20 %, ad eccezione dell'efficienza energetica, che sembra essere sottostimata. In particolare l'indice di performance Y'_{48} risulta essere sovrastimato dalla simulazione del 21.57%. Invece, nello scenario calibrato, le differenze percentuali tendono a diminuire, osservando una differenza percentuale su Y'_{48} del 15.11%.

Per quanto riguarda le *simulazioni 2* si è ricavato il seguente legame Forza-Deflessione (Figura 6.10).

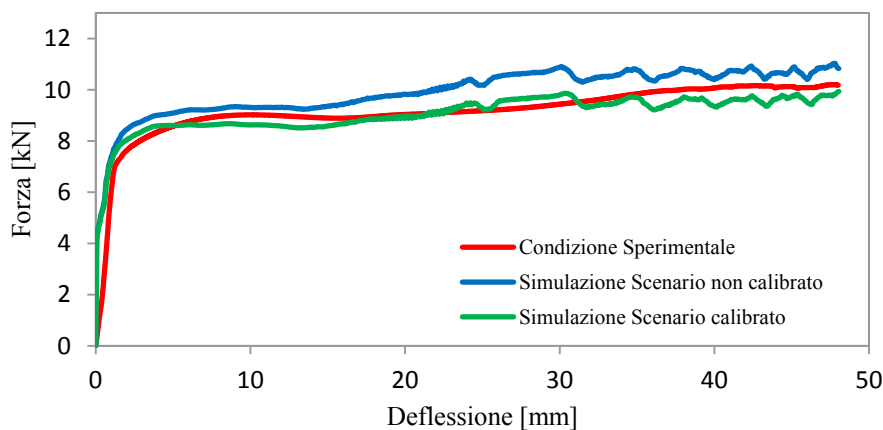


Figura 6. 10: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 2 e per le simulazioni 2.

Le curve ricavate dalla simulazione e dall'andamento medio della condizione sperimentale, per lo scenario non calibrato, risultano essere leggermente più distanti, rispetto a quanto accade nell'altro. Si riportano ora i parametri ottenuti con le rispettive differenze percentuali nella Tabella 6.10.

Per lo scenario non calibrato le differenze percentuali oscillano intorno al 11%, ad eccezione di quelle del carico massimo e dell'efficienza che sono inferiori. Il parametro Y'_{48} risulta essere sovrastimato dalla simulazione del 15.05%. Per quello calibrato invece, il carico medio della curva sperimentale viene sottostimato del 3.54%, mentre il carico massimo, l'energia di assorbimento e l'indice S.E.A. vengono sovrastimati circa dell'1.5%. La differenza percentuale del coefficiente Y'_{48} è positiva e pari al 6.46%, valore dimezzato rispetto a quello dell'altro scenario.

Tabella 6. 10: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 2 e delle simulazioni 2, svolte per i due scenari.

	Cond.Sp. 2	Scenario non calibrato		Scenario calibrato	
		Sim.2	Diff. %	Sim. 2	Diff. %
M [g]	283.26	283.26	-	283.26	-
W_m [mm]	20	20	-	20	-
P_{medio} [kN]	8.91	9.91	11.25	9.94	-3.54
P_{max} [kN]	10.30	11.03	7.13	10.05	1.55
η	0.87	0.90	3.26	0.91	4.67
E_{abs} [kNmm]	427.83	475.80	11.21	434.30	1.51
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1512.64	1679.92	11.06	1533.40	1.37
Y_{48} [N/mmkg]	1366.39	1572.03	15.05	1454.59	6.46
Y'_{48} [N/kg]	27327.71	31440.58	15.05	29091.88	6.46

Per quanto riguarda le *simulazioni 3*, invece, come già anticipato, non vi è alcuna differenza fra i due scenari analizzati. Di conseguenza, sono forniti gli stessi risultati sia nello scenario non calibrato, sia in quello calibrato. Infatti si nota una ottima coincidenza fra la curva sperimentale e quella di simulazione fino a 25 mm circa, mentre dopo le due curve incominciano a distaccarsi mostrando valori di forza maggiori per la simulazione (Figura 6.11)

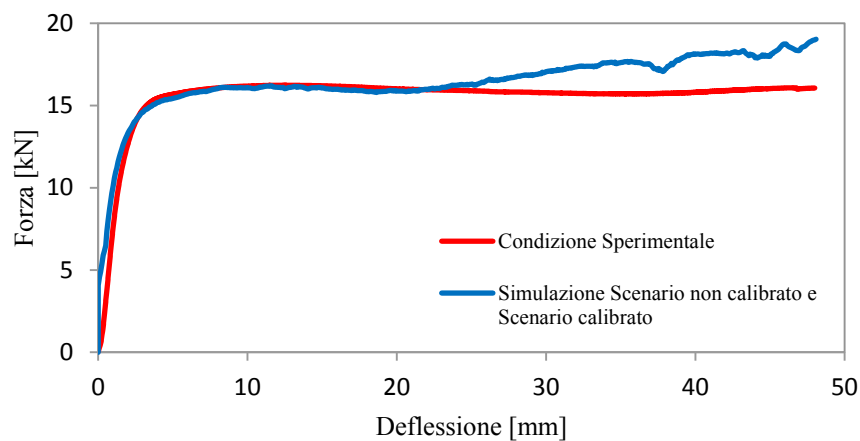


Figura 6. 11: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 3 e per le simulazioni 3.

Nella Tabella 6.11 si riportano alcuni parametri ricavati.

Tabella 6. 11: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 3 e della simulazione 3, valida per entrambi gli scenari.

	Cond.Sp. 3	Scenario calibrato e non calibrato	
		Sim. 3	Diff.%
M [g]	410.29	410.29	-
W_m [mm]	27	27	-
P_{medio} [kN]	15.24	16.40	7.61
P_{max} [kN]	16.49	19.03	15.42
η	0.92	0.86	-6.35
E_{abs} [kNmm]	731.47	787.16	7.61
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1782.53	1918.54	7.63
Y_{48} [N/mmkg]	1276.76	1275.46	- 0.10
Y'_{48} [N/kg]	34344.88	34310.00	- 0.10

Grazie alla buona stima della simulazione si è ricavato un valore di Y'_{48} molto prossimo a quello sperimentale, infatti la simulazione sottostima tale parametro soltanto dell'0.10%. Per quanto riguarda la forza media, l'efficienza energetica, l'energia assorbita e la $S.E.A.$ si hanno differenze percentuali attorno al 7%, mentre la forza massima raggiunge una sovrastima del 15%.

6.3.2 Flessione di tubi in DOCOL800DP

Nel caso di acciaio alto-resistenziale sono state effettuate le tre simulazioni delle prove sperimentali a disposizione, per entrambi gli scenari analizzati:

- *Simulazione 4*: tubo con sezione a rombo di lato 30 mm e spessore 1.5 mm;
- *Simulazione 5*: tubo con sezione quadrata di lato 30 mm e spessore 1.5 mm;
- *Simulazione 6*: tubo con sezione tonda di diametro 32 mm e spessore 2 mm.

Per le *simulazioni 4* e *5* si hanno i medesimi risultati per i due scenari, dal momento che coefficienti K e n sono uguali per entrambi.

Si riporta ora il grafico rappresentante il legame Forza-Deflessione della *simulazione 4* valida per entrambi scenari, confrontato con l'andamento ricavato dalla condizione sperimentale (Figura 6.12).

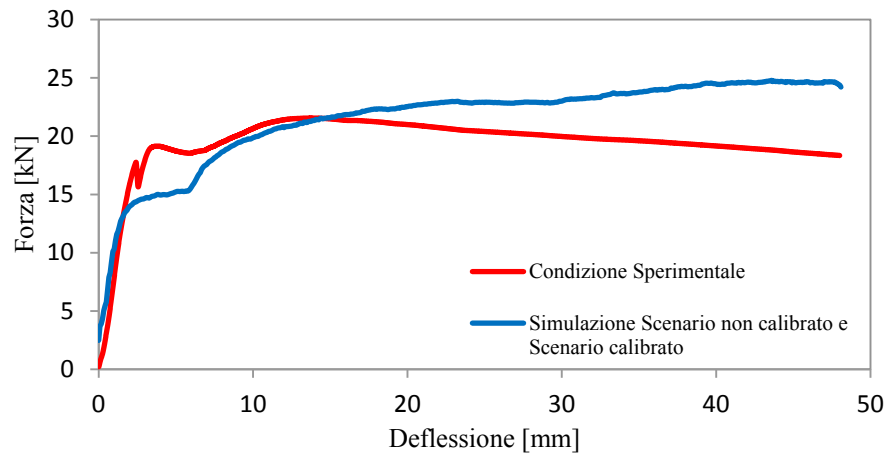


Figura 6. 12: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 4 e per le simulazioni 4.

Come si può notare la simulazione inizialmente sottostima la curva sperimentale, mentre dopo i 15 mm inizia a sovrastimarla. Dunque le due curve non risultano essere molto simili, come dimostrato nella Tabella 6.12.

Tabella 6. 12: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 4 e della simulazione 4, valida per entrambi gli scenari.

	Scenario calibrato e non calibrato		
	Cond.Sp. 4	Sim.4	Diff. %
$M [g]$	411.07	411.07	-
$W_m [mm]$	42.43	42.43	-
$P_{medio} [kN]$	18.83	21.46	13.95
$P_{max} [kN]$	22.04	24.78	12.45
η	0.85	0.87	1.86
$E_{abs} [kNmm]$	903.78	1029.96	13.96
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2197.90	2505.63	14.00
$Y_{48}[N/mmkg]$	923.44	1065.26	15.36
$Y'_{48}[N/kg]$	39178.20	45195.27	15.36

Si hanno sovrastime attorno al 13% di tutti i parametri, ad eccezione dell'efficienza energetica. Il coefficiente Y'_{48} risulta essere sovrastimato del 15.36%. Tuttavia non sono stati ricavati valori di K e n in grado di diminuire questa differenza percentuale dal momento che nella *simulazione 5* (sezione

quadrata) i valori considerati comportano differenze percentuali molto basse su Y'_{48} .

Per quanto riguarda le *simulazioni 5* si è ricavato un andamento più coerente fra simulazione e prove sperimentali (Figura 6.13).

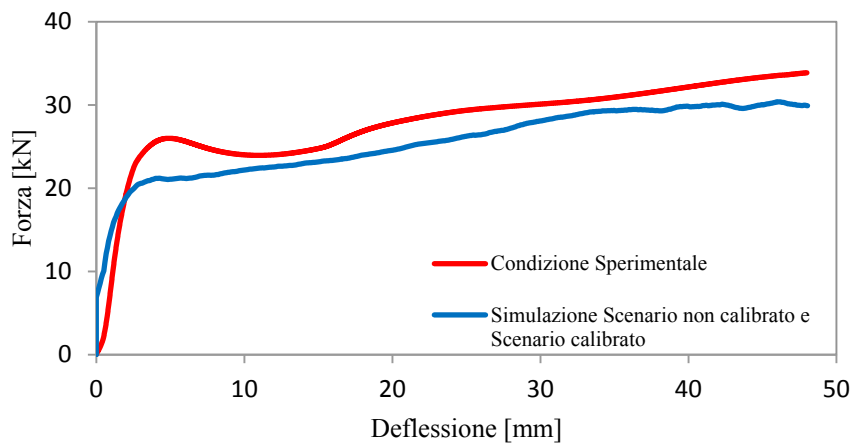


Figura 6. 13: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 5 e per le simulazioni 5.

Tabella 6. 13: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 5 e della simulazione 5, valida per entrambi gli scenari.

	Cond.Sp. 5	Scenario calibrato e non calibrato	
		Sim. 5	Diff. %
M [g]	422.54	422,54	-
W_m [mm]	30	30	-
P_{medio} [kN]	26.97	25.47	-5.58
P_{max} [kN]	33.86	30.39	-10.25
η	0.80	0.84	4.75
E_{abs} [kNmm]	1294.69	1222.34	-5.59
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	3063.72	2892.91	-5.58
Y_{48} [N/mmkg]	1695.40	1683.44	-0.71
Y'_{48} [N/kg]	50862.09	50503.31	-0.71

Le due curve hanno un andamento molto simile, ma la simulazione tende a sottostimare leggermente le prove sperimentali, essendo traslata leggermente più in basso. Tuttavia, come si può vedere nella tabella, le differenze percentuali

sono basse, attorno al 5%. Inoltre il coefficiente Y'_{48} della simulazione è molto prossimo a quello sperimentale, comportando una differenza percentuale minima dello 0.71% (Tabella 6.13).

Per le *simulazioni 6*, invece, si hanno curve di simulazione differenti a seconda del caso analizzato. Per lo scenario non calibrato, il legame Forza-Deflessione ricavato dalla simulazione è molto vicino a quello sperimentale fino a 10 mm, mentre dopo la simulazione tende a sovrastimare leggermente la prova sperimentale. Per l'altro scenario invece, le due curve sono vicine lungo tutto lo spostamento (Figura 6.14).

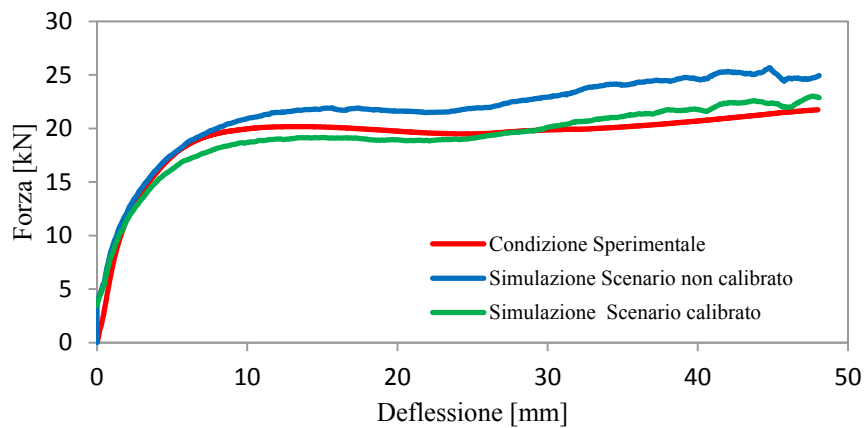


Figura 6. 14: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 6 e per le simulazioni 6.

Tabella 6. 14: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 6 e delle simulazioni 6, svolte per i due scenari.

	Cond.Sp. 6	Scenario non calibrato		Scenario calibrato	
		Sim. 6	Diff. %	Sim. 6	Diff. %
M [g]	416.84	416.84	-	416.84	-
W_m [mm]	32	32	-	32	-
P_{medio} [kN]	18.66	21.6	15.75	12	2.63
P_{max} [kN]	22.32	25.69	15.08	23.03	3.18
η	0.84	0.84	0.11	0.83	-1.00
E_{abs} [kNmm]	895.58	1036.77	15.77	919.28	2.65
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2148.04	2487.27	15.79	2205.40	2.67
Y_{48} [N/mmkg]	1171.08	1361.68	16.28	1194.05	1.96
Y'_{48} [N/kg]	37474.71	43573.80	16.28	38209.45	1.96

Dunque per lo scenario non calibrato si hanno differenze percentuali prossime al 15% per tutti i parametri, ad eccezione dell'efficienza energetica (0.11%), in particolare il coefficiente Y'_{48} risulta dunque sovrastimato del 16.28%. Mentre per lo scenario calibrato, le differenze percentuali diminuiscono notevolmente, in particolare quella su Y'_{48} che diventa 1.96% (Tabella 6.14).

6.3.3 Flessione di tubi in AISI 304

Nel caso di acciaio inossidabile sono state effettuate le due simulazioni dei due scenari in corrispondenza dell'unica condizione sperimentale a disposizione:

- *Simulazione 7*: tubo con sezione tonda di diametro 25 mm e spessore 1.5 mm.

Per questa simulazione si è verificato lo scostamento maggiore fra simulazione e prove sperimentali, come mostrato nella Figura 6.15. Nello scenario non calibrato i risultati di questa simulazione hanno fornito un andamento del legame Forza–Deflessione non vicino a quello ricavato dalle prove sperimentali, soprattutto nella prima parte. Nell'altro scenario si è cercato di utilizzare valori di K e n in grado di avvicinare le due curve.

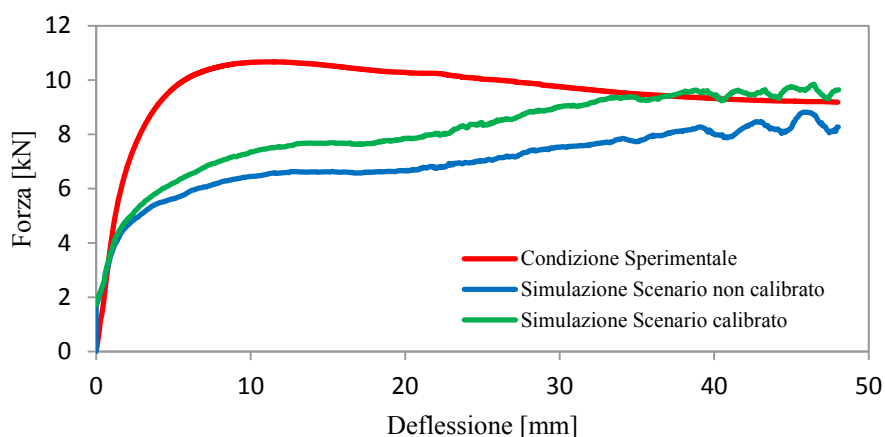


Figura 6. 15: Confronto legame Forza-Deflessione per la condizione sperimentale 7 e per le simulazioni 7.

Sotto, nella Tabella 6.15, vengono riportati i valori dei parametri ricavati dalla simulazione.

Tabella 6. 15: Confronto fra i risultati medi della condizione sperimentale 7 e delle simulazioni 7, svolte per i due scenari.

	Cond.Sp. 7	Scenario non calibrato		Scenario calibrato	
		Sim. 7	Diff. %	Sim. 7	Diff. %
M [g]	247.39	247.39	-	247,39	-
W_m [mm]	25	25	-	25	-
P_{medio} [kN]	9.31	6.97	-25.16	8.08	-13.17
P_{max} [kN]	10.68	8.82	-17.43	9.85	-7.77
η	0.87	0.79	-9.18	0.82	-5.67
E_{abs} [kNmm]	446.94	334.47	-25.17	388.02	-13.18
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1806.40	1350.61	-25.23	1566.86	-13.26
Y_{48} [N/mmkg]	1313.08	889.29	-32.27	1071.58	-18.39
Y'_{48} [N/kg]	32827.03	22232.36	-32.27	26789.46	-18.39

È ben visibile come le differenze percentuali per il primo scenario analizzato siano alte: per la forza media, l'energia assorbita e il $S.E.A.$ si ha una sottostima attorno al 25%, per la forza massima una sottostima del 17.43%, mentre per l'efficienza del 9.18%. La differenza percentuale massima si ha per la stima del coefficiente Y'_{48} , in cui la sottostima raggiunge il 32.27%. Per il secondo scenario analizzato, invece, le differenze percentuali diminuiscono fino quasi a dimezzarsi, ma il coefficiente Y'_{48} risulta ancora essere sottostimato dalla simulazione del 18.39%.

Capitolo 7

Ottimizzazione dello scenario di simulazione non calibrato

Lo scopo di questo capitolo è ottimizzare lo scenario di simulazione non calibrato, introdotto nel Capitolo 6. Nella prima parte si determina, con l'ausilio del metodo statistico del *Latin Hypercube*, il “*Design of experiments*” da eseguire mediante il software di simulazione, come già anticipato nel Capitolo 4.2, per ottenere un totale di 20 punti di simulazione. Nella seconda parte, invece, si riportano i risultati di simulazione ottenuti, per poi procedere con l'ottimizzazione non vincolata del metamodello nella parte finale.

7.1 Determinazione del “*Design of experiments*”

Attraverso il metodo statistico del *Latin Hypercube*, è stato determinato un piano di altre 13 simulazioni da svolgere in aggiunta alle sette già presenti e discusse nel Capitolo 6.

Come già preannunciato, delle 13 nuove simulazioni, il metodo fornisce soltanto i valori delle due variabili indipendenti x_1 e x_2 , ossia il rapporto fra momento d'inerzia e l'ingombro (J/W_m) e la Tenacità del materiale (W/V).

Una volta note le 13 coppie di valori, sono state ricavati:

- La forma e le dimensioni caratteristiche delle sezioni dei tubi, tali da permettere una differenza percentuale minima fra il J/W_m fornito dal metodo statistico e quello ottenuto realmente dalla geometria scelta;
- I materiali adatti, tali da avere una differenza percentuale minima fra la tenacità fornita dal metodo e quella ricavata effettivamente dai materiali scelti.

Si riportano nella Tabella 7.1, i valori di J/W_m e W/V delle sette simulazioni già svolte (*Simulazioni 1-7*), uniti ai 13 suggeriti determinati dal metodo statistico (*Simulazioni 8-20*).

Come si può notare le *simulazioni 8, 9 e 10* hanno valori di J/W_m e W/V già utilizzati nelle prime sette simulazioni. Dunque per queste tre simulazioni, in realtà è sufficiente utilizzare i corrispondenti materiali e le corrispondenti geometrie già usati precedentemente.

Tabella 7. 1: Coppie di valori di J/W_m e W/V per lo scenario di simulazione non calibrato.

Simulazione	J/W_m [mm^3]	W/V [MPa]
1	278.32	72.65
2	393.60	72.65
3	535.74	72.65
4	547.14	107.38
5	773.78	107.38
6	665.62	107.38
7	307.03	153.66
8	773.78	72.65
9	278.32	153.66
10	773.78	153.66
11	789.68	118.31
12	554.79	138.43
13	583.37	70.22
14	733.03	143.11
15	468.28	83.83
16	674.59	90.96
17	264.84	128.00
18	316.41	102.45
19	387.98	154.80
20	524.48	110.51

Di seguito si procede con la scelta delle tipologie di sezione e dei materiali, partendo dai valori riportati in tabella 7.1

7.1.1 Scelta delle geometrie

Ora si procede con la scelta della forma e delle dimensioni delle sezioni dei tubi delle 13 nuove simulazioni. Come detto in precedenza, la scelta delle forme è limitata alla sezione tonda, quadrata e romboidale equilatera.

Per la valutazione delle caratteristiche geometriche adatte ai singoli casi, è stato utilizzato il *Risolutore di Microsoft Excel*. Nella colonna J/W_m *predetto* sono elencati i valori scelti dal metodo del *Latin Hypercube*, invece, nella colonna J/W_m *ottenuto* sono elencati i valori realmente ottenuti con la geometria scelta.

Tabella 7. 2: Forme e dimensioni delle 13 geometrie scelte.

Sim.	Forma	Dimensioni		J/W_m ottenuto [mm ³]	J/W_m predetto [mm ³]	Diff % su J/W_m
		Lato o Diametro [mm]	Spessore [mm]			
8	Quadrata	30	1.5	773.78	773.78	-
9	Rombo	20	2	278.32	278.32	-
10	Quadrata	30	1.5	773.78	773.78	-
11	Quadrata	32	1.3	785.05	789.68	-0.59
12	Tonda	39	1	552.90	554.79	-0.34
13	Quadrata	31	1	581.29	583.37	-0.36
14	Rombo	27	3	735.39	733.03	0.32
15	Tonda	24	3	463.88	468.28	-0.94
16	Tonda	36	1.5	673.17	674.59	-0.21
17	Quadrata	16	2.5	265.08	264.84	0.09
18	Tonda	23	2	319.11	316.41	0.85
19	Quadrata	18	3	390.00	387.98	0.52
20	Tonda	28	2.15	524.46	524.48	-0.0035

Le simulazioni 8 e 10 presentano dunque, un valore di J/W_m predetto uguale a quello della simulazione 5, mentre la simulazione 9 presenta un valore uguale alla simulazione 1. Di conseguenza per queste tre simulazioni, le geometrie scelte saranno le stesse delle simulazioni già svolte.

7.1.2 Scelta dei materiali

Per quanto riguarda la scelta del materiale è stato utilizzato il software *Ces EduPac 2012*. Per selezionare il materiale più adatto, è stata eseguita nel programma una ricerca vincolata. I tre vincoli imposti sono stati:

- Tipologia di materiale: Acciaio
- Valori minimi e massimi di allungamento percentuale $A\%$, scegliendo un intervallo compreso fra il 10% e il 55%
- Valori minimi e massimi del carico di rottura R_m , che però variano da caso a caso in funzione del valore di tenacità considerato. Infatti sono stati determinati nel seguente modo (7.1).

$$R_{m,\min} = \frac{W}{V} \cdot \frac{(n_{\max} + 1)}{n_{\max}} \quad \text{con} \quad n_{\max} = \ln \left(1 + \frac{A_{\max}}{100} \right) \quad (7.1)$$

$$R_{m,\max} = \frac{W}{V} \cdot \frac{(n_{\min} + 1)}{n_{\min}} \quad \text{con} \quad n_{\min} = \ln \left(1 + \frac{A_{\min}}{100} \right)$$

Una volta selezionati i materiali idonei a questi tre requisiti, sono state calcolate le rispettive tenacità, utilizzando come valori di A % e R_m quelli intermedi fra i valori massimi e minimi forniti dal *Ces*. Successivamente, si è scelto il materiale con la differenza percentuale di tenacità ottenuta minore rispetto a quella predetta dal metodo.

I risultati ottenuti sono:

Tabella 7. 3: Materiali scelti.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>W/V ottenuto [MPa]</i>	<i>W/V predetto [MPa]</i>	<i>Diff % su W/V</i>
8	Fe 360	72.65	72.65	-
9	AISI 304	153.66	153.66	-
10	AISI 304	153.66	153.66	-
11	AISI 4320	117.72	118.31	-0.50
12	AISI 310	137.58	138.43	-0.61
13	AISI 446	70.69	70.22	0.67
14	AISI 316	143.00	143.11	-0.08
15	AISI 403	84.81	83.83	1.68
16	AISI 436	90.90	90.96	-0.06
17	AISI 1340	127.70	128.00	0.59
18	AISI 1118	102.88	102.45	0.42
19	AISI 303	157.94	154.80	2.03
20	AISI 4130	110.87	110.51	0.33

Anche per quanto riguarda i materiali, tre simulazioni presentano valori di tenacità uguali a quelli di alcune simulazioni iniziali. La *simulazione 8*, infatti presenta un valore di *W/V predetto* uguale a quello delle *simulazioni 1, 2 e 3*, mentre le *simulazioni 9 e 10* presentano un valore uguale alla *simulazione 7*.

Per ciascun materiale usato, dunque, è stato necessario ricavare i valori dei parametri principali d'interesse da inserire nel software di simulazione. Per questo scopo è stato utilizzato di nuovo *Ces*. Questo fornisce un valore minimo

e un valore massimo per ciascun parametro di interesse (ρ , E , ν , R_m , A %). I valori scelti, pertanto, corrispondono ai loro valori medi.

I materiali selezionati possono appartenere a tre gruppi: gli *acciai basso-legati*, gli *acciai al carbonio* e gli *acciai inossidabili*.

Gli *acciai basso-legati*, insieme a quelli alto-legati, appartengono alla categoria degli acciai legati, particolari acciai in cui sono presenti altri elementi, oltre il ferro e il carbonio, in percentuali uguali o maggiori di quelle riportate dalla norma UNI EN 10020, al fine di migliorarne le caratteristiche chimico-fisiche. La caratteristica che differenzia i basso-legati è che nessun elemento presente nella composizione supera il 5%.

Gli *acciai al carbonio*, invece, sono acciai non-legati. Questi presentano una percentuale di carbonio compresa fra 0.6% e 1.4% e gli altri elementi presenti non superano i valori descritti nella norma UNI EN 10020.

Gli *acciai inossidabili*, poi, sono leghe a base di ferro e carbonio che uniscono alle proprietà meccaniche tipiche degli acciai al carbonio, caratteristiche peculiari di resistenza alla corrosione. Si suddividono in più classi: acciai austenitici, ferritici e martensitici. Gli acciai ferritici sono acciai al solo cromo, la cui percentuale può variare fra l'11% e il 30% circa, e che presentano una buona resistenza meccanica ed alla corrosione. Gli acciai austenitici, invece, contengono Nickel e Cromo in percentuale tale da conservare la struttura austenitica anche a temperatura ambiente. I martensitici, poi, sono leghe al cromo (contenuto in percentuali comprese fra l'11 e il 18% circa) con un contenuto di carbonio relativamente elevato e di piccole quantità di altri elementi, come manganese, silicio, cromo e molibdeno. Hanno poi il vantaggio di possedere caratteristiche meccaniche molto elevate.

Si riportano le principali caratteristiche dei materiali scelti. In **Appendice 3**, si riportano le composizioni chimiche dei materiali.

- *Acciaio basso-legati*: AISI 4320 e AISI 4130.

Tabella 7. 4: Caratteristiche AISI 4320 e AISI 4130.

<i>Acciaio</i>	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
AISI 4320	7.85	207000	0.29	580	425	29	821.68	0.26	117.72
AISI 4130	7.85	208000	0.29	560	360	28	790.98	0.25	110.87

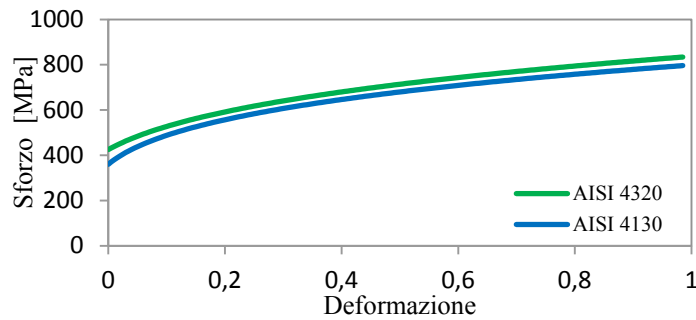


Figura 7. 1: Curve di incrudimento AISI 4320 e AISI 4130.

- *Acciai inossidabili*: a loro volta si suddividono in austenitici, ferritici e martensitici. Gli AISI 310, AISI 316, AISI 303 sono austenitici, gli AISI 446 e AISI 436 sono ferritici, mentre l'AISI 403 è martensitico.

Tabella 7. 5: Caratteristiche AISI 310, AISI 446, AISI 316, AISI 403, AISI 436, AISI 303 .

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
AISI 310	8.00	200000	0.27	560	260	38.5	806.98	0.33	137.58
AISI 446	7.5	200000	0.28	547	315	16	726.03	0.15	70.69
AISI 316	8.00	197000	0.27	568	260	40	819.44	0.34	143.00
AISI 403	7.70	200000	0.28	550	397	20	750.12	0.18	84.81
AISI 436	7.80	200000	0.28	530	365	23	734.30	0.21	90.90
AISI 303	7.95	196000	0.28	583	240	45	842.23	0.37	157.94

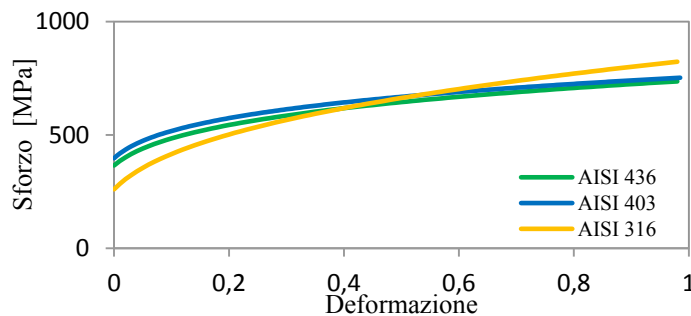


Figura 7. 2: Curve d'incrudimento AISI 436, AISI 403, AISI 316.

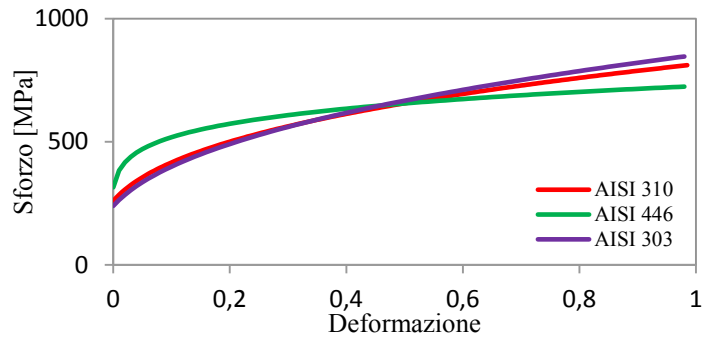


Figura 7. 3: Curve d'incrudimento AISI 310, AISI 446, AISI 303.

- *Acciai al carbonio: AISI 1340, AISI 1118.*

Tabella 7. 6: Caratteristiche AISI 1340, AISI 1118.

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
AISI 1340	7.85	207000	0.29	700	487	25	978.27	0.22	127.70
AISI 1118	7.85	210000	0.29	450	285	34.5	645.28	0.30	102.88

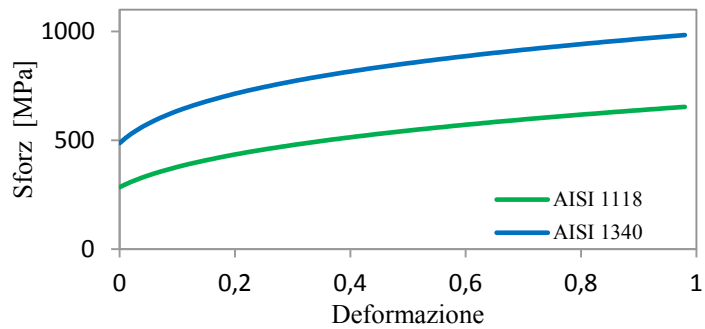


Figura 7. 4: Curve d'incrudimento AISI 1340, AISI 1118.

7.2 Risultati delle nuove simulazioni

Una volta individuate le caratteristiche delle 13 nuove configurazioni da testare, sono state svolte le rispettive simulazioni. Nella Tabella 7.7, si riporta un riassunto delle 13 configurazioni usate, mostrando i materiali e le caratteristiche geometriche scelti.

Tabella 7. 7: Riassunto delle caratteristiche delle 13 simulazioni svolte.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>W/V</i> [MPa]	<i>Sezione</i>	<i>J/W_m</i> [mm ³]
8	Fe 360	72.65	<i>Quadrata</i> 30x30x1.5 [mm ³]	773.78
9	AISI 304	153.66	<i>Rombo</i> 20x20x2 [mm ³]	278.32
10	AISI 304	153.66	<i>Quadrata</i> 30x30x1.5 [mm ³]	773.78
11	AISI 4320	117.72	<i>Quadrata</i> 32x32x1.3 [mm ³]	785.05
12	AISI 310	137.58	<i>Tonda</i> 39x1 [mm ²]	552.90
13	AISI 446	70.69	<i>Quadrata</i> 31x31x1 [mm ³]	581.29
14	AISI 316	143.00	<i>Rombo</i> 27x27x3 [mm ³]	735.39
15	AISI 403	84.81	<i>Tonda</i> 24x3 [mm ²]	463.88
16	AISI 436	90.90	<i>Tonda</i> 36x1.5 [mm ²]	673.17
17	AISI 1340	127.70	<i>Quadrata</i> 16x16x2.5 [mm ³]	265.08
18	AISI 1118	102.88	<i>Tonda</i> 23x2 [mm ²]	319.11
19	AISI 303	157.94	<i>Quadrata</i> 18x18x3 [mm ³]	390.00
20	AISI 4130	110.87	<i>Tonda</i> 28x2.15 [mm ²]	524.46

I risultati vengono ora sotto riportati, andando a raggruppare le simulazioni con la stessa forma della sezione.

Per la geometria quadrata sono state svolte sei simulazioni che ora vengono suddivise in due gruppi. Nel primo gruppo sono riportate le *simulazioni 8, 10, 11*, aventi le seguenti caratteristiche:

- *Simulazioni 8*: tubo in acciaio Fe 360 con sezione quadrata di lato 20 mm e spessore 2 mm.
- *Simulazione 10*: tubo in acciaio AISI 304 con sezione quadrata di lato 30 mm e spessore 1.5 mm.
- *Simulazione 11*: tubo in acciaio AISI 4320 con sezione quadrata di lato 32 mm e spessore 1.3 mm.

Le curve Forza-Deflessione e i parametri d'interesse vengono riportati rispettivamente in Figura 7.5 e nella Tabella 7.8.

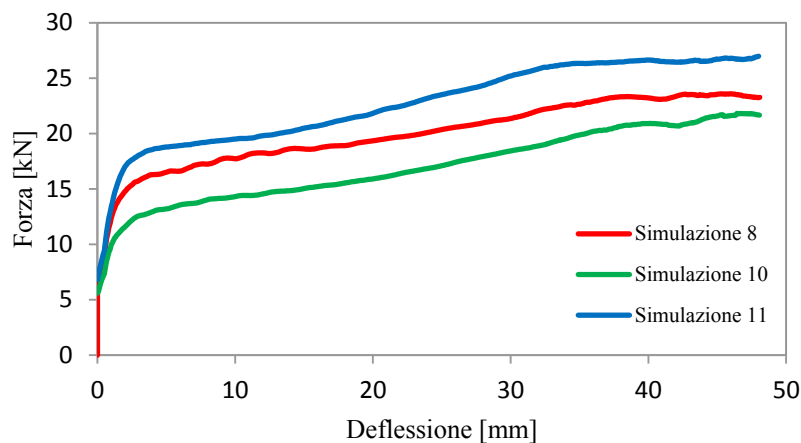


Figura 7. 5: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 8, 10, 11.

Tabella 7. 8: Risultati delle simulazioni 8, 10, 11.

	<i>Simulazione 8</i>	<i>Simulazione 10</i>	<i>Simulazione 11</i>
$M [g]$	419.68	425.42	415.89
$Wm [mm]$	20	30	32
$P_{med} [kN]$	20.01	16.98	22.70
$P_{max} [kN]$	23.59	21.82	26.98
η	0.85	0.78	0.84
$E_{abs} [kNmm]$	960.31	815.05	1089.81
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2288.20	1915.87	2620.41
$Y_{48} [N/mmkg]$	1347.45	1035.16	1435.42
$Y'_{48} [N/kg]$	40423.56	31054.87	45933.50

Nel secondo gruppo vi sono le *simulazioni 13, 17, 19*, le cui curve Forza-Deflessione sono riportate in Figura 7.6, mentre i parametri d'interesse nella Tabella 7.9.

- *Simulazione 13*: tubo in acciaio AISI 446 con sezione quadrata di lato 31 mm e spessore 1 mm.
- *Simulazione 17*: tubo in acciaio AISI 1340 con sezione quadrata di lato 16 mm e spessore 2.5 mm.
- *Simulazione 19*: tubo in acciaio AISI 303 con sezione quadrata di lato 18 mm e spessore 3 mm.

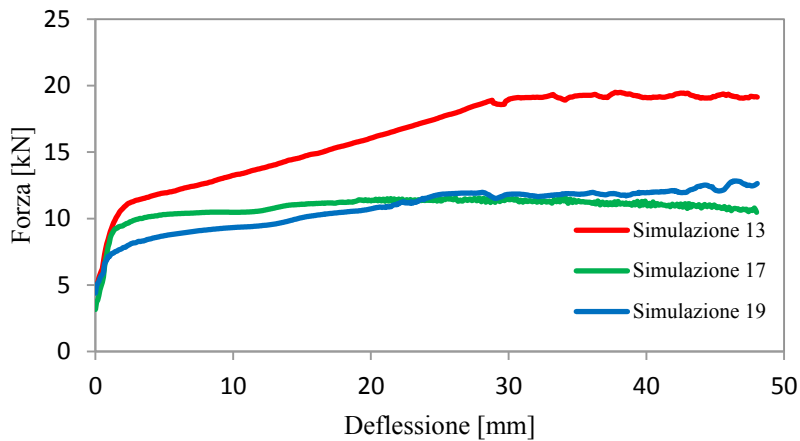


Figura 7. 6: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 13, 17, 19.

Tabella 7. 9: Risultati delle simulazioni 13, 17, 19.

	<i>Simulazione 13</i>	<i>Simulazione 17</i>	<i>Simulazione 19</i>
$M [g]$	328.02	270.46	362.62
$Wm [mm]$	31	16	18
$P_{med} [kN]$	16.30	10.83	10.74
$P_{max} [kN]$	19.50	11.60	12.84
η	0.84	0.93	0.84
$E_{abs} [kNmm]$	782.21	519.70	515.36
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2384.62	1921.55	1421.21
$Y_{48}[N/mmkg]$	1339.41	2335.27	1375.81
$Y'_{48}[N/kg]$	41521.76	37364.20	24764.54

Considerando una geometria della sezione del tubo quadrata, il risultato migliore è dato dalla *simulazione 11*, dal momento che presenta un valore di Y'_{48} pari a 45933.50 N/kg. Questa configurazione, in acciaio AISI 4230, ha dimensioni abbastanza elevate ($32 \times 32 \times 1.3 \text{ mm}^3$), ma uno spessore del tubo ridotto e fornisce risultati concordi a quanto si verificava nella *Simulazione 5* del primo scenario

di simulazione (Capitolo 6). Risultati leggermente inferiori ma simili, sono stati ottenuti anche dalle *simulazioni 8*, in Fe 360, e *13*, in AISI 446, che considerano una sezione di dimensioni rispettivamente $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ e $31 \times 31 \times 1 \text{ mm}^3$. I risultati dell'indice di performance, in questi casi è concorde con quelli del parametro *S.E.A.*, che mostra valori superiori a 2200 kNmmkg^{-1} . I risultati peggiori, invece, sono stati ricavati con l'utilizzo di acciai inossidabili (*Simulazioni 10 e 19*).

Per la geometria romboidale, invece, sono state svolte le *simulazioni 9 e 14*, che considerano entrambe come materiali acciai inossidabili :

- *Simulazione 9*: tubo in acciaio AISI 304 con sezione romboidale di lato 20 mm e spessore 2 mm.
- *Simulazione 14*: tubo in acciaio AISI 316 con sezione romboidale di lato 27 mm e spessore 3 mm.

Nella Figura 7.7 si mostrano le curve Forza-Deflessione, mentre, nella Tabella 7.10, i parametri d'interesse.

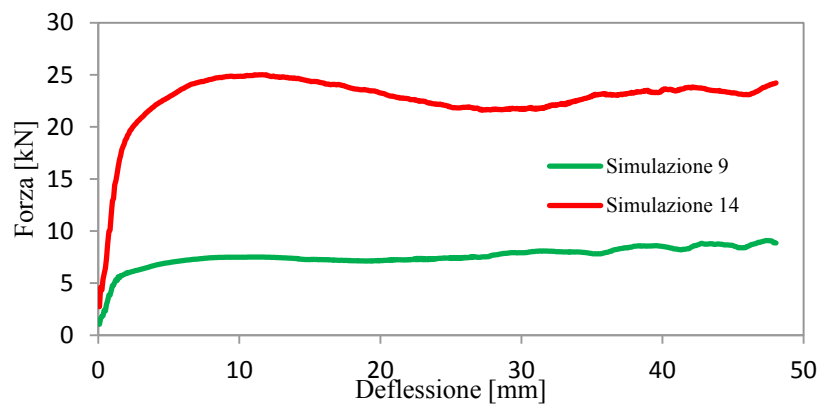


Figura 7. 7: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 9, 14.

Tabella 7. 10: Risultati delle simulazioni 9 e 14.

	<i>Simulazione 9</i>	<i>Simulazione 14</i>
M [g]	310.58	611.70
Wm [mm]	28.28	38.18
P_{med} [kN]	7.55	22.67
P_{max} [kN]	9.09	25.02
η	0.83	0.91
E_{abs} [kNmm]	362.31	1088.04
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	1166.57	1778.71
Y_{48} [N/mmkg]	713.83	879.39
Y'_{48} [N/kg]	20190.21	33578.51

In generale le simulazioni a rombo, qualsiasi sia il materiale usato, non hanno fornito risultati concordi alle aspettative poste nel Capitolo 4.1.2. Sono stati ottenuti, infatti valori di Y'_{48} relativamente bassi, in particolar modo per sezioni di dimensioni minori (*Simulazione 9*), indipendentemente dal materiale usato. Infatti anche dalla Figura 7.7, si vede che l'area sottesa dalla curva per la simulazione 9 è circa la metà di quella dell'altra simulazione.

Per la geometria tonda sono state eseguite cinque simulazioni.

Nel primo gruppo si osservano i risultati delle *simulazioni 12 e 15*, entrambe effettuate con tubi in acciaio inox:

- *Simulazione 12*: tubo in acciaio AISI 310 con sezione tonda di diametro 39 mm e spessore 1 mm.
- *Simulazione 15*: barra in acciaio AISI 403 a sezione tonda di diametro 24 mm e spessore 3 mm.

Nella Figura 7.8 si mostrano le curve Forza-Deflessione, mentre, nella Tabella 7.11, i parametri d'interesse.

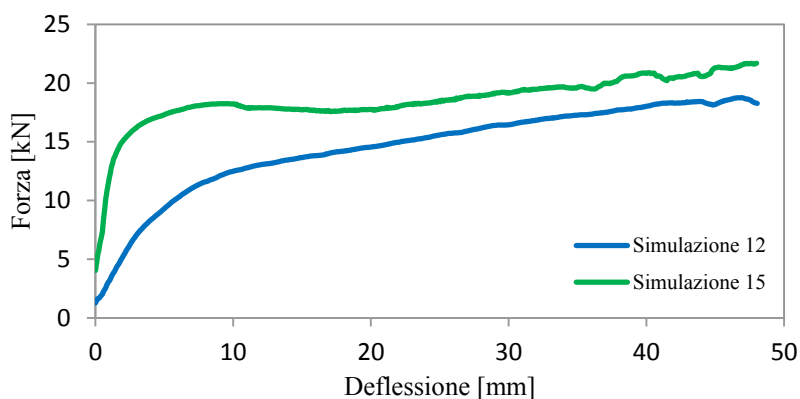


Figura 7. 8: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 12 e 15.

Tabella 7. 11: Risultati delle simulazioni 9 e 14.

	<i>Simulazione 12</i>	<i>Simulazione 15</i>
$M [g]$	372.43	399.65
$Wm [mm]$	39	24
$P_{med} [kN]$	14.49	18.52
$P_{max} [kN]$	18.76	21.69
η	0.77	0.85
$E_{abs} [kNmm]$	695.46	888.73
$S.E.A. [kNmm/kg]$	1867.35	2223.77
$Y_{48}[N/mmkg]$	770.46	1647.70
$Y'_{48}[N/kg]$	30047.82	39544.69

Nel secondo gruppo vi sono le *simulazioni 16, 18 e 20*:

- *Simulazione 16*: tubo in acciaio AISI 436 con sezione tonda di diametro 36 mm e spessore 1.5 mm.
- *Simulazione 18*: tubo in acciaio AISI 1118 con sezione tonda di diametro 23 mm e spessore 2 mm.
- *Simulazione 20*: tubo in acciaio AISI 4130 con sezione tonda di diametro 28 mm e spessore 2.15 mm.

Le curve Forza-Deflessione e i parametri d'interesse vengono riportati rispettivamente in Figura 7.9 e nella Tabella 7.12:

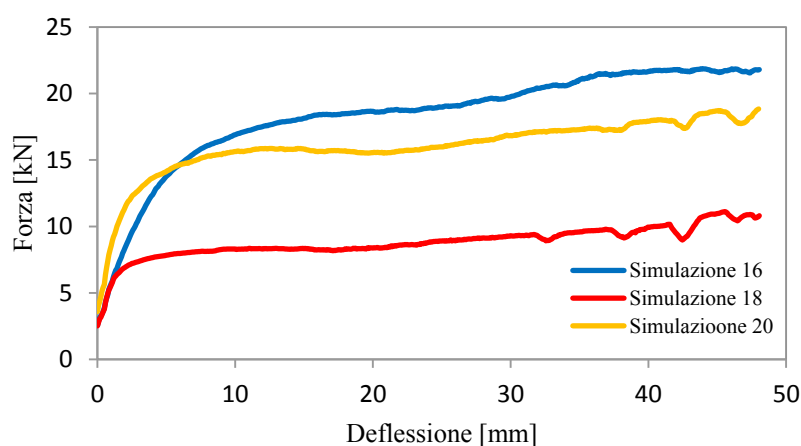


Figura 7. 9: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 16, 18 e 20.

Tabella 7. 12: Risultati delle simulazioni 16, 18 e 20.

	<i>Simulazione 16</i>	<i>Simulazione 18</i>	<i>Simulazione 20</i>
$M [g]$	418.27	286.35	387.71
$Wm [mm]$	36	23	18
$P_{med} [kN]$	18.28	8.80	15.96
$P_{max} [kN]$	21.88	11.12	18.84
η	0.84	0.79	0.85
$E_{abs} [kNmm]$	877.22	422.19	766.18
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2097.26	1474.35	1976.16
$Y_{48}[N/mmkg]$	1013.88	1055.88	1245.73
$Y'_{48}[N/kg]$	36499.84	24285.33	34880.49

Nelle simulazioni svolte considerando una sezione tonda, accoppiate con i tipi di acciai usati, non si riescono ad ottenere valori maggiori dell'indice di performance rispetto alle *simulazione 11* (Quadrata $32 \times 32 \times 1.3 \text{ mm}^3$, AISI 4320) e alla *simulazione 5* ($30 \times 30 \times 1.5 \text{ mm}^3$, DOCOL800DP). Tuttavia, la configurazione a sezione tonda migliore è quella della *simulazione 15* ($36 \times 1.5 \text{ mm}^2$), che mostra un Y'_{48} pari a 39544.69 N/kg e una *S.E.A.* di 2223 kNmmkg^{-1} . In generale si ottengono comunque risultati migliori rispetto alle simulazioni a geometria romboidale.

7.3 Ottimizzazione

Una volta noti i risultati di tutte le 20 simulazioni svolte, si è proseguito con l'implementazione del *Metamodello Fusion* e la sua ottimizzazione, attraverso il procedimento riportato nel Capitolo 3.3. Inizialmente si riporta la superficie di previsione ottenuta dal metamodello, mentre poi, si procede con l'effettiva ottimizzazione.

Per l'implementazione del metamodello, come già illustrato, sono stati usati i seguenti set di dati:

- Le 27 prove sperimentali di Villa [1] (Set di dati ad “Alta Risoluzione”)
- Le 20 simulazioni svolte, comprendenti le sette delle condizioni sperimentali e le 13 ottenute dal *D.O.E.* appena ricavato (Set di dati ad “Bassa Risoluzione”).

La superficie di previsione ricavata è riportata nella Figura 7.10.

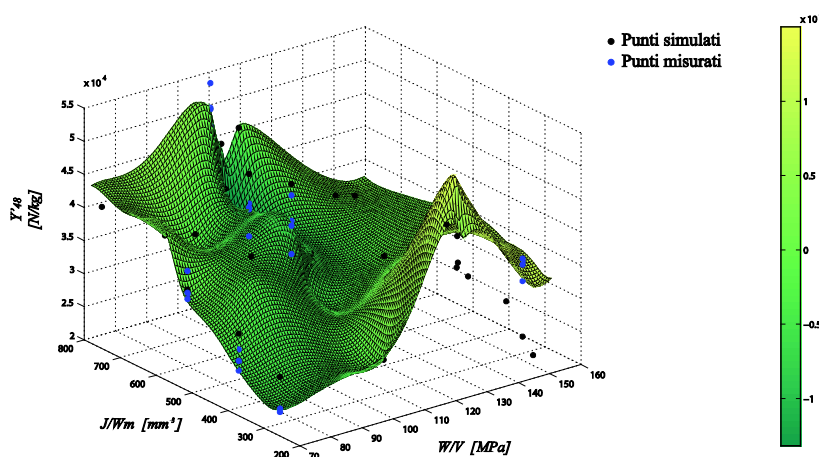


Figura 7. 10: Superficie di previsione del metamodello per lo scenario non calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.

La *colormap*, come riportato in didascalia, riportata mostra la differenza che vi è in ogni punto del piano delle variabili di progetto fra la curva ricavata con il set di punti ad “Alta Risoluzione” e quella ricavata con il set di punti a “Bassa Risoluzione”. Si nota come tale differenza oscilla da un valore minimo di circa $-1.5 \cdot 10^4$ a un valore massimo di $1.5 \cdot 10^4$. La zona in cui tale differenza sembra essere massima corrisponde a valori di tenacità compresi fra 120 MPa e 140 MPa e valori J/W_m compresi fra 250 mm^3 e 300 mm^3 .

Prima di arrivare alla determinazione del risultato ottimo finale, l’algoritmo EGO (Capitolo 3.3) ha suggerito di simulare in altri quattro punti del piano delle variabili di progetto, al fine di migliorare la previsione finale.

I nuovi punti di simulazione hanno i seguenti valori di J/W_m e W/V :

Tabella 7. 13: Nuovi punti di simulazione.

J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]
233.21	128.03
276.52	131.79
774.00	110.00
306.69	129.48

Per ogni coppia di punti fornita si è cercato di eseguire più simulazioni, considerando le tre tipologie di sezione.

Si riportano le caratteristiche ricavate per le nuove simulazioni:

Tabella 7. 14: Caratteristiche delle simulazioni 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27.

Sim.	Materiale	W/V [MPa]	Sezione	J/W_m [mm ³]
21	AISI 1340	127.70	Quadrata 16x16x2 [mm ³]	233.33
22	AISI 9255	129.38	Rombo 22x22x1.5 [mm ³]	278.38
23	AISI 9255	129.38	Tonda 28x1 [mm ²]	276.43
24	AISI 4130	110.87	Quadrata 30x30x1.5 [mm ³]	773.78
25	AISI 4130	110.87	Tonda 30x3 [mm ²]	782.49
26	AISI 4130	110.87	Rombo 29x29x2.5 [mm ³]	762.89
27	AISI 9255	129.38	Quadrata 30x30x1.5 [mm ³]	307.77

Si ottengono i seguenti risultati dalle nuove simulazioni.
Per quanto riguarda le curve Forza-Deflessione delle *simulazioni 21, 22 e 23*, si osservi la Figura 7.11.

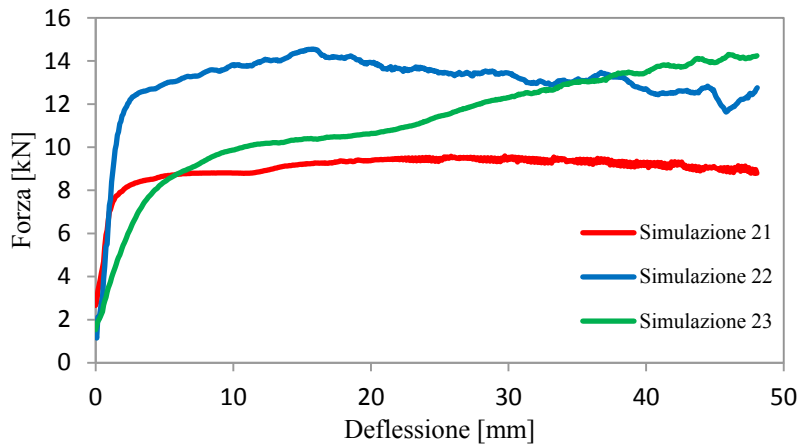


Figura 7. 11: Legame Forza-Deflessione delle simulazioni 21, 22, 23.

Per le grandezze ricavate dalle curve, invece, si faccia riferimento alla Tabella 7.15:

Tabella 7. 15: Risultati delle simulazioni 21, 22, 23.

	<i>Simulazione 21</i>	<i>Simulazione 22</i>	<i>Simulazione 23</i>
$M [g]$	230.19	279.82	230.53
$Wm [mm]$	16	31.11	28
$P_{med} [kN]$	9.02	13.00	11.12
$P_{max} [kN]$	9.60	14.56	14.30
η	0.94	0.89	0.78
$E_{abs} [kNmm]$	433.06	624.15	533.99
$S.E.A. [kNmm/kg]$	1881.31	2230.57	2316.38
$Y_{48} [N/mmkg]$	2303.13	1334.32	1340.51
$Y'_{48} [N/kg]$	36850.08	41514.33	37534.18

Contrariamente a quanto detto nel sottocapitolo 7.2, si osserva come considerando lo stesso materiale (AISI 9255), la *simulazione 22*, con geometria a rombo, fornisca valori maggiori di Y'_{48} rispetto alla *simulazione 23*, con geometria tonda. Tuttavia, per quest'ultima, la *S.E.A.* risulta essere maggiore del 3%.

L'andamento del legame Forza-Deflessione, invece, per le *simulazioni 24, 25, 26 e 27*, è riportato nella Figura 7.12.

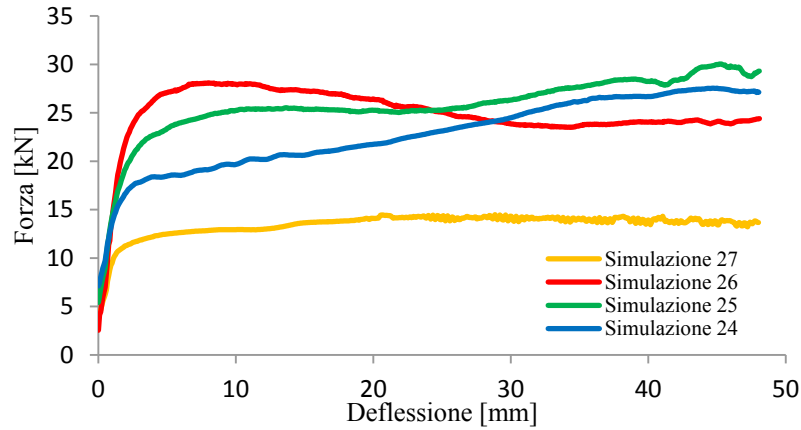


Figura 7. 12: Legame Forza–Deflessione delle simulazioni 24, 25, 26, 27.

I parametri di interesse ricavabili da tali curve vengono riassunti nella Tabella 7.16:

Tabella 7. 16: Risultati delle simulazioni 24, 25, 26, 27.

	<i>Simulazione 24</i>	<i>Simulazione 25</i>	<i>Simulazione 26</i>	<i>Simulazione 27</i>
M [g]	419.27	539.68	575.98	292.36
W_m [mm]	30	30	41.01	17
P_{medio} [kN]	22.73	25.66	24.87	13.41
P_{max} [kN]	27.54	30.04	28.11	14.49
η	0.83	0.85	0.89	0.93
E_{abs} [kNmm]	1090.87	1231.60	1193.98	643.60
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2601.85	2282.10	2072.94	2201.40
Y_{48} [N/mmkg]	1490.90	1353.78	931.94	2497.00
Y'_{48} [N/kg]	44727.15	40613.49	38220.92	42448.92

Con l'utilizzo dell'acciaio AISI 4130 si ottengono valori elevati di $S.E.A.$ e di Y'_{48} , che però, rimangono sempre maggiori nel caso di sezione quadrata e minori per la sezione romboidale. Anche considerando l'AISI 9255, la simulazione eseguita con la sezione quadrata (*Simulazione 27*) risulta possedere un maggiore assorbimento di energia rispetto alle configurazioni con sezioni romboidali e tonde (*Simulazioni 22, 23*).

Infine, dopo aver svolto le ultime simulazioni richieste dall'algoritmo, è stato possibile ricavare il punto di ottimo nel piano delle due variabili di progetto per il primo scenario di simulazione:

$$\frac{W}{V} = 104.38 \text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 781.22 \text{ mm}^3$$

Nella Figura 7.13 si riporta la superficie di previsione con segnalato in rosso il punto di ottimo.

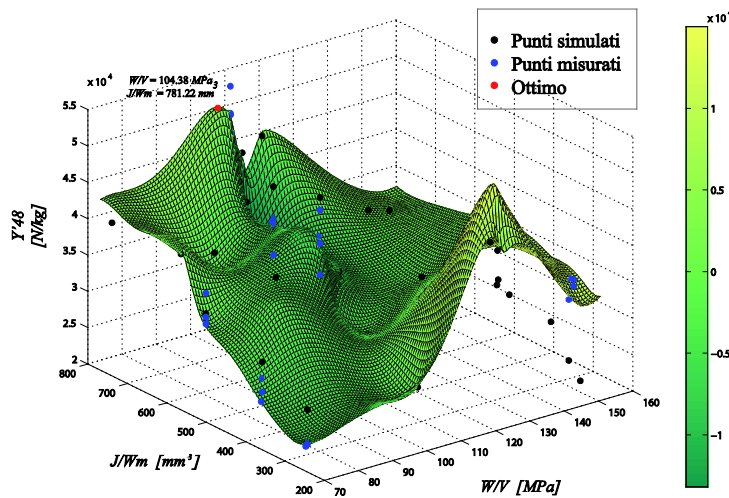


Figura 7. 13: Ottimo e superficie di previsione del metamodello per lo scenario di simulazione non calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.

Come verifica del punto di ottimo ricavato, sono state svolte altre due simulazioni in questo punto: una con una sezione del tubo tonda, mentre l'altra con una sezione quadrata. Per entrambe, il materiale del tubo è l'acciaio alto-resistenziale DOCOL800DP. Nella Tabella 7.17 vengono mostrate le loro caratteristiche:

Tabella 7. 17: Caratteristiche delle simulazioni 28 e 29 nel punto ottimo.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	$\frac{W}{V}$ [MPa]	<i>Sezione</i>	$\frac{J}{W_m}$ [mm ³]
28	DOCOL800DP	107.38	Tonda 30x3 [mm ²]	782.49
29	DOCOL800DP	107.38	Quadrata 27x27x2 [mm ³]	776.54

Si riportano le curve Forza-Deflessione in Figura 7.14.

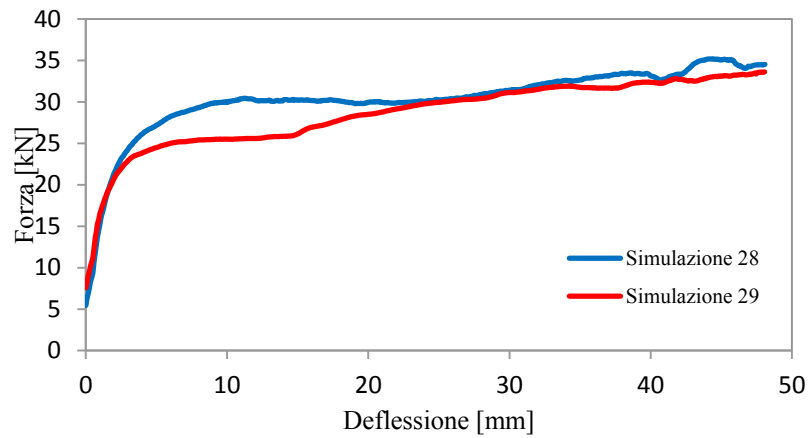


Figura 7. 14: Legame Forza-Deflessione delle simulazioni 28 e 29 del punto di ottimo.

I parametri di interesse ricavabili da tale curve vengono riassunti nella Tabella 7.18:

Tabella 7. 18: Risultati delle simulazioni 28 e 29 nel punto di ottimo.

	<i>Simulazione 28</i>	<i>Simulazione 29</i>
$M [g]$	540.90	448.22
$W_m [mm]$	30	27
$P_{medio} [kN]$	30.28	28.58
$P_{max} [kN]$	35.20	33.62
η	0.86	0.85
$E_{abs} [kNmm]$	1453.56	1371.86
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2687.30	3060.67
$Y_{48}[N/mmkg]$	1605.37	2007.41
$Y'_{48}[N/kg]$	48161.14	54200.05

Si osserva come effettivamente il punto di ottimo ricavato massimizzi il valore dell'indice di performance Y'_{48} . A conferma di ciò, la $S.E.A.$ ricavata, infatti, presenta due valori molto alti. Tuttavia, però, è bene sottolineare come, con uguale materiale, l'uso di una geometria quadrata della sezione comporti un incremento dell'indice da massimizzare circa del 12% rispetto a quello ricavabile con una sezione tonda. Si nota inoltre come i valori di tenacità e di J/W_m siano prossimi a quelli della *simulazione e prova sperimentale 5*, per cui infatti si era ricavato un Y'_{48} di circa 50500 N/kg (Capitolo 6).

Capitolo 8

Ottimizzazione dello scenario di simulazione calibrato

Lo scopo di questo capitolo è uguale a quello che si era posto nel Capitolo 7, con la differenza che ora lo scenario in analisi è quello calibrato. Ci si propone dunque, di ricavare inizialmente un “*Design of Experiments*” di 13 simulazioni aggiuntive, con l’ausilio del metodo statistico del *Latin Hypercube*, e poi, una volta svolte le simulazioni, procedere con l’ottimizzazione non vincolata del metamodello nella parte finale.

8.1 Determinazione del “*Design of experiments*”

Attraverso il metodo statistico del *Latin Hypercube*, è stato determinato un piano di altre 13 simulazioni da svolgere in aggiunta alle sette già presenti e discusse nel Capitolo 6.

Sono dunque stati forniti 13 punti in cui andare a simulare.

Si riportano ora i valori di J/W_m e W/V suggeriti dal metamodello per le nuove 13 simulazioni (Tabella 8.1).

Anche per il secondo scenario le *simulazioni 8, 9, 10* hanno alcuni valori di J/W_m e W/V già utilizzati nelle prime sette simulazioni. Dunque, per queste tre simulazioni, in realtà è sufficiente utilizzare i corrispondenti materiali e geometrie già usati precedentemente.

Tabella 8. 1: Coppie di valori di J/W_m e W/V per lo scenario di simulazione calibrato.

<i>Simulazione</i>	J/W_m [mm^3]	W/V [MPa]
1	238.02	77.05
2	393.60	77.05
3	535.74	72.65
4	547.14	107.38
5	773.78	107.38
6	665.62	75.89
7	307.03	235.01
8	773.78	72.65
9	278.32	235.01
10	773.78	235.01
11	451.09	71.60
12	666.48	84.40
13	376.75	157.50
14	789.34	208.74
15	338.80	107.85
16	517.02	230.06
17	540.32	130.42
18	728.37	144.18
19	580.69	183.98
20	273.52	193.60

8.1.1 Scelta delle geometrie

Si procede con la scelta della forma e delle dimensioni delle sezioni dei tubi nello stesso modo eseguito per lo scenario di simulazione non calibrato nel Capitolo 7.

Le geometrie delle sezioni e le rispettive dimensioni scelte con l'ausilio del risolutore di Excel vengono riportate nella Tabella 8.2.

Tabella 8. 2: Forme e dimensioni delle 13 geometrie scelte.

Sim.	Forma	Dimensioni		J/W ottenuto [mm ³]	J/W predetto [mm ³]	Diff % su J/W
		Lato o Diametro [mm]	Spessore [mm]			
8	Tonda	30	3	782.49	773.78	1.10
9	Tonda	24	1.5	280.81	278.32	1.01
10	Tonda	30	3	782.49	773.78	1.10
11	Rombo	22	3	451.91	451.09	0.18
12	Quadrata	28	1.5	666.76	666.48	0.04
13	Tonda	22	3	376.46	376.75	-0.08
14	Quadrata	24	3	787.50	789.34	-0.23
15	Rombo	24	1.5	337.09	338.80	-0.51
16	Tonda	38	1	523.84	517.02	1.32
17	Quadrata	23	2	541.74	540.32	0.26
18	Tonda	29	3	723.51	728.37	-0.67
19	Quadrata	31	1	581.29	580.69	0.10
20	Rombo	18	3	275.77	273.52	0.82

Per le *simulazioni 8 e 10* il J/W_m predetto dal metamodello è uguale a quello della *simulazione 5*, precedentemente svolta nel Capitolo 6. Di conseguenza è stata utilizzata la stessa geometria.

8.1.2 Scelta dei materiali

Per quanto riguarda la scelta del materiale è stato utilizzato nuovamente l'aiuto di *Ces EduPac 2012*. Il procedimento è del tutto analogo al precedente. Per selezionare il materiale adatto è stata eseguita nel programma una ricerca vincolata ponendo gli stessi vincoli del primo scenario di simulazione:

- Tipologia di materiale: Acciaio
- Valori minimi e massimi di allungamento percentuale A %, scelti sempre pari a 10% e 55%

- Valori minimi e massimi di carico di rottura R_m , che però variano da caso a caso in funzione del valore della tenacità. Sono stati determinati nel seguente modo:

$$R_{m,\min} = \frac{D(n_{\max} + 1)}{n_{\max}} \quad \text{con} \quad n_{\max} = \ln\left(1 + \frac{A_{\max}}{100}\right) \quad (8.1)$$

$$R_{m,\max} = \frac{D(n_{\min} + 1)}{n_{\min}} \quad \text{con} \quad n_{\min} = \ln\left(1 + \frac{A_{\min}}{100}\right)$$

Una volta selezionati i materiali idonei a questi requisiti sono state calcolate le rispettive tenacità, utilizzando come valori di A % e R_m quelli intermedi forniti da Ces. Successivamente si è scelto il materiale con una differenza percentuale di tenacità minore rispetto a quella predetta.

I risultati ottenuti sono:

Tabella 8. 3: Scelta dei materiali.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>W/V ottenuto [MPa]</i>	<i>W/V predetto [MPa]</i>	<i>Diff % su W/V</i>
8	Fe360	72.65	72.65	-
9	AISI304	235.01	235.01	-
10	AISI304	235.01	235.01	-
11	AISI 1095	71.33	71.60	-0.37
12	AISI 403	84.81	84.40	0.49
13	AISI 303	157.94	157.50	0.28
14	AISI 201	209.76	208.74	0.49
15	DOCOL800 q	107.38	107.85	-0.44
16	AISI304 Tonda	235.01	230.06	2.16
17	AISI 9255	129.38	130.42	-1.43
18	AISI 316	143.00	144.18	-0.99
19	AISI 216	176.23	183.98	-4.21
20	AISI 202	200.47	193.60	3.55

È bene ricordare che nello scenario di analisi calibrato, per descrivere il comportamento plastico dei materiali delle prime sette simulazioni, era stata effettuata la distinzione fra geometrie tonde e quadrate/romboidali. Infatti a seconda della forma geometrica, i valori dei due parametri d'incrudimento K e n per uno stesso materiale cambiavano (Capitolo 6.2.1). Per cui per la *simulazione*

8, dato che il valore di tenacità suggerito dal metodo statistico è uguale a quello della *simulazione 3*, è stato scelto come materiale l'acciaio Fe 360 con i parametri K e n precedentemente proposti per la sezione tonda. Alle *simulazioni 9 e 10*, invece, è stato assegnato l'AISI 304.

Si procede ora con la caratterizzazione dei materiali scelti.

- *Acciaio basso-legato: AISI 9255.*
Si riporta una tabella (Tabella 8.4) con le principali caratteristiche e un grafico rappresentante la curva d'incrudimento (Figura 8.1):

Tabella 8. 4: Caratteristiche AISI 9255.

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
AISI 9255	7.85	211000	0.29	780	487.5	22	1075.43	0.20	129.38

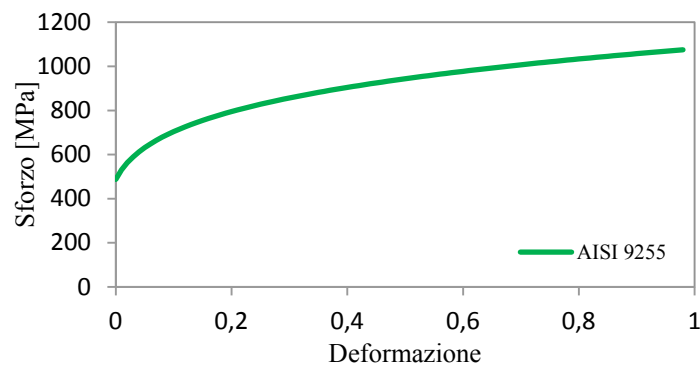


Figura 8. 1: Curva d'incrudimento AISI 9255.

- *Acciai inossidabili: AISI 303, AISI 316, AISI 201, AISI 216, AISI 202, AISI 403.* Sono tutti austenitici ad eccezione dell'AISI 403 che è martensitico. In Tabella 8.5 si riportano le principali caratteristiche, mentre nelle Figure 8.2 e 8.3 le curve d'incrudimento.

Tabella 8. 5: Caratteristiche AISI 201, 202, 316, 403, 216, 303.

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
AISI 201	7.80	197000	0.27	802	312.5	42.5	1158.32	0.35	209.76
AISI 202	7.80	195000	0.27	740	325	45	1069.03	0.37	200.47
AISI 316	8.00	197000	0.27	568	260	40	819.44	0.34	143.00
AISI 403	7.70	200000	0.28	550	397	20	750.12	0.18	84.81
AISI 216	7.80	195000	0.27	700	397.5	40	1009.87	0.34	176.23
AISI 303	7.95	196000	0.28	583	240	45	842.23	0.37	157.94

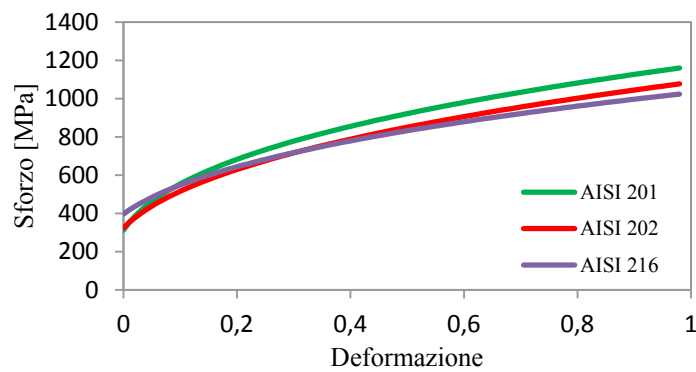


Figura 8. 2: Curve d'incrudimento AISI 201, AISI 202, AISI 216.

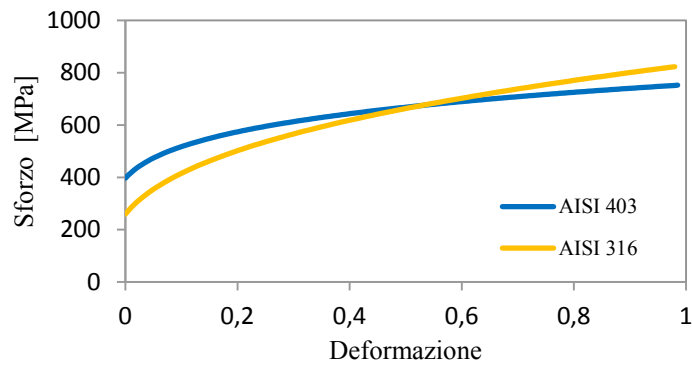


Figura 8. 3: Curve d'incrudimento AISI 403, AISI 316.

- *Acciai al carbonio: AISI 1095.*
Di seguito, vi è sono le principali caratteristiche e le curve d'incrudimento da inserire nel software di simulazione.

Tabella 8. 6: Caratteristiche AISI 1095.

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
AISI 1095	7.85	207000	0.29	655	380	13	846.86	0.12	71.33

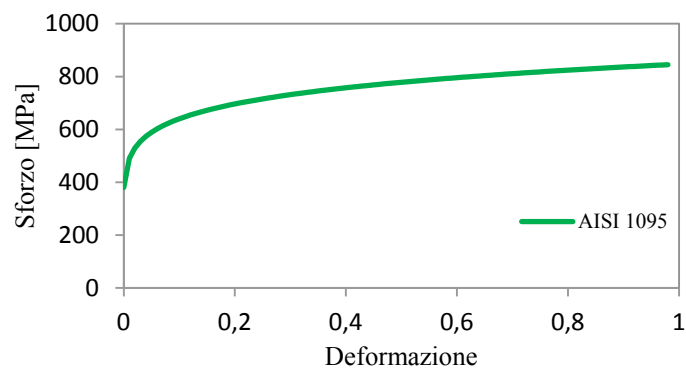


Figura 8. 4: Curva d'incrudimento AISI 1095.

8.2 Risultati delle nuove simulazioni

Una volta individuate le caratteristiche delle 13 nuove configurazioni da testare, sono state svolte le rispettive simulazioni. In Tabella 8.7 si riporta un riassunto delle 13 configurazioni usate:

Tabella 8. 7: Riassunto delle caratteristiche delle 13 simulazioni da svolgere.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>W/V</i> [MPa]	<i>Sezione</i>	<i>J/W_m</i> [mm ³]
8	Fe 360	72.65	<i>Tonda</i> 30x3 [mm ²]	782.49
9	AISI304	235.01	<i>Tonda</i> 24x1.5 [mm ²]	280.81
10	AISI304	235.01	<i>Tonda</i> 30x3 [mm ²]	782.49
11	AISI 1095	71.33	<i>Rombo</i> 22x22x3 [mm ³]	451.91
12	AISI 403	84.81	<i>Quadrata</i> 28x28x1.5 [mm ³]	666.76
13	AISI 303	157.94	<i>Tonda</i> 22x3 [mm ²]	376.46
14	AISI 201	209.76	<i>Quadrata</i> 24x24x3 [mm ³]	787.50
15	DOCOL800	107.38	<i>Rombo</i> 24x24x1.5 [mm ³]	337.09
16	AISI304	235.01	<i>Tonda</i> 38x1 [mm ²]	523.84
17	AISI 9255	129.38	<i>Quadrata</i> 23x23x2 [mm ³]	541.74
18	AISI 316	143.00	<i>Tonda</i> 29x3 [mm ²]	723.51
19	AISI 216	176.23	<i>Quadrata</i> 31x31x1 [mm ³]	581.29
20	AISI 202	200.47	<i>Rombo</i> 18x18x3 [mm ³]	275.77

I risultati delle simulazioni svolte vengono ora sotto riportati, andando a raggruppare le simulazioni con la stessa forma della sezione.

Con la geometria quadrata sono state eseguite quattro simulazioni:

- *Simulazione 12*: tubo in acciaio AISI 403 con sezione quadrata di lato 28 mm e spessore 1.5 mm

- *Simulazione 14*: tubo in acciaio AISI 201 con sezione quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm.
- *Simulazione 17*: tubo in acciaio AISI 9255 con sezione quadrata di lato 23 mm e spessore 2 mm.
- *Simulazione 19*: tubo in acciaio AISI 216 con sezione quadrata di lato 31 mm e spessore 1 mm.

Nella Figura 8.5 si riportano le curve Forza-Deflessione ricavate.

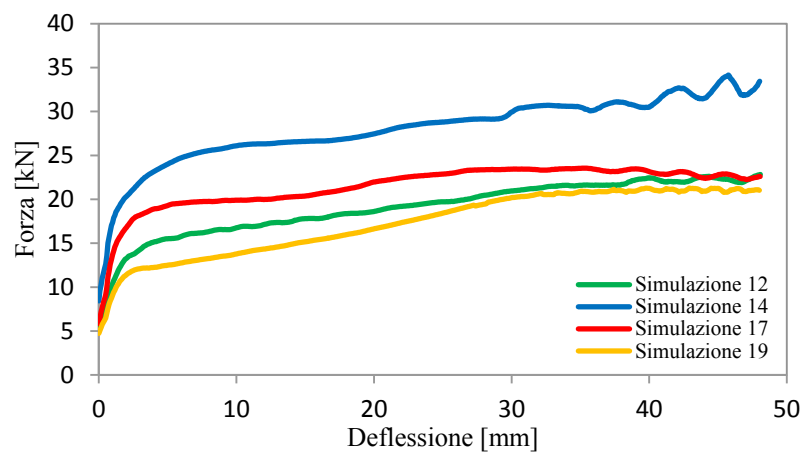


Figura 8. 5: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 12, 14, 17, 19.

I parametri d'interesse, invece, vengono riassunti nella Tabella 8.8:

Tabella 8. 8: Risultati delle simulazioni 12, 14, 17, 19.

	<i>Simulazione 12</i>	<i>Simulazione 14</i>	<i>Simulazione 17</i>	<i>Simulazione 19</i>
M [g]	377.08	514.90	364.60	336.66
W_m [mm]	28	24	23	31
P_{medio} [kN]	19.03	27.98	21.42	17.31
P_{max} [kN]	22.84	34.15	23.55	21.28
η	0.83	0.82	0.91	0.81
E_{abs} [kNmm]	913.41	1343.25	1028.38	830.89
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2422.32	2608.76	2820.60	2468.04
Y_{48} [N/mmkg]	1501.89	1855.87	2324.75	1348.97
Y'_{48} [N/kg]	42052.85	44540.96	53469.21	41818.21

Si nota subito come, anche in questo scenario di analisi, la geometria quadrata della sezione comporti valori elevati di Y'_{48} e di $S.E.A.$. Tuttavia, i valori maggiori sono attribuibili alla *simulazione 17*, ovvero a una configurazione in AISI 9255, a sezione quadrata di lato 23 mm e spessore 2 mm.

Considerando, invece, una geometria tonda, le simulazioni svolte sono sei. Nel primo gruppo si riportano i risultati di quelle sotto riportate:

- *Simulazione 8*: tubo in acciaio Fe 360 con sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 3 mm.
- *Simulazione 9*: tubo in acciaio AISI 304 con sezione tonda di diametro 24 mm e spessore 1.5 mm.
- *Simulazione 10*: tubo in acciaio AISI 304 con sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 3 mm.

L'andamento del legame Forza-Deflessione è mostrato nella Figura 8.6, mentre i risultati delle grandezze d'interesse sono riportati nella Tabella 8.9.

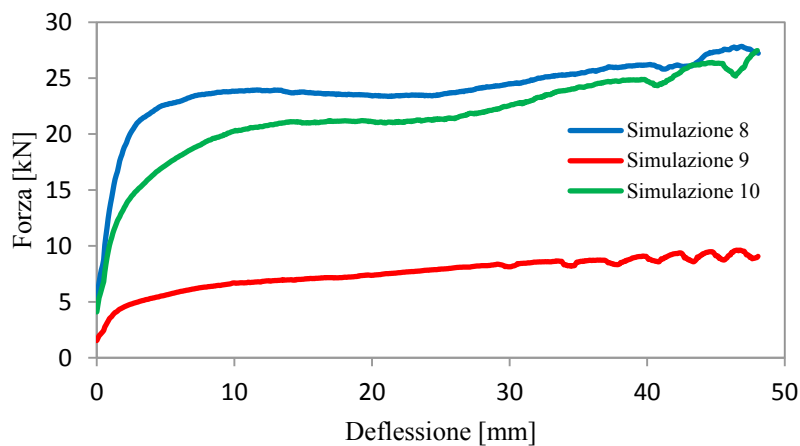


Figura 8. 6: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 8, 9, 10.

Nel secondo gruppo si riportano i risultati delle tre rimanenti:

- *Simulazione 13*: tubo in acciaio AISI 303 con sezione tonda di diametro 22 mm e spessore 3 mm.
- *Simulazione 16*: tubo in acciaio AISI 304 con sezione tonda di diametro 38 mm e spessore 1 mm.
- *Simulazione 18*: tubo in acciaio AISI 316 con sezione tonda di diametro 29 mm e spessore 3 mm.

L'andamento del legame Forza-Deflessione è mostrato nella Figura 8.7, mentre i risultati delle grandezze d'interesse sono riportati nella Tabella 8.10.

Tabella 8. 9: Risultati delle simulazioni 8, 9, 10.

	Simulazione 8	Simulazione 9	Simulazione 10
M [g]	540.29	249.71	548.84
W_m [mm]	30	24	30
P_{medio} [kN]	23.95	7.51	21.47
P_{max} [kN]	27.85	9.62	27.48
η	0.86	0.78	0.78
E_{abs} [kNmm]	1149.64	360.59	1030.74
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2127.83	1444.03	1878.05
Y_{48} [N/mmkg]	1270.99	978.49	1019.29
Y'_{48} [N/kg]	38129.60	23483.65	30578.71

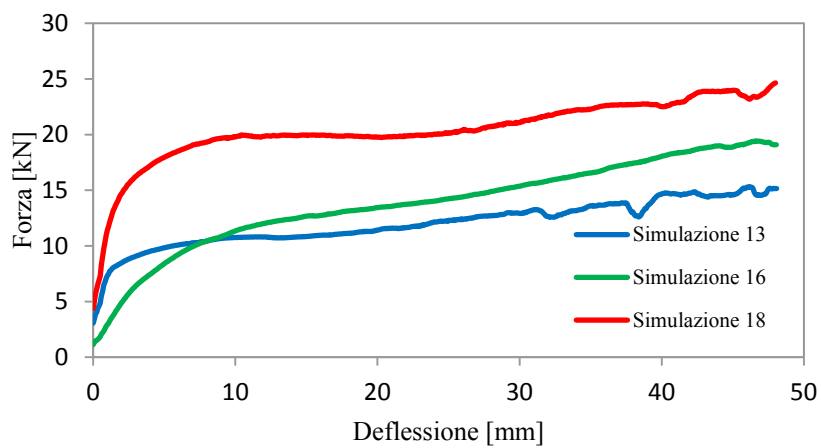


Figura 8. 7: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 13, 16, 18.

Tabella 8. 10: Risultati delle simulazioni 13, 16, 18.

	Simulazione 13	Simulazione 16	Simulazione 18
M [g]	368.49	358.76	525.83
W_m [mm]	22	38	29
P_{medio} [kN]	11.99	19.44	24.65
P_{max} [kN]	15.33	13.81	20.38
η	0.78	0.71	0.83
E_{abs} [kNm]	575.40	662.87	978.03
$S.E.A.$ [kNm/kg]	1561.68	1847.68	1859.98
Y_{48} [N/mmkg]	1156.43	719.61	1104.54
Y'_{48} [N/kg]	25441.57	27345.01	32031.63

Per queste sei simulazioni si sono ricavati valori dell'indice di prestazione minori, se paragonati a quelli ricavati in precedenza con le sezioni a geometria quadrata. I valori di Y'_{48} e della $S.E.A.$ massimi sono stati ottenuti nella simulazione 8, con un tubo in acciaio Fe 360. Tuttavia i risultati delle altre simulazioni sono nettamente inferiori; per la configurazione peggiore (simulazione 9), Y'_{48} risulta inferiore del 38% circa rispetto alla migliore.

Per la geometria a rombo, invece, si hanno tre simulazioni:

- *Simulazione 11*: tubo in acciaio AISI 1095 con sezione romboidale di lato 22 mm e spessore 3 mm
- *Simulazione 15*: tubo in acciaio DOCOL800DP con sezione romboidale di diametro 24 mm e spessore 1.5 mm
- *Simulazione 20*: tubo in acciaio AISI 202 con sezione romboidale di lato 18 mm e spessore 3 mm.

L'andamento del legame Forza-Deflessione è mostrato nella Figura 8.8, mentre i risultati delle grandezze d'interesse sono riportati nella Tabella 8.11.

In disaccordo con quanto affermato nel primo scenario, la geometria romboidale in questo contesto mostra risultati soddisfacenti. Infatti per la simulazione 11, configurazione a sezione romboidale $22 \times 22 \times 3 \text{ mm}^3$ in AISI 1095, il valore di Y'_{48} risulta elevato e paragonabile con i risultati forniti dalle simulazioni a sezione quadrata.

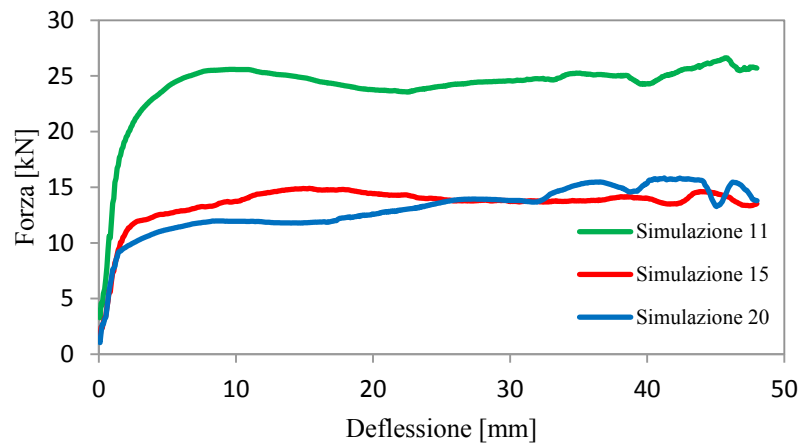


Figura 8. 8: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 11, 15, 20.

Tabella 8. 11: Risultati delle simulazioni 11, 15, 20.

	<i>Simulazione 11</i>	<i>Simulazione 15</i>	<i>Simulazione 20</i>
$M [g]$	463.65	313.73	356.14
$W_m [mm]$	31.11	33.94	25.46
$P_{medio} [kN]$	24.12	13.56	15.84
$P_{max} [kN]$	26.63	14.90	13.03
η	0.91	0.91	0.82
$E_{abs} [kNmm]$	1157.89	651.09	625.52
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2497.33	2075.32	1756.38
$Y_{48}[N/mmkg]$	1514.80	1159.37	1182.86
$Y'_{48}[N/kg]$	47129.42	39350.18	30110.57

8.3 Ottimizzazione

Una volta noti i risultati di tutte e 20 le simulazioni si è passati alla fase di ottimizzazione, mediante l'utilizzo del *Metamodello Fusion*, come già svolto per lo scenario di simulazione non calibrato.

Di seguito, si riporta la superficie di previsione ottenuta dal metamodello (Figura 8.9).

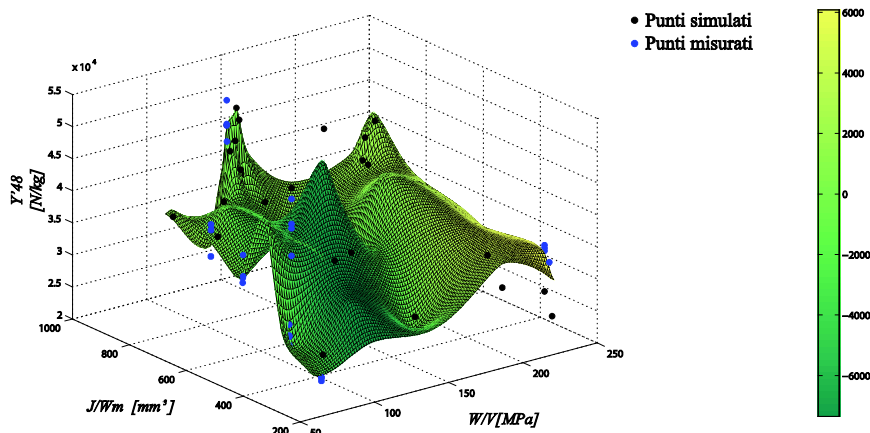


Figura 8. 9: Superficie di previsione del metamodello per lo scenario calibrato; ; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.

Si nota subito come l'intervallo dei valori di Tenacità sia più ampio rispetto allo scenario precedente, infatti il confine è 250 MPa. Anche in questo caso, la *colormap* riportata mostra la differenza che vi è in ogni punto del piano delle variabili di progetto fra la curva ricavata con il set di punti ad "Alta Risoluzione" e quella ricavata con il set di punti a "Bassa Risoluzione". Si nota come tale differenza oscilla da un valore minimo di circa -7000 a un valore massimo di 6000.

Prima di trovare il punto di ottimo è stato necessario andare a simulare in altri punti proposti dall'*algoritmo EGO*.

I punti di simulazione aggiunti sono riportati nella Tabella 8.12.

Per ciascuna coppia di punti sono state testate le tre tipologie di sezione: tonda quadrata e romboidale.

La scelta delle geometrie e dei materiale per questi tre punti è riportata nella Tabella 8.13.

Tabella 8. 12: Nuove punti di simulazione.

J/W_m [mm^3]	W/V [MPa]
774	198
556.25	141.46
786.53	102.33
768.36	113.52
780.72	114.15

Tabella 8. 13: Caratteristiche delle simulazioni 21-35.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	W/V [MPa]	<i>Sezione</i>	J/W_m [mm^3]
21	AISI 202	200.47	Quadrata 30x30x1.5 [mm^3]	773.78
22	AISI 202	200.47	Tonda 30x3 [mm^2]	782.49
23	AISI 202	200.47	Rombo 29x29x2.5 [mm^3]	762.99
24	AISI 305	140.46	Rombo 24x24x3 [mm^3]	556.85
25	AISI 305	140.46	Tonda 33x1.5 [mm^2]	559.18
26	AISI 305	140.46	Quadrata 26x26x1.5 [mm^3]	567.74
27	AISI 1118	102.88	Tonda 30x3 [mm^2]	782.49
28	AISI 1118	102.88	Quadrata 24x24x3 [mm^3]	787.50
29	AISI 1118	102.88	Rombo 28x28x3 [mm^3]	800.55
30	AISI 6150	114.57	Rombo 29x29x2.5 [mm^3]	762.99
31	AISI 6150	114.57	Quadrata 25x25x2.5 [mm^3]	768.75
32	AISI 6150	114.57	Tonda 34x2 [mm^2]	759.90
33	AISI 6150	114.57	Tonda 30x3 [mm^2]	782.49
34	AISI 6150	114.57	Quadrata 27x27x2 [mm^3]	776.54
35	AISI 6150	114.57	Rombo 28x28x3 [mm^3]	800.55

Vediamo ora i risultati ottenuti.

- *Simulazioni 21, 22, 23*: tubi in acciaio AISI 202 rispettivamente con sezione quadrata di lato 30 mm e spessore 1.5 mm, con sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 3 mm e con sezione a rombo di lato 29 mm e spessore 2.5 mm.

L'andamento del legame Forza-Deflessione è mostrato in Figura 8.9:

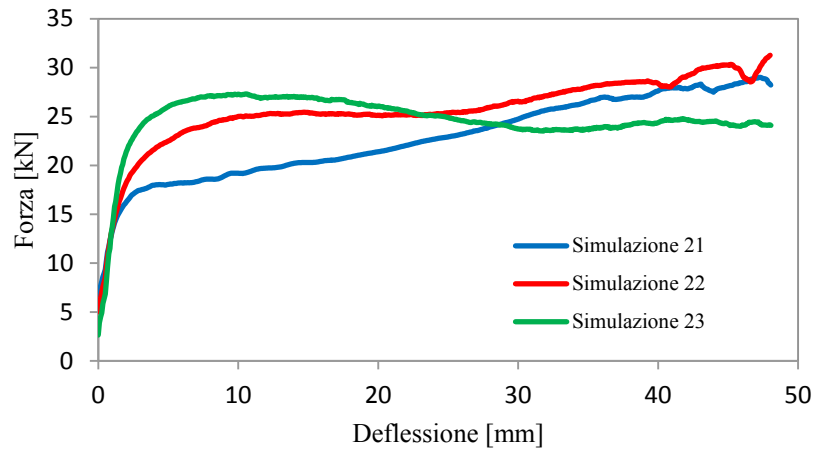


Figura 8.10: Legami Forza-Deflessione per le simulazioni 21, 22, 23.

I parametri di interesse ricavabili da tali curve vengono riassunti nella Tabella 8.14:

Tabella 8.14: Risultati delle simulazioni 21, 22, 23.

	<i>Sim.21</i>	<i>Sim. 22</i>	<i>Sim. 23</i>
M [g]	417.21	536.62	572.80
W_m [mm]	30	30	41.01
P_{medio} [kN]	22.76	25.60	24.64
P_{max} [kN]	29.01	31.28	27.30
η	0.78	0.82	0.90
E_{abs} [kNmm]	1092.61	1228.95	1182.82
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2618.82	2290.15	2064.97
Y_{48} [N/mmkg]	1427.04	1301.87	946.68
Y'_{48} [N/kg]	42811.18	39056.14	38825.35

Le tre simulazioni svolte considerando questo materiale del tubo, hanno fornito risultati soddisfacenti e simili fra loro. Il valore di Y'_{48} maggiore è stato ottenuto per la sezione quadrata, tuttavia le altre due sezioni non presentano valori molto inferiori. Quanto appena detto vale anche per la *S.E.A.*, che assume valori superiori a 2000 kNmmkg^{-1} in tutti e tre i casi.

- *Simulazioni 24, 25, 26*: tubi in acciaio AISI 305 rispettivamente con sezione romboidale di lato 24 mm e spessore 3 mm , con sezione tonda di diametro 33 mm e spessore 1.5 mm e con sezione quadrata di lato 26 mm e spessore 1.5 mm . L'andamento del legame Forza-Deflessione è mostrato in figura 8.11:

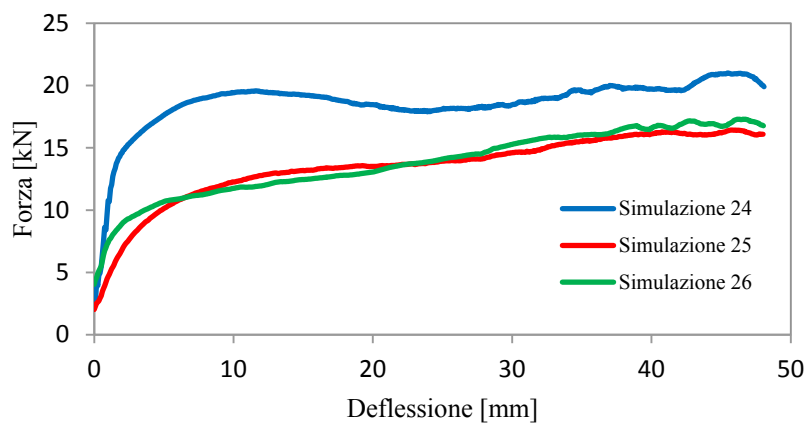


Figura 8. 11: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 24, 25, 26.

I parametri di interesse ricavabili da tale curva vengono riassunti nella tabella:

Tabella 8. 15: Risultati delle simulazioni 24, 25, 26.

	<i>Sim.24</i>	<i>Sim. 25</i>	<i>Sim. 26</i>
$M [g]$	520.95	375.60	349.17
$W_m [mm]$	33.94	33	26
$P_{medio} [kN]$	18.56	13.46	13.78
$P_{max} [kN]$	21.01	16.43	17.30
η	0.88	0.82	0.80
$E_{abs} [kNmm]$	891.01	646.13	661.33
$S.E.A. [kNmm/kg]$	1710.37	1720.27	1893.98
$Y_{48} [N/mmkg]$	927.74	889.81	1208.39
$Y'_{48} [N/kg]$	31488.59	29363.80	31418.15

Si nota come le simulazioni eseguite con l'acciaio AISI 305 abbiano valori dell'indice di performance relativamente bassi, se paragonati ai casi visti in precedenza. Dalle curve Forza-Deflessione, in accordo con i risultati nella Tabella 8.15, si nota come la configurazione a rombo sia la peggiore, mentre la quadrata la migliore.

- *Simulazioni 27, 28, 29:* barre in acciaio AISI 1118 rispettivamente a sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 3 mm, a sezione quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm e a sezione romboidale di lato 28 mm e spessore 3 mm. L'andamento del legame Forza-Spostamento è mostrato nella Figura 8.12:

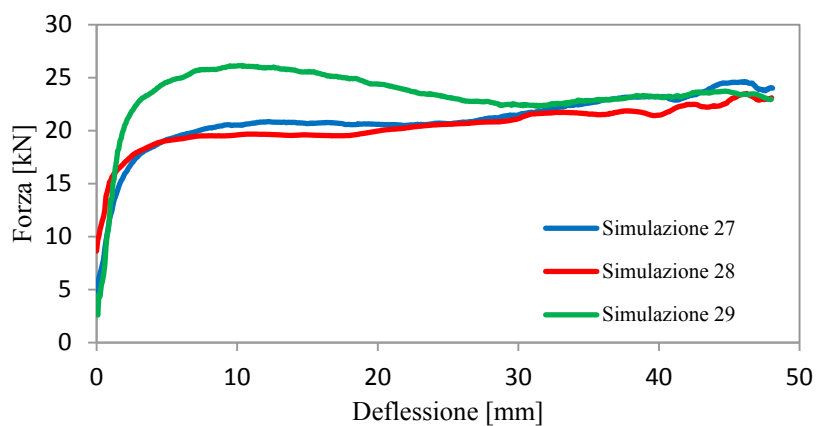


Figura 8. 12: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 27, 28, 29.

I parametri di interesse ricavabili da tale curva vengono riassunti nella tabella 8.16:

Tabella 8. 16: Risultati delle simulazioni 27, 28, 29.

	<i>Sim.27</i>	<i>Sim. 28</i>	<i>Sim. 29</i>
M [g]	539.68	517.92	629.67
W_m [mm]	30	24	39.60
P_{medio} [kN]	21.00	23.51	26.15
P_{max} [kN]	24.62	20.39	23.39
η	0.85	0.87	0.89
E_{abs} [kNmm]	1007.83	978.58	1122.96
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1867.47	1889.43	1783.41
Y_{48} [N/mmkg]	1105.97	1422.45	839.33
Y'_{48} [N/kg]	33179.08	34138.81	33235.69

Le configurazioni testate anche in questo caso non hanno prodotto particolari risultati interessanti, dal momento che i valori di Y'_{48} ricavati non sono particolarmente alti e nemmeno la *S.E.A.*. Tuttavia si nota come anche in questo caso, la sezione che, a pari materiale, massimizza l'energia assorbita sia la quadrata.

- *Simulazioni 30, 31, 32*: barre in acciaio AISI 6150 rispettivamente a sezione romboidale di lato 29 mm e spessore 2.5 mm, a sezione quadrata di lato 25 mm e spessore 2.5 mm e a sezione tonda di diametro 34 mm e spessore 2 mm. L'andamento del legame Forza-Spostamento è mostrato nella Figura 8.13:

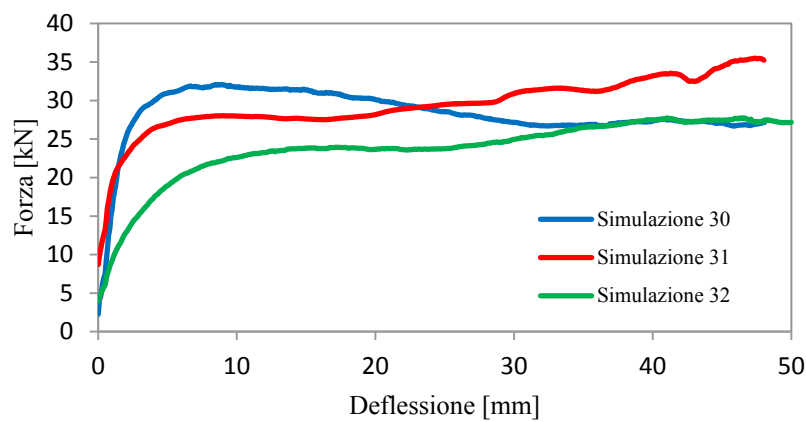


Figura 8. 13: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 30, 31, 32.

I parametri di interesse ricavabili da tale curva vengono riassunti nella Tabella 8.17:

Tabella 8. 17: Risultati delle simulazioni 30, 31, 32.

	<i>Sim. 30</i>	<i>Sim. 31</i>	<i>Sim. 32</i>
$M [g]$	575.98	477.18	472.95
$W_m [mm]$	41.01	25	34
$P_{medio} [kN]$	28.29	29.39	23.70
$P_{max} [kN]$	32.09	25.50	27.75
η	0.88	0.83	0.85
$E_{abs} [kNmm]$	1357.94	1410.66	1137.54
$S.E.A. [kNmm/kg]$	2357.61	2956.24	2405.19
$Y_{48} [N/mmkg]$	1055.97	2039.49	1258.45
$Y'_{48} [N/kg]$	43307.63	50987.34	42787.32

- *Simulazioni 33, 34, 35*: barre in acciaio AISI 6150 rispettivamente a sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 3 mm, a sezione quadrata di lato 27 mm e spessore 2 mm e a sezione romboidale di lato 28 mm e spessore 3 mm. L'andamento del legame Forza-Spostamento è mostrato nella Figura 8.14:

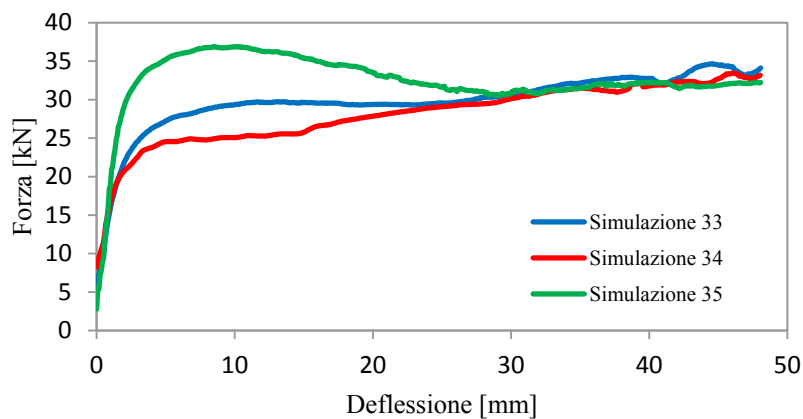


Figura 8. 14: Legami Forza-Deflessione delle simulazioni 33, 34, 35.

I parametri di interesse ricavabili da tale curva vengono riassunti nella Tabella 8.18:

Tabella 8. 18: Risultati delle simulazioni 33, 34, 35.

	<i>Sim.33</i>	<i>Sim.34</i>	<i>Sim.35</i>
M [g]	539.68	447.26	629.67
W_m [mm]	30	27	39.60
P_{medio} [kN]	29.77	28.08	32.47
P_{max} [kN]	34.65	33.45	36.89
η	0.86	0.84	0.88
E_{abs} [kNmm]	1428.89	1347.97	1558.77
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2647.68	3013.82	2475.55
Y_{48} [N/mmkg]	1579.60	1952.31	1146.43
Y'_{48} [N/kg]	47388.04	52712.46	45396.43

Con l'utilizzo di questo acciaio sono stati ottenuti risultati molto soddisfacenti per tutte le forme di sezione testate. Infatti il valore più grande di Y'_{48} ottenuto è 52712.46 N/kg, ricavato nella *simulazione 34* a sezione quadrata, mentre quello più basso è 42787.32 N/kg, ricavato nella *simulazione 32* a sezione romboidale.

Dunque, una volta analizzati i risultati dei punti forniti dall'*algoritmo EGO*, è possibile ricavare il seguente punto di ottimo:

$$\frac{W}{V} = 114.33 \text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 773.59 \text{ mm}^3$$

In Figura 8.15 si riporta la superficie di previsione del metamodello, con il punto di ottimo trovato e i punti rappresentanti le simulazioni e le prove sperimentali svolte.

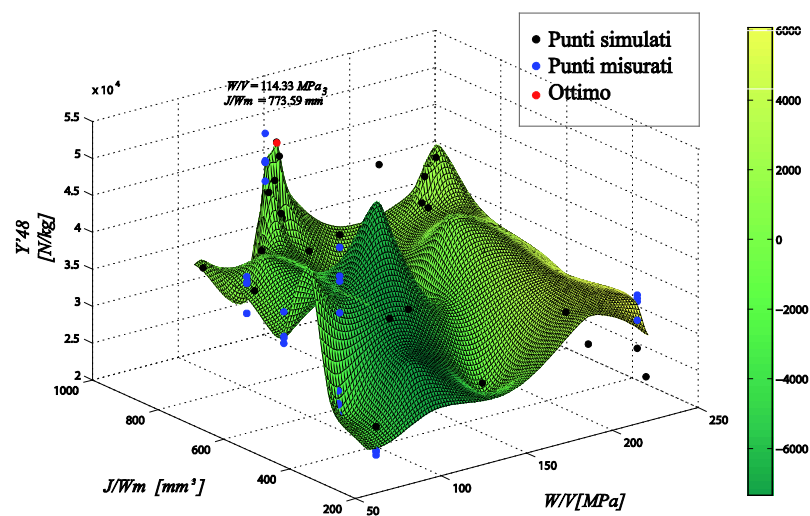


Figura 8. 15: Ottimo della superficie di previsione del metamodello per lo scenario calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.

Il punto di ottimo ricavato ha valori di tenacità e J/W_m molto prossimi a quelli della *simulazione 34*. Di conseguenza si può concludere che per questo scenario la configurazione ottima che massimizza l'energia assorbita di un tubo riempito di schiuma sottoposto a flessione è una sezione quadrata di lato 27 mm e spessore 2 mm , utilizzando come materiale l'acciaio basso-legato AISI 6150.

A prova di ciò, si fa notare che questa simulazione presenta un valore di Y'_{48} pari a 52712.46 N/kg , il valore più alto trovato in questo scenario di analisi.

Si nota, inoltre, come la sezione ottima, anche nel caso si scenario calibrato, abbia forma quadrata.

Si può osservare infine, che il punto di ottimo trovato per lo scenario di simulazione calibrato è molto vicino rispetto a quello ricavato nel Capitolo 7 per lo scenario non calibrato. infatti nella Tabella 8.19, si riportano le differenze

percentuali delle due variabili di progetto nei punti di ottimo ricavati, calcolate rispetto allo scenario calibrato. Si osserva che per il rapporto J/W_m la differenza percentuale è dello 0.9%, mentre per la tenacità del 8.7%

Tabella 8. 19: Confronto dei punti di ottimo ricavati nei due scenari analizzati.

<i>Scenario</i>	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]
<i>Non Calibrato</i>	781.22	104.38
<i>Calibrato</i>	773.59	114.33
<i>Diff%</i>	0.9	- 8.7

Capitolo 9

Ottimizzazione vincolata dei due scenari di simulazione

Per i due scenari analizzati, è stata effettuata poi, un'ottimizzazione vincolata, ponendo limiti sul costo al pezzo e sull'ingombro della sezione dei tubi.

Per spiegare il metodo di lavoro utilizzato per questo scopo, si è scelto di riportare i passi svolti soltanto per lo scenario non calibrato di simulazione. Infatti per lo scenario calibrato, il procedimento è del tutto analogo. Per quest'ultimo, dunque, si riportano solamente i risultati ottenuti (Sottocapitolo 9.4).

È stata, quindi, ipotizzata una classificazione delle automobili in base alla gamma, in modo da poter individuare tre zone di vincolo, definite soltanto da limiti superiori dei costi al pezzo e ingombri dei componenti analizzati, usati come barre anti-intrusione:

- *Autovetture di bassa gamma* con la necessità di avere barre laterali con bassi ingombri e costi
- *Autovetture di media gamma* con la necessità di avere barre laterali con un ingombri e costi non troppo elevati
- *Autovetture ad alta gamma*: con la possibilità di avere barre laterali con ingombri e costi anche maggiori.

Si riportano dunque le tre fasce di vincolo scelte per i costi al pezzo e gli ingombri.

Tabella 9. 1: Fasce di vincolo ipotizzate in funzione della gamma dell'auto.

<i>Tipologia autovettura</i>	<i>Costo [Euro/pezzo]</i>	<i>Wm [mm]</i>
<i>Bassa gamma</i>	< 2.50	< 25
<i>Media gamma</i>	< 5.00	< 35
<i>Alta gamma</i>	< 7.00	< 45

Per quanto riguarda il costo al pezzo di ciascun tubo, è stato calcolato sommando il prodotto fra il costo al chilogrammo dell'acciaio e la massa dell'involucro tubolare e il prodotto fra il costo al chilogrammo della schiuma e la sua massa.

$$Costo \left[\frac{\text{€}}{pz} \right] = M_{Tubo} [kg] \cdot C_{acciaio} \left[\frac{\text{€}}{kg} \right] + M_{schiuma} [kg] \cdot C_{schiuma} \left[\frac{\text{€}}{kg} \right] \quad (9.1)$$

Il costo della schiuma usata è di 37.5 €/kg.

Nella Tabella 9.2 si riportano tutti i costi unitari degli acciai usati per il primo scenario analizzato. Tali valori sono stati suggeriti dal software *Ces EduPack 2012*.

Tabella 9. 2. Costi dei materiali usati.

<i>Materiale</i>	<i>Costo_{acciaio} [€/kg]</i>
Fe 360	1.5
DOCOL800DP	6.5
AISI 304	4.5
AISI 4320	0.85
AISI 310	5.7
AISI 446	1.60
AISI 316	4.50
AISI 403	0.85
AISI 436	1.75
AISI 1340	0.45
AISI 1118	0.45
AISI 303	3.00
AISI 4130	0.50
AISI 9255	0.45

9.1 Scenario non calibrato

Nella Figura 9.1 si riporta la mappa di tutte le simulazioni svolte nel primo scenario, in relazione al costo al pezzo ottenuto e all'ingombro, delimitando le tre zone di vincolo (rette verdi per la prima zona, rosse per la seconda e azzurre per la terza).

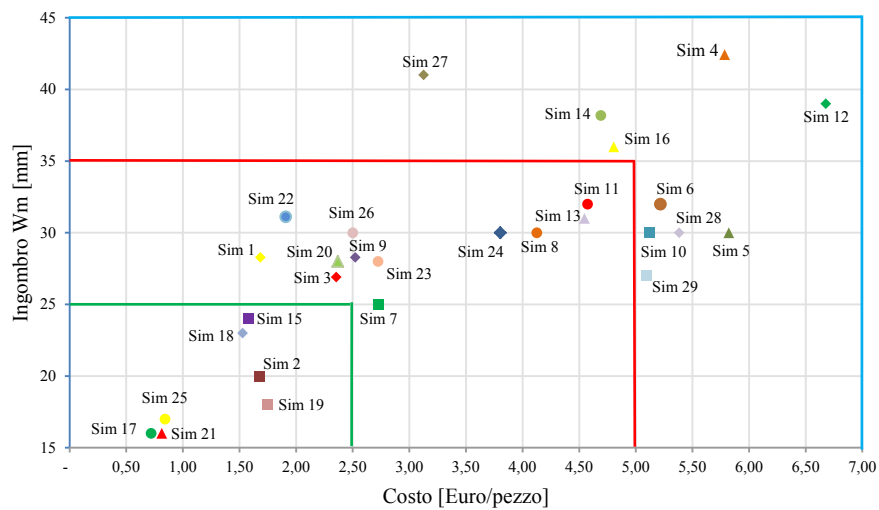


Figura 9. 1: Mappa delle simulazioni svolte in funzione dei due vincoli scelti.

Si procede dunque con l'ottimizzazione delle tre zone, partendo da quella delle autovetture di alta gamma, per poi passare a quella delle autovetture di media gamma e, infine arrivare a quella delle autovetture di bassa gamma.

9.1.1 Autovetture di alta gamma

Per un'autovettura di alta gamma, i vincoli imposti hanno limiti superiori alti: l'ingombro deve essere inferiore a 45 mm, mentre il costo inferiore a 7 €/pz. Di conseguenza, nessuna delle 29 configurazioni esaminate nel Capitolo 7 può essere scartata. Si considera, dunque il quadro intero delle simulazioni svolte, riportato in Figura 9.2.

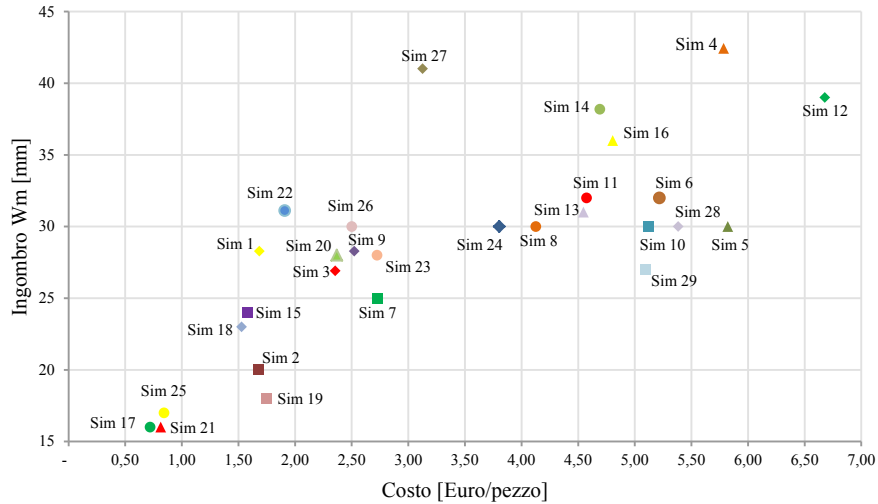


Figura 9. 2: Mappa delle simulazioni valide per le autovetture ad alta gamma.

In **Appendice 4**, si riporta un riassunto di tutte le configurazioni testate nel primo scenario.

Dal momento che per questa gamma di autovetture sono valide tutte le configurazioni di barre anti-intrusione testate, l'ottimo corrisponde con quello trovato nell'ottimizzazione senza vincoli eseguita dal metamodella nel Capitolo 7. I valori di tenacità e di J/W_m ottimi, che erano stati ricavati, sono sotto riportati:

$$\frac{W}{V} = 104.39 \text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 781.22 \text{ mm}^3$$

La configurazione ottima è dunque quella trovata precedentemente, testata nella *simulazione 29*. Si tratta di un tubo in DOCOL800DP con sezione quadrata di lato 27 mm e spessore 2 mm, con una tenacità di 107.38 MPa e un J/W_m di 776.54 mm³. Nella Tabella 9.3 si riportano le caratteristiche principali di tale configurazione.

Tabella 9. 3: Caratteristiche della configurazione ottima per un'autovettura di alta gamma.

Sezione	Materiale	Costo [€/pz]	W_m [mm]	Y'_{48} [N/kg]
Quadrata 27x27x2 [mm ³]	DOCOL800DP	5.10	27	54200.05

9.1.2 Autovetture di media gamma

In questo sottocapitolo si affronta l'ottimizzazione per le autovetture di media gamma. Come già detto, per questa classe di autovetture si è ammesso un ingombro e un costo massimo rispettivamente di 35 mm e 5.00 €/pz. Nella Figura 9.3 si riporta un ingrandimento della regione di piano W_m -Costo valida:

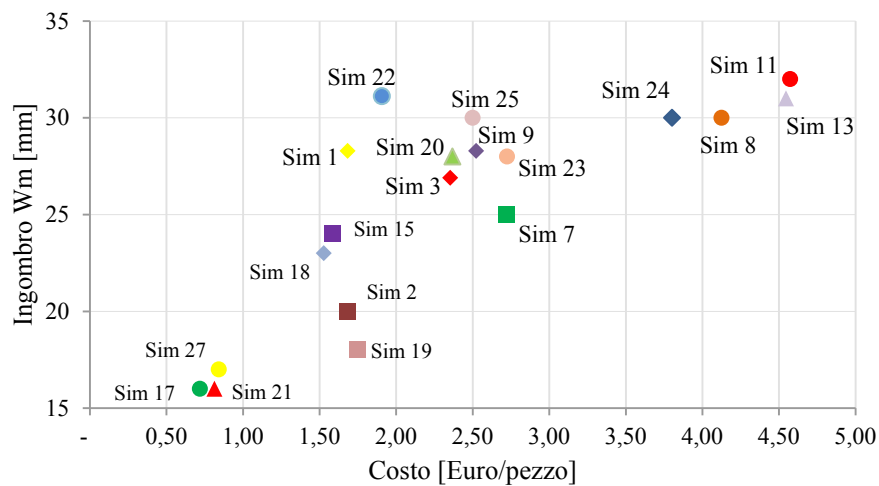


Figura 9. 3: Mappa delle simulazioni valide per le autovetture di media gamma.

Le simulazioni presenti in questa regione vengono riportate nell' **Appendice 4**. In questo caso si è provato inizialmente a trovare una configurazione di geometria della sezione e materiale che rispetti i valori di tenacità e J/W_m del punto di ottimo ricavato nel Capitolo 7 :

$$\frac{W}{V} = 104.39 \text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 781.22 \text{ mm}^3$$

Le possibili geometrie delle sezioni con un ingombro minore o al più 35 mm potrebbero essere:

1. Tubo a sezione tonda di diametro 30 mm, spessore 3 mm e con J/W_m pari a 782.49 mm^3 .
2. Tubo a sezione quadrata di lato 27 mm, spessore 2 mm e con J/W_m pari a 776.54 mm^3
3. Tubo a sezione quadrata di lato 24 mm, spessore 3 mm e con J/W_m pari a 787.50 mm^3

Per quanto riguarda il materiale, invece, in base alla tenacità si può scegliere fra

1. Acciaio alto resistenziale DOCOL800 DP con tenacità di 107.38 MPa, ma con un costo di 6.5 €/kg.
2. Acciaio inossidabile AISI 410 con tenacità di 104.56 MPa e un costo inferiore al precedente e pari a 0.9 €/kg.

Gli accoppiamenti possibili fra le sezioni e i materiali precedentemente scelti portano ad avere i seguenti ingombri e costi delle configurazioni:

Tabella 9. 4: Possibili configurazioni del punto di ottimo.

Sezione	W_m [mm]	Materiale	Costo [Euro/pz]	Costo, W_m inferiori ai limiti?
Tonda 30x3 [mm ²]	30	DOCOL800DP	5.38	
		AISI 410	2.69	Sì
Quadrata 27x27x2 [mm ³]	27	DOCOL800DP	5.10	
		AISI 410	2.98	Sì
Quadrata 24x24x3 [mm ³]	24	DOCOL800DP	4.71	Sì
		AISI 410	2.04	Sì

Dunque, per vedere se esiste una configurazione ottima fra quelle che rispettano i vincoli di costo e ingombro riportate nella Tabella 9.3, è necessario svolgerne le simulazioni. Nella Tabella 9.5 si riportano le caratteristiche delle configurazioni che effettivamente possono andare bene:

Tabella 9. 5: Possibili soluzioni ottime per autovetture di media gamma.

Sim.	Materiale	W/V [MPa]	Sezione	J/W_m [mm ³]
30	AISI 410	104.56	Tonda 30x3 [mm ²]	782.49
31	AISI 410	104.56	Quadrata 27x27x2 [mm ³]	776.54
32	AISI 410	104.56	Quadrata 24x24x3 [mm ³]	787.50
33	DOCOL800DP	107.38	Quadrata 24x24x3 [mm ³]	787.50

Prima di mostrare i risultati ottenuti, è bene riportare, nella Tabella 9.6, le caratteristiche del nuovo materiale utilizzato, l'AISI 410.

Tabella 9. 6: Caratteristiche AISI 410.

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	Costo [€/kg]
AISI 410	7.75	210000	0.28	542	293	27	763.07	0.24	0.90

Nella Figure 9.Si riporta poi la curva di incrudimento ricavata da importare nel software.

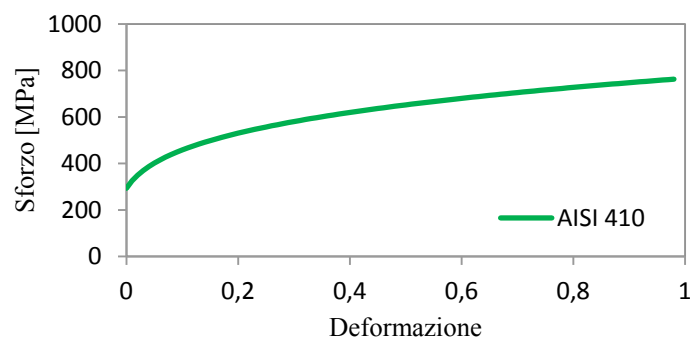


Figura 9. 4: Curva d'incrudimento AISI 410.

Ora è dunque possibile mostrare i risultati ottenuti per le simulazioni svolte:

- *Simulazioni 30, 31, 32*: tubo in AISI 410 rispettivamente con sezione tonda di diametro 30 mm e spessore 3 mm, con sezione quadrata di lato 27 mm e spessore 2 mm e con sezione quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm. Il legame Forza-Deflessione è riportato nella Figura 9.5:

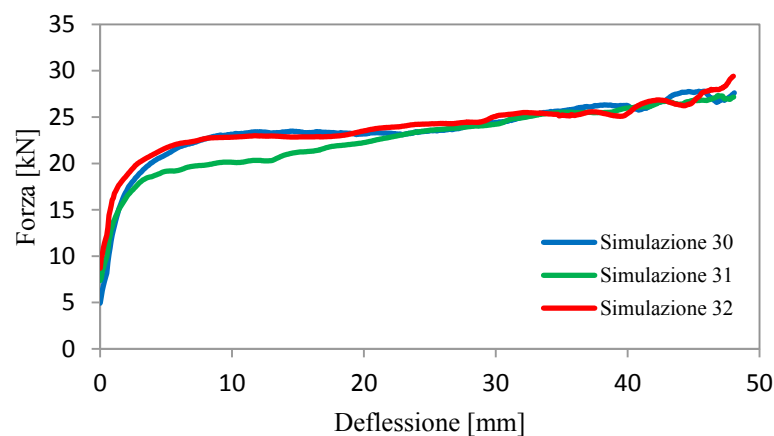


Figura 9. 5: Legami Forza-Deflessione per le simulazioni 30, 31, 32.

I valori delle principali grandezze d'interesse vengono riportati nella Tabella 9.7:

Tabella 9. 7: Risultati delle simulazioni 30, 31 32.

	<i>Simulazione 30</i>	<i>Simulazione 31</i>	<i>Simulazione 32</i>
M [g]	533.57	442.46	511.88
W_m [mm]	30	27	24
P_{medio} [kN]	23.63	27.33	23.86
P_{max} [kN]	27.80	22.72	29.41
η	0.85	0.83	0.81
E_{abs} [kNmm]	1134.31	1090.36	1145.41
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2125.89	2464.30	2237.67
Y_{48} [N/mmkg]	1255.17	1580.63	1576.18
Y'_{48} [N/kg]	37655.02	42676.88	37828.37
Costo [€/pz]	2.69	2.98	2.04

- *Simulazione 33*: tubo in DOCOL800DP con sezione quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm. Il legame Forza-Deflessione è riportato nella Figura 9.6, mentre i parametri d'interesse nella Tabella 9.8.

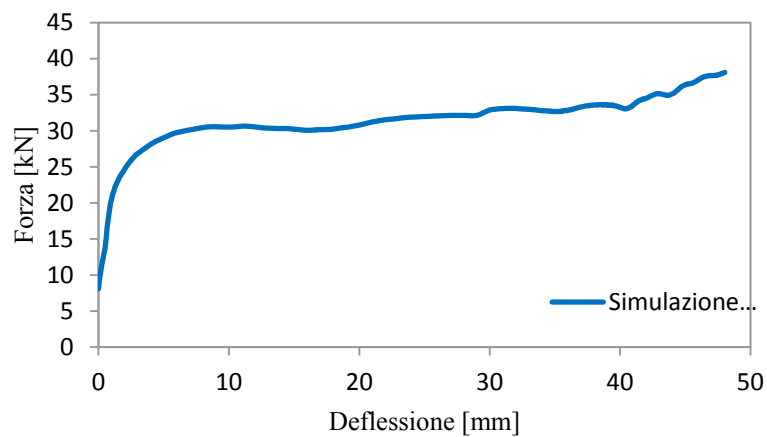


Figura 9. 6: Legami Forza-Deflessione per la simulazione 33.

Tabella 9. 8: Risultati della simulazione 33.

	<i>Simulazione 33</i>
M [g]	519.13
W_m [mm]	24
P_{medio} [kN]	38.10
P_{max} [kN]	31.39
η	0.82
E_{abs} [kNmm]	1506.87
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2902.65
Y_{48} [N/mmkg]	2076.33
Y'_{48} [N/kg]	49831.87
Costo [€/pz]	4.71

Confrontando tutti i valori dell'indice Y'_{48} ottenuti dalle quattro simulazioni (Tabella 9.9), si nota che il valore più alto appartiene alla *simulazione 33*, che presenta una sezione quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm, in DOCOL800DP.

Tabella 9. 9: Valori di Y'_{48} delle simulazioni 30, 31, 32 e 33.

	Y'_{48} [N/kg]
<i>Simulazione 30</i>	37655.02
<i>Simulazione 31</i>	42676.88
<i>Simulazione 32</i>	37828.37
<i>Simulazione 33</i>	49831.87

Questo acciaio alto-resistenziale corrisponde al materiale ottimo ricavato nel Capitolo 7 nel caso di ottimizzazione non vincolata e quindi anche a quello ricavato per le macchine di alta gamma.

Osservando inoltre tutte le configurazioni appartenenti al piano vincolato, riportate nell'Appendice 4, si nota che nessuna presenta un valore di Y'_{48} maggiore.

Di conseguenza, un tubo anti-intrusione con sezione quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm, in DOCOL800DP rappresenta la configurazione ottima per un'autovettura di media gamma. Nella Tabella 9.10 si riportano le principali caratteristiche della configurazione ottima ricavata.

Tabella 9. 10: Caratteristiche della configurazione ottima per un'autovettura di media gamma.

Sezione	Materiale	Costo [€/pz]	W_m [mm]	Y'_{48} [N/kg]
Quadrata 24x24x3 [mm ³]	DOCOL800DP	4.71	24	49831.87

9.1.3 Autovetture di bassa gamma

Nella Figura 9.7 si riporta la fascia di vincolo più ristretta, che comprende tubi con un ingombro inferiore a 25 mm e con un costo inferiore ai 2.50 €/pz.

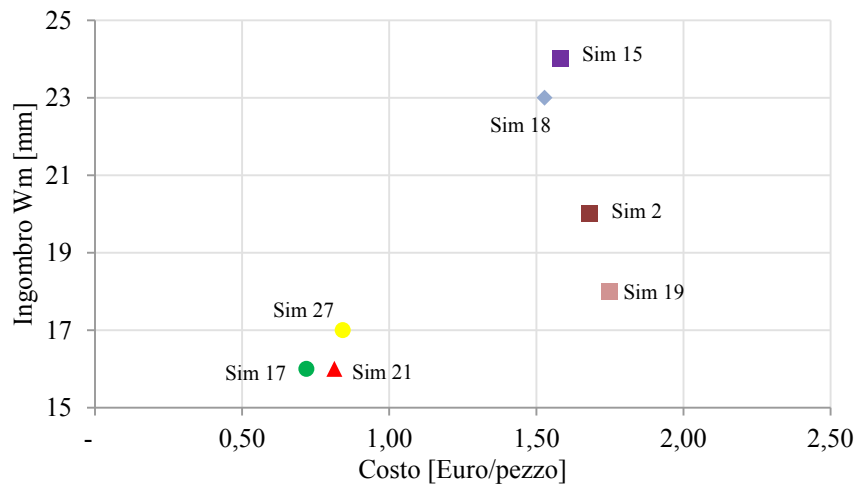


Figura 9. 7: Mappa delle simulazioni valide per le autovetture di bassa gamma.

In **Appendice 4** si riportano le principali caratteristiche delle simulazioni presenti in questa area.

In questo caso si procede con un ragionamento analogo a quello svolto per le autovetture di media gamma.

L'ottimo trovato senza l'imposizione dei vincoli nel Capitolo 7 corrispondeva a questi valori di tenacità e J/W_m :

$$\frac{W}{V} = 104.39 \text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 781.22 \text{ mm}^3$$

Tuttavia la geometria e i materiali corrispondenti alla configurazione ottima senza vincoli, ossia una sezione quadrata di lato 27 mm e spessore 2 mm , in acciaio DOCOL800DP, a causa del valore dell'ingombro e del costo, entrambi maggiori dei limiti superiori imposti, non è adatta.

L'unica possibile geometria della sezione con un ingombro minore o al più 25 mm potrebbe essere quadrata di lato 24 mm e spessore 3 mm (J/W_m pari a 787.50 mm^3).

Per quanto riguarda il materiale, invece, in base alla tenacità si può scegliere fra:

1. Acciaio alto resistenziale DOCOL800DP con tenacità di 107.38 MPa , ma con un costo di 6.5 €/kg .
2. Acciaio inossidabile AISI 410 con tenacità di 104.56 MPa e un costo inferiore al precedente e pari a 0.9 €/kg .

Di conseguenza l'unica possibile configurazione viene riportata nella Tabella 9.11.

Tabella 9. 11: Possibile soluzione ottima per autovetture di bassa gamma.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	$\frac{W}{V}$ [MPa]	<i>Sezione</i>	$\frac{J}{W_m}$ [mm ³]
32	AISI 410	104.56	Quadrata 24x24x3 [mm ³]	787.50

Tuttavia i risultati ottenuti dalla *simulazione* 32 non sono stati soddisfacenti, visto che il valore ricavato di Y'_{48} è pari a 37828.37 N/kg . Questo valore infatti, se paragonato con quelli ricavati dalle simulazioni ottime precedentemente trovate, non è sufficientemente alto.

Di conseguenza si è deciso di cercare un nuovo ottimo, togliendo dalla superficie di previsione del metamodello, riportata nella Figura 7.12, una circonferenza attorno all'ottimo ricavato senza vincoli, in modo da poter calcolare il nuovo ottimo della superficie. Il raggio della circonferenza tolto è circa il 10% dello spazio di progetto della variabile J/W_m .

Ecco dunque i valori del nuovo ottimo ricavato, visibile anche in Figura 9.8 in rosso:

$$\frac{W}{V} = 129.29\text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 288.97\text{ mm}^3$$

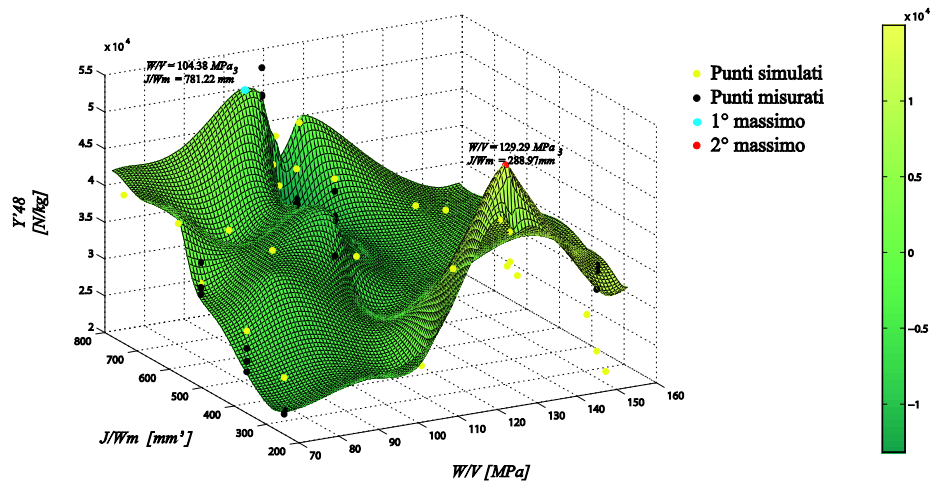


Figura 9. 8: Valori del nuovo punto di ottimo; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.

Per cui il materiale e la geometria della sezione del tubo adatti al nuovo punto di ottimo, sono quelli della *simulazione 27*, svolta in precedenza nel Capitolo 7. Si tratta infatti, di una sezione quadrata di lato 17 mm e spessore 2.5 mm , in acciaio AISI 9255. L'ingombro della sezione dunque è inferiore a 25 mm , mentre il costo è di 0.84 €/pz . Il valore di Y'_{48} corrispondente è 42448.92 N/kg . Le principali caratteristiche sono riassunte nella Tabella 9.12.

Tabella 9. 12: Caratteristiche della configurazione ottima per un'autovettura di bassa gamma.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	W/V [MPa]	<i>Sezione</i>	J/W_m [mm ³]
27	AISI 9255	129.38	Quadrata 17x17x2.5 [mm ³]	307.77

9.2 Scenario calibrato

Come anticipato, per lo scenario di simulazione calibrato si riportano soltanto le tre configurazioni ottime ricavate, poiché il procedimento svolto è simile a quello precedente (Tabella 9.13).

Tabella 9. 13: Configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma nello scenario calibrato.

<i>Sim.</i>	<i>Gamma macchina</i>	<i>Sezione</i>	<i>Materiale</i>	<i>Costo [€/pz]</i>	W_m [mm]	Y'_{48} [N/kg]
34	<i>Alta</i>	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	AISI 6150	2.81	27	52712.46
34	<i>Media</i>	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	AISI 6150	2.81	27	52712.46
36	<i>Bassa</i>	<i>Quadrata</i> 25x25x2.5 [mm ³]	AISI 6150	2.19	25	50906.85

Si nota come l'ottimo vincolato, ricavato per le autovetture di alta gamma, sia uguale sia a quello ricavato per le autovetture di media gamma, sia all'ottimo non vincolato ottenuto nel Capitolo 8. Infatti per lo scenario calibrato, il materiale ottimo non vincolato è un AISI 6150, materiale meno costoso rispetto all'acciaio alto-resistenziale DOCOL800DP. Di conseguenza nella *simulazione 34* (riportata nella Tabella 9.13) il costo del tubo ottenuto è basso e adatto anche al vincolo di costo posto per le autovetture di media gamma. Allo stesso modo anche l'ingombro di 27 mm è basso e adatto per le autovetture di media gamma. Diversamente da quanto ricavato nello scenario non calibrato, anche per le autovetture di bassa gamma, si è riusciti a trovare una configurazione di geometria e materiale con valori di tenacità e J/W_m vicini a quelli dell'ottimo non vincolato del Capitolo 8.

Tabella 9. 14: Caratteristiche della configurazioni ottime per lo scenario calibrato.

<i>Sim.</i>	<i>Gamma autovettura</i>	<i>Materiale</i>	W/V [MPa]	<i>Sezione</i>	J/W_m [mm ³]
34	<i>Alta</i>	AISI 6150	114.57	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	776.54
34	<i>Media</i>	AISI 6150	114.57	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	776.54
36	<i>Bassa</i>	AISI 6150	114.57	<i>Quadrata</i> 25x25x2.5 [mm ³]	768.75

9.3 Confronto dei risultati ottenuti per i due scenari

In conclusione dell'ottimizzazione vincolata svolta, nelle Figure 9.9 e 9.10 si riportano le tre configurazioni ottime ricavate rispettivamente per lo scenario non calibrato e calibrato, mentre nella Tabella 9.13, le loro caratteristiche principali, uniti ai valori dell'indice di performance ottenuti.

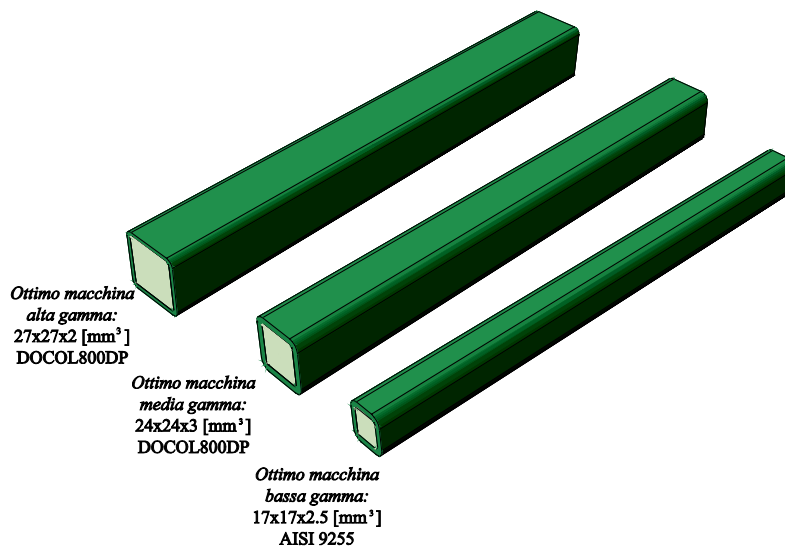


Figura 9. 9: Configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma per lo scenario non calibrato.

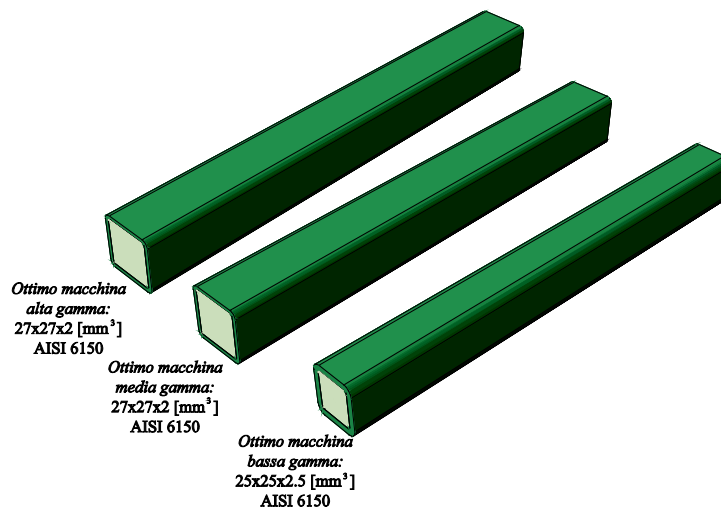


Figura 9. 10: Configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma per lo scenario calibrato.

Si vede come nei due scenari analizzati, per autovetture di alta gamma la configurazione geometrica ottima sia uguale, ma diverso il materiale, come già osservato nei Capitolo 7 e 8. Per le autovetture di media e bassa gamma, invece, sia le caratteristiche geometriche che i materiali, fra i due scenari sono differenti. Tuttavia per questa gamma i valori di tenacità e J/W_m , sono sempre molto simili fra i due scenari, contrariamente a quanto accade per autovetture di bassa gamma.

Tabella 9. 15: Riassunto configurazioni ottime ricavate per autovetture di alta, media e bassa gamma nei due scenari .

<i>Scenario</i>	<i>Gamma autovettura</i>	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]	<i>Sezione</i>	<i>Materiale</i>	<i>Costo</i> [€/pz]	W_m [mm]	Y'_{48} [N/kg]
<i>Non Calibrato</i>	<i>Alta</i>	776.54	107.38	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	DOCOL 800DP	5.10	27	54200
<i>Non Calibrato</i>	<i>Media</i>	787.50	107.38	<i>Quadrata</i> 24x24x3 [mm ³]	DOCOL 800DP	4.71	24	49831
<i>Non Calibrato</i>	<i>Bassa</i>	307.77	129.38	<i>Quadrata</i> 17x17x2.5 [mm ³]	AISI 9255	0.84	17	42448
<i>Calibrato</i>	<i>Alta</i>	776.54	114.57	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	AISI 6150	2.81	27	52712
<i>Calibrato</i>	<i>Media</i>	776.54	114.57	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	AISI 6150	2.81	27	52712
<i>Calibrato</i>	<i>Bassa</i>	768.75	114.57	<i>Quadrata</i> 25x25x2.5 [mm ³]	AISI 6150	2.19	25	50906

Capitolo 10

Ampliamento del Piano Sperimentale

Nella parte finale di questo studio sono state effettuate altre due serie di prove sperimentali di flessione su tre punti da aggiungere allo “Scenario di simulazione calibrato”. Si è cercato di scegliere geometrie e materiali tali da collocarle in zone della superficie di previsione fornita dal metamodello in cui vi è la mancanza di punti ad “Alta Risoluzione”. In questo modo si vuole andare a vedere se, con l’arricchimento del piano sperimentale, la soluzione di ottimizzazione fornita dal metamodello cambia.

Si riporta, dunque, il piano $W/V - J/W_m$ dello scenario di simulazione calibrato, in cui sono rappresentati tutti i punti sperimentali iniziali, indicandone la forma della sezione e il materiale (Figura 10.1):

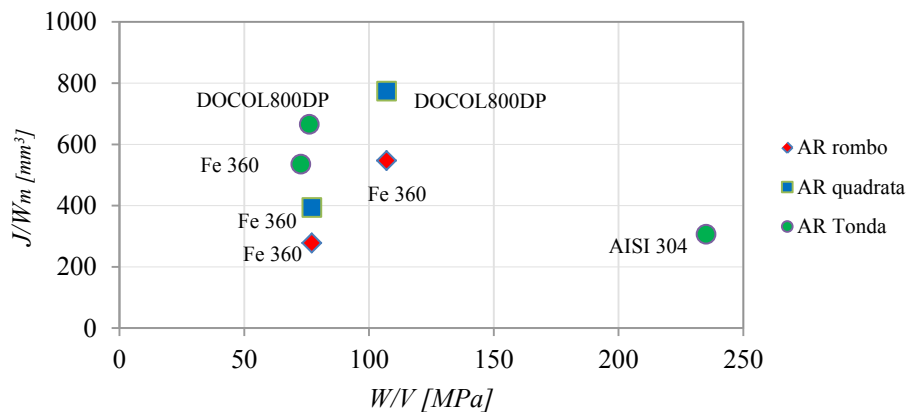


Figura 10. 1: Punti sperimentali nel piano $W/V - J/W_m$ dello scenario di simulazione calibrato.

Basandosi sulla Figura 10.1 e sull’effettiva reperibilità dei componenti, i materiali e le geometrie dei tubi scelti per le nuove prove sperimentali sono:

- Per la prima serie di prove tubi in acciaio alto-resistenziale DOCOL600DP con sezione tonda di diametro 25 mm e spessore 1.2 mm (*Condizione sperimentale 8*)
- Per la seconda serie di prove tubi in acciaio inossidabile AISI 316L con sezione tonda di diametro 26.9 mm e spessore 3 mm (*Condizione sperimentale 9*)

Il posizionamento di queste configurazioni all’interno del piano $W/V - J/W_m$, viene mostrato nella Figura 10.2.

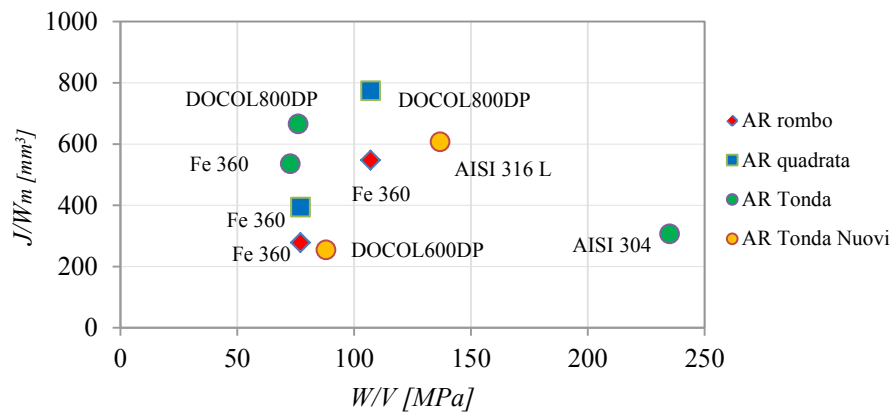


Figura 10. 2: Nuovi punti sperimentali nel piano W/V - J/W_m dello scenario di simulazione calibrato

Si riporta una tabella che riassume le principali caratteristiche delle nuove configurazioni testate.

Tabella 10. 1: Caratteristiche dei nuovi punti sperimentali.

Condizione sperimentale	Diametro [mm]	Spessore [mm]	W_m [mm]	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]
8	25	1.2	25	254.76	87.88
9	26.9	3	26.9	607.31	136.73

Si procede con la descrizione dello svolgimento delle prove sperimentali e dei risultati ottenuti.

10.1 Realizzazione del riempimento di schiuma

Il metodo usato per il riempimento del tubo di schiuma è quello diretto. In questo modo il precursore di schiuma, Al6061, viene inserito all'interno del tubo e l'assieme, una volta chiuse le due estremità laterali, viene scaldato nel forno fino a quando il processo di schiumatura non è terminato. Il tubo contenente la schiuma, una volta estratto dal forno, deve essere raffreddato mediante un sistema ad aria compressa. Si analizza ora il processo in modo più dettagliato.

Dopo aver tagliato i tubi in pezzi da 250 mm di lunghezza, la prima fase consiste nella pulizia con l'alcool della loro superficie interna ed esterna, per eliminare i residui provenienti dalle precedenti lavorazioni.

Nella seconda fase si deve calcolare la lunghezza del precursore da inserire all'interno del tubo per ottenere la densità della schiuma desiderata. In questo caso per entrambe le prove sperimentali da effettuare si vuole ottenere una densità della schiuma circa pari a 0.56 kg/dm^3 , valore utilizzato nelle simulazioni e anche nelle precedenti sette serie di prove effettuate da Villa [1]. Essendo nota la densità desiderata e calcolando il volume interno effettivo del tubo che la schiuma andrà ad occupare, curandosi di sottrarvi lo spazio occupato dai tappi, si può ricavare la massa del precursore. Per conoscere il valore della sua lunghezza, è sufficiente moltiplicare la massa del precursore per la densità lineare della schiuma usata, 0.23 g/mm .

Tabella 10. 2: Caratteristiche dei precursori usati per i sei tubi testati.

N° Tubo	Lunghezza Tappo A [mm]	Lunghezza Tappo B [mm]	Volume interno tubo [cm ³]	Massa precursore [g]	Lunghezza Precursore [mm]
25 02	10.35	10.4	89.73	50.25	220.96
25 03	10.4	10.1	89.91	50.35	221.39
25 04	10.95	10.3	89.59	50.17	220.62
27 01	10.85	10.65	89.40	46.55	204.69
27 02	10.45	10.85	89.50	46.60	204.91
27 03	11.15	11.3	89.02	46.36	203.83

La terza fase consiste nella preparazione dell'assieme tubo-schiuma. A circa 12 mm da una estremità del tubo è stata posizionata una *Termocoppia di tipo K* per il controllo della temperatura. Una volta trovato il precursore adatto ad ogni tubo, questo viene posizionato all'interno, avendo l'accortezza di porlo in modo equidistante dal bordo in entrambe le estremità del tubo, ossia a 14 mm. Successivamente si passa alla chiusura delle estremità dei tubi per impedire durante la permanenza nel forno la fuoriuscita della schiuma stessa. Come sistema di chiusura, sono stati posizionati due tappi in acciaio inossidabile che rientrano all'interno del tubo di circa 1.5 mm (Figura 10.2). Come sistema di bloccaggio sono stati usati gancetti in acciaio inox, inseriti in tre forellini dal diametro di 1 mm fatti sulla superficie cilindrica del tubo in ciascuna estremità. In questo modo durante il processo di schiumatura i tappi vengono spinti verso l'esterno dalla schiuma stessa, andando in battuta contro i gancetti. Si procede poi, con la quarta fase, ovvero la marcatura dei tubi sull'estremità del tubo su cui è stata attaccata la termocoppia. Su questa estremità, che sarà poi, all'interno del forno, posizionata verso la porta, si è posizionata una lettera A, il valore del diametro del tubo e un numero progressivamente crescente che indica l'ordine in cui i tubi sono stati riempiti di schiuma (Figura 10.4).

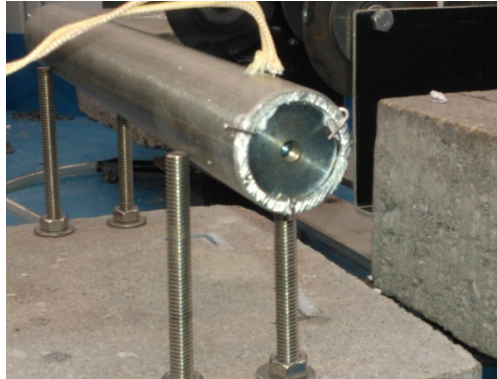


Figura 10. 3: Sistema di chiusura dei tubi.



Figura 10. 4: Marcatura dei tubi.

Si passa infine alla penultima fase: il posizionamento dei componenti nel forno. Il forno utilizzato è un forno da laboratorio della *Nabertherm modello LT 9/11 HA*.



Figura 10. 5: Forno Nabertherm LT9/11HA.

Tuttavia, per garantire il corretto trasferimento di calore ai componenti, prima di inserire l'assieme nel forno, è stato necessario attendere che quest'ultimo arrivasse al completo regime termico, in modo da permettere che le pareti e tutti gli elementi al suo interno avessero la stessa temperatura di quella di prova. La temperatura del forno usata è 750°C , mentre il tempo di schiumatura è di circa 8 minuti per i tubi in DOCOL600DP e di circa 13 minuti per i tubi in AISI 3316L. All'interno del forno, il pezzo è stato posizionato su un appoggio posto in diagonale, che minimizza il contatto con la superficie esterna del tubo, in modo da ridurre lo scambio di calore per conduzione a favore di quello per convezione e irraggiamento (Figura 10.7a). Si ottiene così un riscaldamento più uniforme del tubo. Il tubo inoltre, è stato posizionato in modo da lasciare la saldatura sull'asse neutro e in modo da rimanere rigorosamente orizzontale per ottenere una distribuzione il più uniforme possibile della schiuma. L'estremità con marcata la lettera A è stata messa verso la porta.

Durante il processo, la termocoppia posizionata sul tubo ha permesso di vedere l'andamento della temperatura. A tale proposito si riportano, nella Figura 10.3, le curve ricavate per entrambe le tipologie di tubi testati. Il tubo denominato "A 25 01" è in DOCOL600DP, mentre quello denominato "A 27 01" è in AISI 316L.

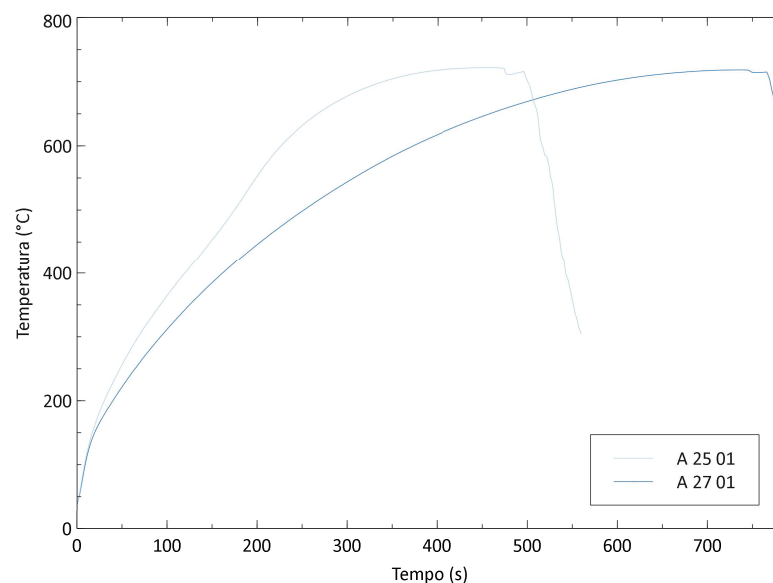


Figura 10. 6: Andamento della temperatura durante il processo di schiumatura.

Si passa infine alla fase cinque: raffreddamento del tubo riempito di schiuma. Una volta terminato il processo di schiumatura, l'assieme tubo-schiuma è stato tolto dal forno e posizionato sul sistema di raffreddamento con aria compressa a 4.8 bar. Durante questa fase è importante che il tubo appena schiumato rimanga

orizzontale per garantire una distribuzione uniforme della schiuma. Infine sono stati tolti i tappi alle estremità (Figura 10.7b).



Figura 10. 7: a) Sistema d'appoggio nel forno. b) Sistema di raffreddamento.

10.2 Prove di flessione su tre punti

Una volta riempiti i tubi con la schiuma d'Alluminio, sono stati eseguiti test di flessione su tre punti, confrontandoli anche con il comportamento degli stessi tubi senza riempimento di schiuma.

Per quanto riguarda le prove di flessione, la macchina di prova utilizzata è stata una pressa della *MTS modello Alliance RT/100* da 100kN, macchina precedentemente usata per le prove di Villa [1].

Come si può notare dalla Figura 10.8, vi è un penetratore di diametro 20 mm e, sopra esso, una cella di carico da 100kN.

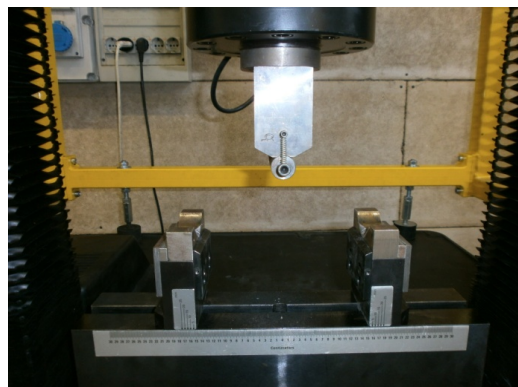


Figura 10. 8: Pressa per il test di flessione su tre punti.

Il sistema di appoggio dei tubi è costituito da due supporti che distano 150 mm fra loro, distanza ottenibile mediante la barra graduata presente sulla base della macchina. Le prove sono state eseguite fornendo sempre un precarico di 50 N e impostando una velocità di discesa del penetratore pari a 500 mm/min , che corrisponde a circa 100 volte a quella impostata nelle simulazioni. Il fine corsa è stato stabilito pari a 54 mm , anche se poi i dati saranno analizzati fino a 48 mm . I tubi sono stati appoggiati posizionando il lato con la marcatura sempre verso destra, la linea di saldatura sull'asse neutro e cercando di porre la metà esatta sotto il penetratore. Alla fine della prova, durata circa 6 secondi, si è ottenuta la seguente configurazione deformata (Figura 10.9b):

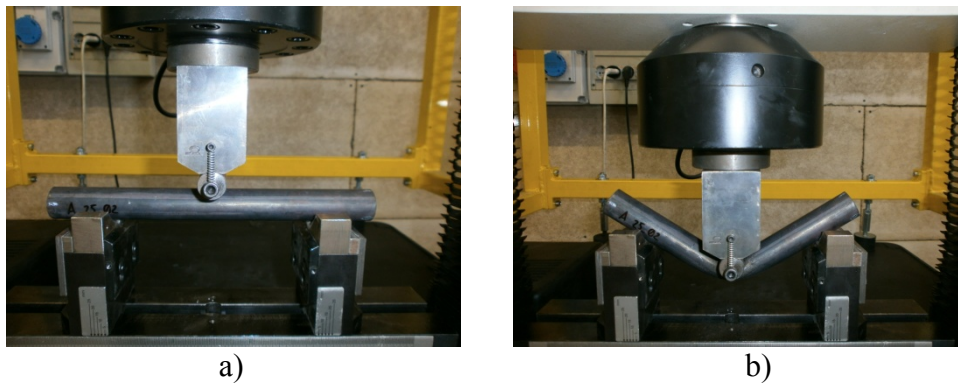


Figura 10. 9: a) Configurazione prima del test. b) Configurazione dopo il test.

La macchina di prova come risultati fornisce la curva Forza–Deflessione di ciascun tubo testato.

Si riporta una tabella riassuntiva delle configurazioni e dei materiali dei tubi testati:

Tabella 10. 3: Configurazioni testate nella prova di flessione.

Configurazione	Materiale	Sezione		N°tubi testati
		D [mm]	S [mm]	
Vuota	DOCOL600DP	25	1.2	3
	AISI 316	26.9	3	3
Riempimento schiuma	DOCOL600DP	25	1.2	3
	AISI 316	26.9	3	3

10.2.1 Risultati sperimentali per i tubi in DOCOL600DP

Per questa serie di prove sono stati testati tubi con sezione tonda con diametro di 25 mm e spessore di 1.2 mm in acciaio alto-resistenziale DOCOL600DP. Le configurazioni testate sono state due:

- Tubi vuoti
- Tubi riempiti di schiuma d'alluminio 6061.

Si riportano le principali caratteristiche dei sei tubi testati (Tabella 10.4):

Tabella 10. 4: Caratteristiche tubi in DOCOL600DP testati.

<i>tubo</i>	<i>Tipo</i>	ρ [kg/dm ³]	<i>M</i> [g]
E 25 01	vuoto	-	188.52
E 25 02	vuoto	-	189.32
E 25 03	vuoto	-	188.24
A 25 02	Riempito di schiuma	0.562	239.77
A 25 03	Riempito di schiuma	0.561	238.08
A 25 04	Riempito di schiuma	0.563	238.98

Per cui per ogni configurazione testata si ottengono tre curve Forza–Deflessione, riportate nella Figura 10.10.

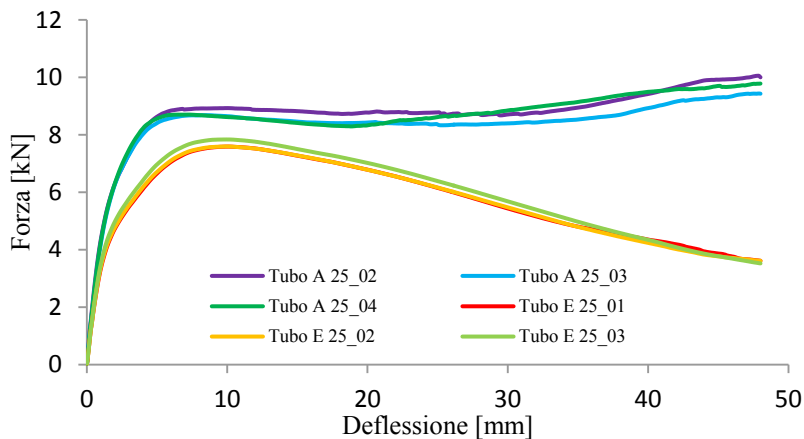


Figura 10. 10: Legame Forza-Deflessione per tubi vuoti e riempiti di schiuma DOCOL600DP.

Si nota subito l'effetto dato dalla presenza del riempimento di schiuma sull'aumento di assorbimento d'energia in fase di deformazione. Infatti le curve ricavate dalle configurazioni riempite, non solo sono più alte rispetto a quelle delle configurazioni vuote, ma sono anche più piatte, avvicinandosi così al tipico andamento di un assorbitore d'energia ideale.

Si riportano nella Tabella 10.5, i principali parametri d'interesse per ciascuno dei sei tubi testati.

Tabella 10. 5: Risultati dei tubi testati DOCOL600DP.

$n^{\circ}tubo$	E 25 01	E 25 02	E 25 03	A 25 02	A 25 03	A 25 04
$\rho_f [kg/dm^3]$	-	-	-	0.562	0.561	0.563
$\rho_{acciaio} [kg/dm^3]$	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
$M [g]$	188.52	189.32	188.24	239.77	238.08	238.98
$\delta l_{max} [mm]$	48	48	48	48	48	48
$W_m [mm]$	25	25	25	25	25	25
$P_{medio} [kN]$	5.53	5.51	5.69	8.45	8.10	8.33
$P_{max} [kN]$	7.59	7.60	7.84	10.06	9.44	9.78
η	0.73	0.73	0.73	0.84	0.86	0.85
$E_{abs} [kNmm]$	265.42	264.58	273.29	405.78	388.97	400.02
$S.E.A. [kNmm/kg]$	1407.93	1403.43	1449.62	1692.37	1633.77	1673.85
$Y_{48} [N/mmkg]$	854.78	848.77	877.48	1185.60	1169.21	1188.35
$Y'_{48} [N/kg]$	21369.58	21219.20	21936.96	29639.89	29230.33	29708.77

Infatti come dimostrazione del beneficio fornito dalla schiuma vi è un netto aumento del coefficiente Y'_{48} . Per analizzare meglio il miglioramento del comportamento a flessione dovuto alla presenza della schiuma, si analizzino i due comportamenti medi a flessione.

Attraverso un programma creato in MatLab e riportato nell'**Appendice 5**, è possibile mediare le tre curve ricavate dalle prove di flessione, ricampionando prima i valori dei tre vettori di forza attraverso una interpolazione, fissato un vettore di spostamento.

Le curve medie ottenute vengono riportate nella Figura 10.11.

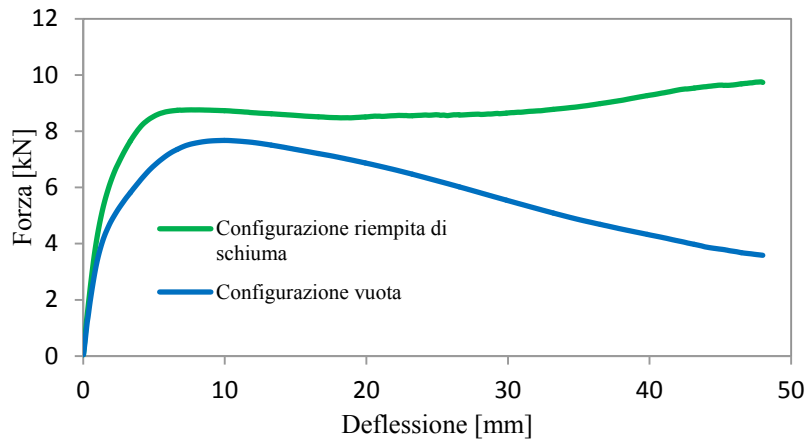


Figura 10. 11: Legame Forza-Deflessione medio per tubi vuoti e riempiti di schiuma DOCOL600DP.

Ora il miglioramento è ben evidente. A dimostrazione di questo, si riportano i principali parametri ricavati per le due configurazioni (Tabella 10.6).

Tabella 10. 6: Risultati medi dei tubi testati DOCOL600DP.

	<i>Tubi vuoti</i>	<i>Tubi riempiti di schiuma</i>
ρ_f [kg/dm ³]	-	0.562
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	7.8	7.8
M [g]	188.70	238.94
δl_{max} [mm]	48	48
W_m [mm]	25	25
P_{medio} [kN]	5.58	8.30
P_{max} [kN]	7.67	9.76
η	0.73	0.85
E_{abs} [kNmm]	267.76	398.25
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1420.33	1666.66
Y_{48} [N/mmkg]	860.34	1181.05
Y'_{48} [N/kg]	21508.58	29526.33

La configurazione riempita comporta un aumento del 27.15% della forza massima e del 37.28% della forza media rispetto alla configurazione vuota. Per quanto riguarda l'efficienza energetica e la $S.E.A.$ si ha un aumento rispettivamente del 17% e del 48.74%. Soprattutto si nota come l'energia

assorbita sia quasi raddoppiata con l'inserimento della schiuma grazie all'aumento del carico medio a pari deformazione, mostrando un aumento del 48% rispetto alla configurazione vuota. Infine l'indice Y'_{48} è aumentato del 37.28%.

10.2.2 Risultati sperimentali per i tubi in AISI 316L

Per questa serie di prove sono stati testati tubi con sezione tonda con diametro di 26.9 mm e spessore di 3 mm in acciaio inossidabile AISI 316L. Le configurazioni testate sono state due:

- Tubi vuoti
- Tubi riempiti di schiuma d'alluminio.

Si riportano le principali caratteristiche dei sei tubi testati nella Tabella 10.7:

Tabella 10. 7: Caratteristiche tubi in AISI 316L testati.

<i>Tubo</i>	<i>Tipo</i>	ρ [kg/dm ³]	<i>M</i> [g]
<i>E 27 01</i>	<i>vuoto</i>	-	405.36
<i>E 27 02</i>	<i>vuoto</i>	-	405.21
<i>E 27 03</i>	<i>vuoto</i>	-	404.65
<i>A 27 01</i>	<i>Riempito di schiuma</i>	0.571	452.85
<i>A 27 02</i>	<i>Riempito di schiuma</i>	0.570	452.26
<i>A 27 03</i>	<i>Riempito di schiuma</i>	0.573	452.80

Anche in questo caso si sono ricavate tre curve Forza-Deflessione per ogni configurazione testata (Figura 10.12).

In questo caso non si osserva una particolare differenza fra le curve rappresentanti il comportamento a flessione dei tubi vuoti e quelle dei tubi riempiti di schiuma. L'energia assorbita durante la deformazione è leggermente maggiore nel caso di tubi riempiti con la schiuma grazie a un piccolo aumento dei valori di forza nella parte finale dello spostamento, ma nel complesso il comportamento è simile. Infatti è bene considerare che la geometria dei tubi in esame presenta uno spessore elevato rispetto al diametro, per cui è opportuno non aspettarsi un elevato miglioramento del comportamento a flessione con l'inserimento della schiuma d'alluminio.

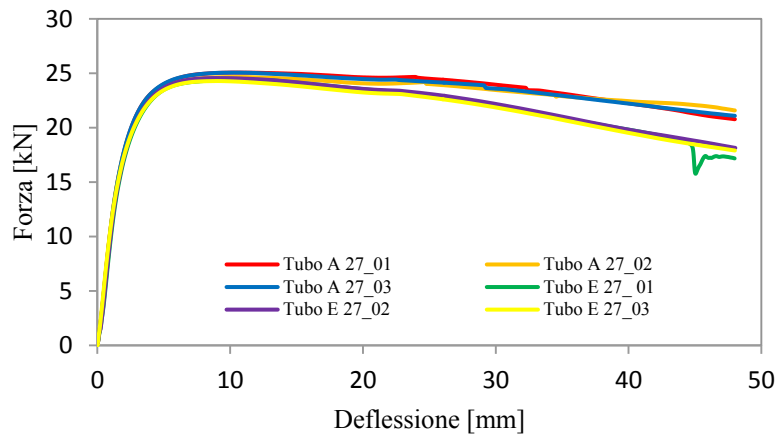


Figura 10. 12 : Legame Forza-Deflessione per tubi vuoti e riempiti di schiuma AISI 316L.

Si riportano ora i principali parametri d'interesse per ciascuno dei sei tubi testati.

Tabella 10. 8: Risultati dei tubi testati AISI 316L.

$n^{\circ}tubo$	E 27 01	E 27 02	E 25 03	A 27 01	A 27 02	A 27 03
ρ_f [kg/dm ³]	-	-	-	0.571	0.570	0.573
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
M [g]				452.85	452.26	452.80
δl_{max} [mm]	48	48	48	48	48	48
W_m [mm]	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9	26.9
P_{medio} [kN]	20.81	20.99	20.67	22.27	22.08	22.19
P_{max} [kN]	24.38	24.56	24.69	25.06	24.65	25.06
η	0.85	0.85	0.85	0.89	0.90	0.89
E_{abs} [kNmm]	999.64	1007.389	992.09	1068.91	1060.02	1064.97
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2465.05	2486.64	2448.90	2360.40	2343.82	2351.97
Y_{48} [N/mmkg]	1629.37	1645.62	1613.98	1624.27	1626.05	1612.70
Y'_{48} [N/kg]	43830.08	44267.17	43416.15	43692.82	43740.62	43381.75

Si nota subito come i valori di Y'_{48} dei tubi vuoti siano simili a quelli dei tubi riempiti. Anche per quanto riguarda gli altri parametri non si notano differenze fra le due configurazioni. Per analizzare meglio il comportamento a flessione, si analizzino i due comportamenti medi ottenuti con MatLab.

Le curve medie ottenute vengono riportate nella Figura 10.13:

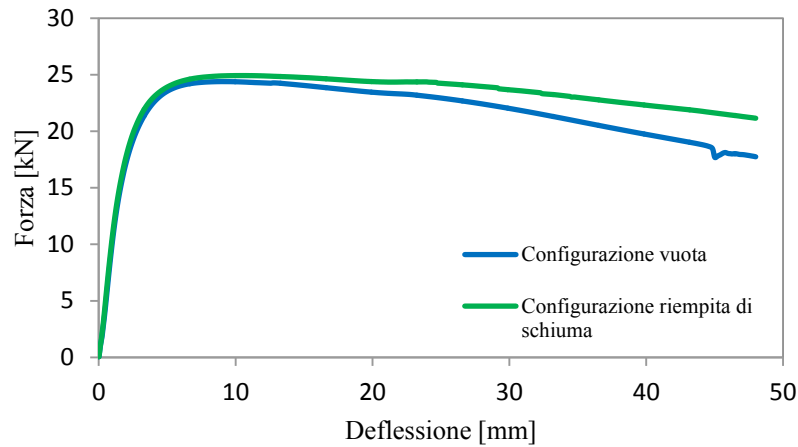


Figura 10. 13: Legame Forza-Deflessione medio per tubi vuoti e riempiti di schiuma AISI 316L.

Osservando i comportamenti medi si nota meglio quanto il miglioramento dovuto alla presenza della schiuma sia attenuato. Infatti osservando i principali parametri a confronto:

Tabella 10. 9: Risultati medi dei tubi testati AISI 316L.

	<i>Tubi vuoti</i>	<i>Tubi riempiti di schiuma</i>
ρ_f [kg/dm ³]	-	0.571
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	8.0	8.0
M [g]	405.07	452.64
δl_{max} [mm]	48	48
W_m [mm]	26.9	26.9
P_{medio} [kN]	20.82	22.18
P_{max} [kN]	24.81	24.93
η	0.85	0.89
E_{abs} [kNmm]	999.38	1064.63
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2466.86	2352.06
Y_{48} [N/mmkg]	1629.66	1621.01
Y'_{48} [N/kg]	43837.80	43605.06

Confrontando questi parametri si nota per la configurazione riempita un aumento circa pari al 2% per la forza massima e al 6% per la forza media rispetto alla configurazione vuota. Per quanto riguarda l'energia assorbita, questa aumenta soltanto del 6% per l'inserimento della schiuma, diversamente da quanto accadeva per i tubi in DOCOL600DP, meno spessi, in cui aumentava del 48%. Per gli indici $S.E.A.$ e Y'_{48} , invece, si nota perfino una piccola diminuzione dei valori dal caso vuoto a quello riempito. Infatti la $S.E.A.$ diminuisce del 4%, mentre Y'_{48} del 0.5%.

10.3 Simulazioni delle prove di flessione

Una volta effettuate le due serie di prove sperimentali si procede facendo le rispettive simulazioni del comportamento a flessione.

Sono state effettuate le simulazioni soltanto dei tubi riempiti di schiuma dal momento che si vuole studiare il comportamento di questa tipologia di componenti. Di conseguenza le simulazioni da eseguire sono due:

- Simulazione di un tubo riempito in schiuma Al 6061 con sezione tonda di diametro 25 mm e spessore 1.2 mm in acciaio alto-resistenziale DOCOL600DP
- Simulazione di un tubo riempito in schiuma Al 6061 con sezione tonda di diametro 26.9 mm e spessore 3 mm in acciaio inossidabile AISI 316L.

Si procede, dunque, una volta caratterizzati i materiali usati, col mostrare i risultati ottenuti, confrontandoli con quelli delle prove sperimentali.

10.3.1 Caratterizzazione dei materiali

Per quanto riguarda la caratterizzazione della schiuma si utilizzano nuovamente i parametri precedentemente illustrati nel Capitolo 6, dal momento che si tratta della stessa tipologia, Al6061.

I due materiali dei tubi, invece, sono nuovi: un acciaio inossidabile AISI 316L e un acciaio alto-resistenziale DOCOL600DP. Occupandoci di analizzare lo "Scenario di simulazione calibrato", in questo caso i valori di K e n , sono stati ottenuti, non analiticamente, ma cercando di ottenere una differenza percentuale minima fra l'indice di prestazione ottenuto dalle simulazioni e quello ricavato dalle prove sperimentali.

Le caratteristiche dei due materiali vengono riportate nella Tabella 10.10.

Tabella 10. 10: Caratteristiche DOCOL600DP e AISI 316L.

Acciaio	ρ [kg/dm ³]	E [MPa]	ν	R_m [MPa]	σ_{sn} [MPa]	A [%]	K [MPa]	n	W/V [MPa]
DOCOL600DP	7.80	190000	0.3	680	400	16	902.56	0.15	87.88
AISI316L	8.00	197000	0.3	800	341	28.5	964.78	0.25	136.73

Si riportano le curve d'incrudimento usate nella Figura 10.10:

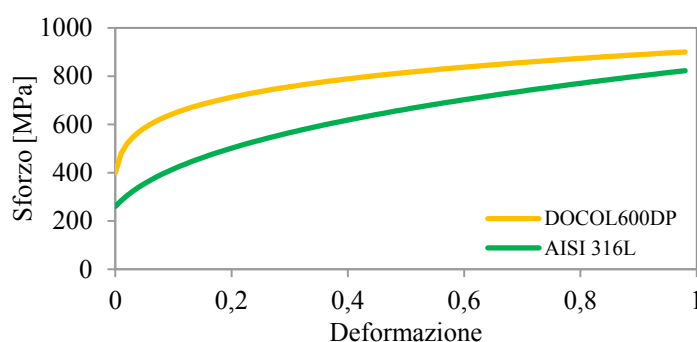


Figura 10. 14: Curve d'incrudimento DOCOL600DP e AISI316L.

10.3.2 Risultati delle simulazioni

Sono state eseguite le due simulazioni delle prove di flessione dei tubi riempiti in schiuma. Nella Tabella 10.11, si riportano le caratteristiche delle configurazioni testate.

In Figura 10.15, si riportano i risultati ottenuti per la *simulazione 38*, confrontando il legame Forza-Deflessione e i parametri d'interesse ottenuti con quelli ricavati dal comportamento medio della rispettiva condizione sperimentale (*Condizione sperimentale 8*). Si osserva che le due curve, per valori piccoli di deflessione, sono simili. Proseguendo nella deflessione, invece, i due andamenti tendono ad allontanarsi, comportando una sovrastima da parte della simulazione rispetto alla prova sperimentale. Tuttavia la differenza percentuale ottenuta sull'indice di prestazione Y'_{48} è buona, dal momento che è del 7.8%. Per gli altri parametri, invece, si hanno differenze percentuali maggiori, quasi doppie.

Tabella 10. 11: Caratteristiche delle simulazioni 38 e 39.

Sim.	Materiale	W/V [MPa]	Sezione	J/W_m [mm ³]
38	DOCOL600DP	87.88	Tonda 25x1.2 [mm ²]	254.76
39	AISI 316L	136.73	Tonda 26.9x3 [mm ²]	607.31

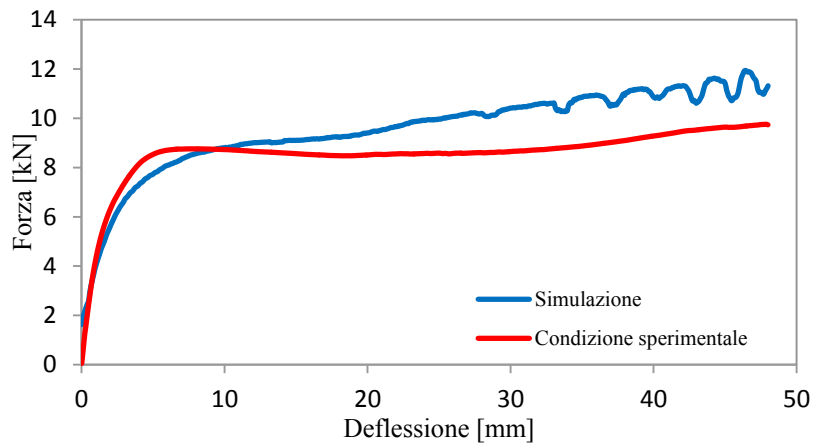


Figura 10. 15: Legame Forza-Deflessione per la simulazione 38.

Tabella 10. 12: Risultati della simulazione 38 e confronto con la rispettiva condizione sperimentale.

	Simulazione 38	Condizione sperimentale 8	Diff.%
M [g]	238.94	238.94	-
W_m [mm]	25	25	-
P_{medio} [kN]	9.53	8.30	14.82
P_{max} [kN]	11.94	9.76	22.36
η	0.80	0.85	-6.12
E_{abs} [kNmm]	457.45	398.25	14.87
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1914.50	1666.66	14.87
Y_{48} [N/mmkg]	1273.16	1181.05	7.80
Y'_{48} [N/kg]	31829.06	29526.33	7.80

Analizzando poi la simulazione 39, è stato ottenuto il seguente legame Forza-Deflessione.

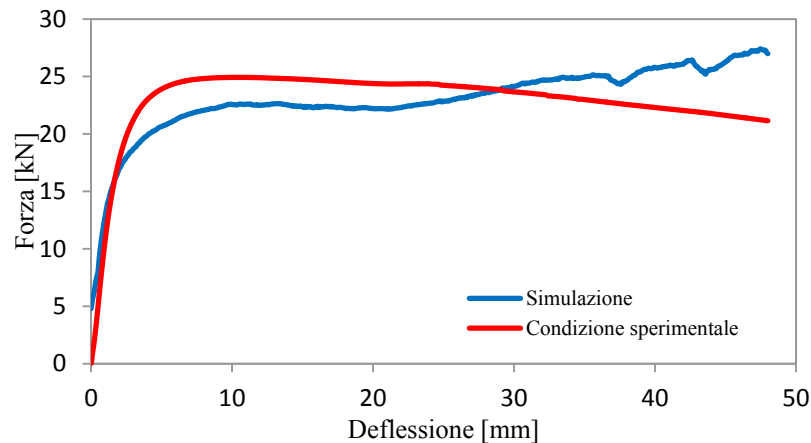


Figura 10. 16: : Legame Forza-Deflessione per la simulazione 39.

In questo caso, per valori bassi di deflessione, la curva di simulazione tende a sottostimare quella della condizione sperimentale, contrariamente a quanto accade per valori di deflessioni maggiori. Nella tabella 10.13 si riportano i risultati ottenuti.

Tabella 10. 13: Risultati della simulazione 39 e confronto con la rispettiva condizione sperimentale.

	<i>Simulazione 39</i>	<i>Condizione sperimentale 9</i>	<i>Diff.%</i>
M [g]	452.64	452.64	-
W_m [mm]	26.9	26.9	-
P_{medio} [kN]	22.97	22.18	3.57
P_{max} [kN]	27.40	24.93	9.90
η	0.84	0.89	-5.79
E_{abs} [kNmm]	1102.60	1064.63	3.57
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	2435.94	2352.06	3.57
Y_{48} [N/mmkg]	1581.78	1621.01	-2.42
Y'_{48} [N/kg]	42549.82	43605.06	-2.42

Per quanto riguarda l'indice di performance Y'_{48} , si vede come la differenza percentuale ricavata rispetto alla prova sperimentale sia bassa (2.42%). Anche

per le altre grandezze le differenze percentuali sono minori rispetto a quanto ricavato per il tubo in DOCOL600DP.

10.5 Ottimizzazione della nuova superficie di previsione

Una volta aggiunte le prove sperimentali e le rispettive simulazioni al contesto dello “Scenario calibrato”, si procede nuovamente con l’ottimizzazione del metamodello.

L’ottimo ricavato è rimasto sempre vicino al precedente. Infatti il metamodello ha fornito i seguenti valori ottimi di W/V e J/W_m :

$$\frac{W}{V} = 113.25 \text{ MPa} \quad \frac{J}{W_m} = 773.74 \text{ mm}^3$$

Nella Figura 10.17 si riporta la nuova superficie ottenuta, con il nuovo punto di ottimo.

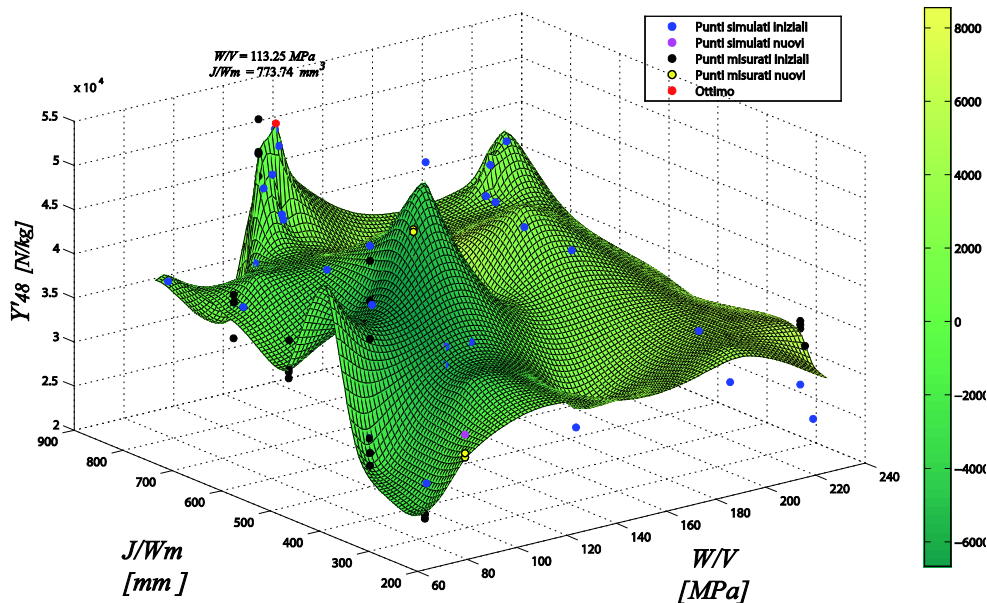


Figura 10. 17: Nuova superficie di previsione dello scenario calibrato; colormap: differenza fra la superficie ricavata con i punti ad Alta Risoluzione e quella ricavata con i punti a Bassa Risoluzione.

Ricordando infatti che l’ottimo ricavato nel Capitolo 8 per lo scenario di simulazione calibrato aveva una tenacità di 114.33 MPa e un J/W_m pari a 773.59 mm^3 , si osserva come effettivamente vi sia una differenza molto bassa.

Nella Figura 10.18 vengono sovrapposte le due superfici ricavate per lo scenario di simulazione calibrato: la superficie nera è quella ricavata inizialmente nel Capitolo 8, mentre quella verde è quella ricavata con l'ampliamento del piano sperimentale.

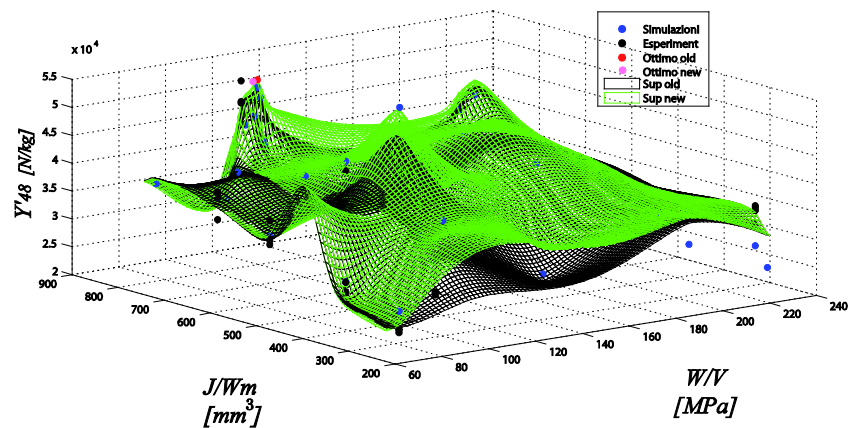


Figura 10. 18: Effetto dell'ampliamento del piano sperimentale sulle superfici di previsione dello scenario calibrato.

Si osserva come anche nella figura i due ottimi siano molto vicini. Nella Figura 10.19, viene riportato un ingrandimento della zona degli ottimi (*Cerchio rosso*). Nel cerchio azzurro, invece, si nota come la superficie di previsione nera sottostimi la verde. In questa zona, come è visibile nella figura, era stata seguita una simulazione in cui si era ottenuto un valore di Y'_{48} alto (Capitolo 8, *Simulazione 17*). Per cui con l'aggiunta dei punti sperimentali si osserva come la superficie sia più prossima a tale punto. Occorre inoltre osservare che il nuovo valore dell'indice di prestazione previsto in quel punto (53470 N/kg) è di poco inferiore a quello previsto nel punto di ottimo (54130 N/kg).

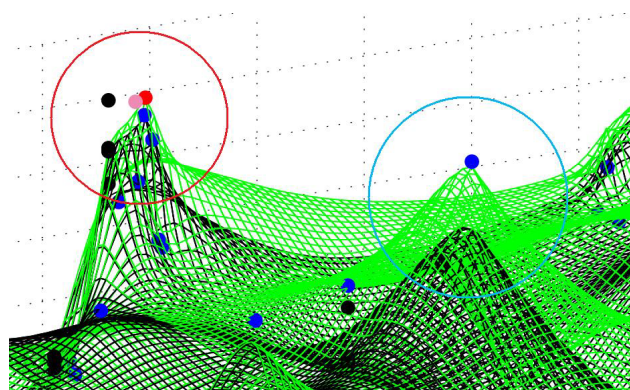


Figura 10. 19: Particolare delle superfici sovrapposte.

La conclusione che dunque si può trarre è che l'aggiunta dei punti sperimentali porta ad avere una superficie di previsione del metamodello più accurata, che potrebbe anche, ampliando nuovamente il piano sperimentale, modificare il suo punto di ottimo.

Capitolo 11

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è stata l'ottimizzazione delle caratteristiche di tubi anti-intrusione riempiti in schiuma d'alluminio, per massimizzare l'energia assorbita durante un urto laterale. In particolare, le caratteristiche ottimizzate sono state la tenacità del materiale e il rapporto fra il momento d'inerzia della sezione e il suo ingombro. Infatti l'ottimizzazione della prima permette di ricavare il materiale del tubo migliore, mentre l'ottimizzazione della seconda permette di trovare la forma e le dimensioni della sezione del tubo. Sono state eseguite due tipologie di ottimizzazioni: un'ottimizzazione libera e un'ottimizzazione vincolata dal costo e dall'ingombro della sezione. Lo strumento utilizzato per raggiungere questo obiettivo è stato un metamodella gerarchico, "*Metamodello Fusion*", che permette di utilizzare due fonti di dati di diversa accuratezza: le prove sperimentali come set di dati ad "*Alta Risoluzione*" e le simulazioni, come set di dati a "*Bassa Risoluzione*". Il metamodella, dunque, inizialmente crea una superficie di previsione basandosi solo sulle simulazioni, mentre poi in una seconda fase, modifica la superficie con l'aggiunta dei punti sperimentali. Il vantaggio che in teoria offre è dunque la possibilità di trascurare la calibrazione delle simulazioni, processo che richiede tempo e risorse. Di conseguenza per capire se effettivamente questo è possibile, sono stati analizzati due scenari di simulazione da ottimizzare, uno creato a partire da simulazioni non calibrate, l'altro al contrario creato a partire da simulazioni calibrate.

Eseguendo l'ottimizzazione non vincolata dei due scenari, il metamodella ha trovato risultati molto simili fra loro. Infatti i valori ottimi delle variabili di progetto J/W_m e W/V dei due scenari analizzati sono molto prossimi fra loro, in particolare per quanto riguarda J/W_m (Tabella 11.1). Infatti i valori di tenacità e di J/W_m ricavati per lo scenario non calibrato sono rispettivamente inferiori del 8.7% e superiori dello 0.9%, rispetto a quelli ottenuti per l'altro scenario. La differenza fra le due percentuali appena riportate, anche se minima, è probabilmente dovuta al fatto che fra i due scenari cambia soprattutto il range della variabile di progetto "Tenacità". Infatti nello scenario di simulazione non calibrato questo parte da 70 MPa e arriva a 160 MPa, mentre nello scenario calibrato parte da 60 MPa ma arriva a 240 MPa. Per quanto riguarda, invece, il range di valori che la variabile di progetto J/W_m può assumere, questo è simile per entrambi gli scenari di simulazione.

Tabella 11. 1: Punti di ottimo per i due scenari di simulazione analizzati.

<i>Scenario</i>	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]
<i>Non Calibrato</i>	781.22	104.38
<i>Calibrato</i>	773.59	114.33

Di conseguenza, le configurazioni ottime ricavate sono uguali dal punto di vista geometrico, ma di materiale differente. Sono infatti, entrambe quadrate con lato 27 mm e spessore 2 mm, ma il materiale per le simulazioni non calibrate è l'acciaio alto-resistenziale DOCOL800DP, mentre per le simulazioni calibrate è l'AISI 6150.

Tabella 11. 2: Riassunto delle configurazioni ottime ricavate nell'ottimizzazione non vincolata.

<i>Scenario</i>	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]	<i>Sezione</i>	<i>Materiale</i>
<i>Non Calibrato</i>	776.54	107.38	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	DOCOL800DP
<i>Calibrato</i>	776.54	114.57	<i>Quadrata</i> 27x27x2 [mm ³]	AISI6150

Dal momento che le soluzioni ottime ricavate sono simili per entrambi gli scenari si può concludere che nell'utilizzo di un metamodulo gerarchico, effettivamente la calibrazione delle simulazioni non riveste un ruolo di particolare importanza. Infatti si è giunti allo stesso risultato sia impiegando tempo per ricavare i parametri migliori per avere simulazioni più accurate, sia evitando questo passaggio.

È stata poi effettuata un'ottimizzazione vincolata dall'ingombro della sezione e dal costo del tubo riempito di schiuma. È stata ipotizzata una classificazione di autovetture in base alla gamma. Per autovetture di bassa gamma è stato definito un ingombro massimo di 25 mm e un costo massimo di 2.5 €/pz; per autovetture di media gamma l'ingombro deve essere inferiore a 35 mm e il costo inferiore a 5 €/pz. Per le autovetture di alta gamma, invece, sono stati ammessi ingombri fino a 45 mm e costi fino a 7.5€/pz.

I risultati dei punti di ottimo trovati vengono riassunti nella Tabella 11.3, mentre nella Tabella 11.4 si riportano le configurazioni ottime scelte.

Tabella 11. 3: Riassunto dei punti di ottimo ricavati nell'ottimizzazione vincolata.

Scenario	Gamma autovettura	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]
Non Calibrato	Alta	781.22	104.38
Non Calibrato	Media	781.22	104.38
Non Calibrato	Bassa	288.97	129.29
Calibrato	Alta	773.59	114.33
Calibrato	Media	773.59	114.33
Calibrato	Bassa	773.59	114.33

Tabella 11. 4: Riassunto delle configurazioni ottime ricavate nell'ottimizzazione vincolata.

Scenario	Gamma autovettura	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]	Sezione	Materiale	Costo [€/pz]	W_m [mm]	Y'_{48} [N/kg]
Non Calibrato	Alta	776.54	107.38	Quadrata 27x27x2 [mm ³]	DOCOL 800DP	5.10	27	54200
Non Calibrato	Media	787.50	107.38	Quadrata 24x24x3 [mm ³]	DOCOL 800DP	4.71	24	49831
Non Calibrato	Bassa	307.77	129.38	Quadrata 17x17x2.5 [mm ³]	AISI 9255	0.84	17	42448
Calibrato	Alta	776.54	114.57	Quadrata 27x27x2 [mm ³]	AISI 6150	2.81	27	52712
Calibrato	Media	776.54	114.57	Quadrata 27x27x2 [mm ³]	AISI 6150	2.81	27	52712
Calibrato	Bassa	768.75	114.57	Quadrata 25x25x2.5 [mm ³]	AISI 6150	2.19	25	50906

Paragonando la classe di autovetture ad alta gamma, le considerazioni sono le stesse di quelle fatte per l'ottimizzazione non vincolata. Per le autovetture di media gamma invece, si nota come i valori della tenacità e di J/W_m siano simili per entrambi gli scenari. Per lo scenario non calibrato si ricava dunque una configurazione ottima di geometria quadrata 24x24x3 mm³, in DOCOL800DP, mentre per l'altro scenario una configurazione ottima sempre di geometria quadrata, ma di dimensioni superiori, 27x27x2 mm³ e in AISI6150. Per quanto riguarda, invece, le autovetture di bassa gamma, i valori della tenacità e di J/W_m sono differenti, dal momento che per lo scenario non calibrato non si è riusciti a

ricavare una configurazione che rispetti i vincoli nel punto di ottimo ricavato dall'ottimizzazione non vincolata. Ne consegue che per lo scenario non calibrato la configurazione scelta è un tubo in AISI 9255, con geometria quadrata di lato 17 mm e spessore 2.5 mm, mentre per lo scenario calibrato è un tubo in AISI 6150, con geometria quadrata di lato 25 mm e spessore 2.5 mm.

Infine, si è proposto di vedere l'effetto sul punto di ottimo dell'aggiunta di nuovi punti sperimentali alla superficie del metamodello. Per lo scenario calibrato, dunque sono stati aggiunti due ulteriori condizioni sperimentali, in totale sei punti, in zone della superficie dove vi era la mancanza di punti ad “Alta Risoluzione”. La conclusione tratta è che l'ampliamento del piano sperimentale ha portato ad avere sempre un ottimo vicino a quello precedente (Tabella 11.5), aumentando, però, l'accuratezza della superficie di previsione creata dal metamodello.

Tabella 11. 5: Confronto fra i punti di ottimo del vecchio scenario (Old) e di quello ampliato con nuovi punti sperimentali (New). (Scenario Calibrato).

<i>Scenario</i>	J/W_m [mm ³]	W/V [MPa]
<i>Old</i>	773.59	114.33
<i>New</i>	773.74	113.25

Appendice 1

Ecco i risultati ottenuti dalla 27 prove sperimentali di flessione di Villa [1].

- *Condizione sperimentale 1*: tre prove con tubi con sezione a rombo di lato 20 mm e spessore 2 mm.

Tabella A1. 1: Risultati condizione sperimentale 1.[1]

<i>Condizione sperimentale 1</i>			
<i>n°tubo</i>	32	34	35
ρ_f [kg/dm ³]	0.558	0.562	0.561
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	7.85	7.85	7.85
<i>M</i> [g]	294.28	297.32	242.58
<i>W_m</i> [mm]	28.28	28.28	28.28
<i>P_{medio}</i> [kN]	7.80	7.66	7.53
<i>P_{max}</i> [kN]	8.91	8.56	8.46
η	0.88	0.89	0.89
<i>E_{abs}</i> [kNmm]	374.42	367.61	361.47
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	1270.77	1242.73	1221.84
<i>Y₄₈</i> [N/mmkg]	819.51	818.91	801.16

- *Condizione sperimentale 2*: quattro prove con tubi con sezione quadrata di lato 20 mm e spessore 2 mm

Tabella A1. 2: Risultati condizione sperimentale 2.[1]

<i>Condizione sperimentale 2</i>				
<i>n°tubo</i>	105	106	107	108
ρ_f [kg/dm ³]	0.525	0.591	0.532	0.621
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	7.85	7.85	7.85	7.85
<i>M</i> [g]	294.28	297.32	242.58	298.86
<i>W_m</i> [mm]	20	20	20	20
<i>P_{medio}</i> [kN]	8.77	9.41	7.91	9.56
<i>P_{max}</i> [kN]	10,11	11,00	8,87	11.20
η	0.87	0.86	0.89	0.85
<i>E_{abs}</i> [kNmm]	420.97	451.92	379.52	458.92
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	1430.49	1519.97	1564.52	1535.56
<i>Y₄₈</i> [N/mmkg]	1292.49	1355.27	1452.23	1365.55

- *Condizione sperimentale 3*: quattro prove con tubi con sezione tonda di diametro 27 mm e spessore 2.5 mm.

Tabella A1. 3: Risultati condizione sperimentale 3.[1]

<i>Condizione sperimentale 3</i>				
<i>n°tubo</i>	8	10	11	14
ρ_f [kg/dm ³]	0.566	0.559	0.556	0.555
ρ_{acciaio} [kg/dm ³]	7.85	7.85	7.85	7.85
<i>M</i> [g]	413.49	408.61	406.80	412.27
<i>W_m</i> [mm]	27	27	27	27
<i>P_{medio}</i> [kN]	16.07	14.84	14.81	15.24
<i>P_{max}</i> [kN]	16.83	16.05	15.94	17.15
η	0.96	0.92	0.93	0.88
<i>E_{abs}</i> [kNmm]	771.36	712.20	710.73	731.59
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	1865.49	1742.98	1747.12	1774.53
<i>Y₄₈</i> [N/mmkg]	1379.87	1248.22	1257.22	1221.74

- *Condizione sperimentale 4*: quattro prove con tubi con sezione a rombo di lato 30 mm e spessore 1.5 mm

Tabella A1. 4: Risultati condizione sperimentale 4.[1]

<i>Condizione sperimentale 4</i>				
<i>n°tubo</i>	82	83	84	90
ρ_f [kg/dm ³]	0.584	0.560	0.577	0.573
ρ_{acciaio} [kg/dm ³]	7.87	7.87	7.87	7.87
<i>M</i> [g]	406.63	406.93	415.16	415.53
<i>W_m</i> [mm]	42.43	42.43	42.43	42.43
<i>P_{medio}</i> [kN]	18.46	17.62	18.88	20.36
<i>P_{max}</i> [kN]	21.53	22.01	21.67	22.94
η	0.86	0.80	0.87	0.89
<i>E_{abs}</i> [kNmm]	886.17	845.53	906.11	977.31
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	2179.30	2077.78	2182.56	2351.97
<i>Y₄₈</i> [N/mmkg]	917.77	816.69	933.98	1025.31

- *Condizione sperimentale 5*: quattro prove con tubi con sezione quadrata di lato 30 mm e spessore 1.5 mm

Tabella A1. 5: Risultati condizione sperimentale 5. [1]

<i>Condizione sperimentale 5</i>				
<i>n°tubo</i>	95	96	97	98
ρ_f [kg/dm ³]	0.569	0.543	0.576	0.578
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	7.87	7.87	7.87	7.87
<i>M</i> [g]	430.27	412.29	425.77	421.82
δl_{max} [mm]	48	48	48	48
<i>W_m</i> [mm]	30	30	30	30
<i>P_{medio}</i> [kN]	28.28	26.43	27.05	26.12
<i>P_{max}</i> [kN]	34.18	33.57	33.92	33.77
η	0.83	0.79	0.80	0.77
<i>E_{abs}</i> [kNmm]	1357.57	1268.61	1298.60	1253.97
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	3155.15	3076.99	3050.01	2972.75
<i>Y₄₈</i> [N/mmkg]	1813.03	1682.08	1689.25	1597.25

- *Condizione sperimentale 6*: quattro prove con tubi con sezione tonda di diametro 32 mm e spessore 2 mm

Tabella A1. 6: Risultati condizione sperimentale 6. [1]

<i>Condizione sperimentale 6</i>				
<i>n°tubo</i>	65	67	88	89
ρ_f [kg/dm ³]	0.528	0.537	0.598	0.524
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	7.87	7.87	7.87	7.87
<i>M</i> [g]	415.54	414.96	423.92	411.93
<i>W_m</i> [mm]	32	32	32	32
<i>P_{medio}</i> [kN]	18.32	18.45	19.71	18.15
<i>P_{max}</i> [kN]	21.00	21.42	23.43	23.43
η	0.87	0.86	0.84	0.77
<i>E_{abs}</i> [kNmm]	879.39	885.70	945.86	871.40
<i>S.E.A.</i> [kNmm/kg]	2116.25	2129.28	2231.22	2115.39
<i>Y₄₈</i> [N/mmkg]	1201.75	1194.00	1221.59	1067.00

- *Condizione sperimentale 7*: quattro prove con tubi con sezione tonda di diametro 25 mm e spessore di 1.5 mm.

Tabella A1. 7: Risultati condizione sperimentale 7. [1]

<i>Condizione sperimentale 7</i>				
<i>n°tubo</i>	74	75	76	85
ρ_f [kg/dm ³]	0.508	0.543	0.530	0.557
$\rho_{acciaio}$ [kg/dm ³]	8.00	8.00	8.00	8.00
M [g]	199.09	198.97	198.46	197.86
W_m [mm]	25	25	25	25
P_{medio} [kN]	8.80	9.47	9.53	9.45
P_{max} [kN]	10.29	10.6	10.97	10.84
η	0.85	0.89	0.87	0.87
E_{abs} [kNmm]	422.17	454.42	457.63	453.52
$S.E.A.$ [kNmm/kg]	1719.64	1828,08	1854.39	1823.49
Y_{48} [N/mmkg]	1224.86	1360.08	1342.78	1324.60

Appendice 2

Caratterizzazione della schiuma Al6061

Per determinare le principali caratteristiche della schiuma da inserire nel software di simulazione, Villa [1] ha testato a compressione 5 provini cilindrici, ciascuno dei quali è stato tagliato sette parti, secondo la modalità riportata in figura.

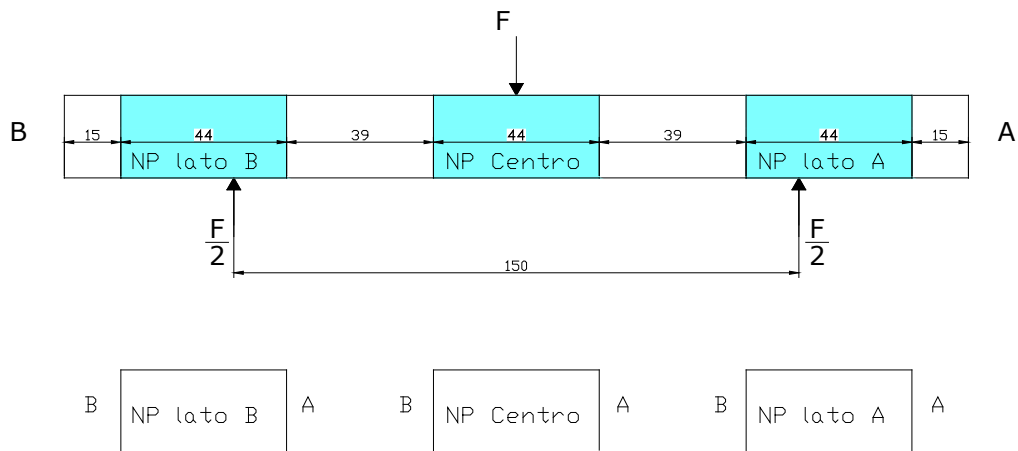


Figura A2. 1: Taglio schematico dei provini cilindrici.[1]

Le parti evidenziate in azzurro, ovvero quelle in corrispondenza degli appoggi e del penetratore durante la flessione, sono quelle che sono state testate a compressione. La velocità di esecuzione delle prove è stata fissata a 5 mm/min. Per calcolare il modulo elastico del componente allo scarico, al raggiungimento dei 4 kN di carico è stato effettuato uno scarico completo del provino ed un successivo ricarico fino a completamento della prova. Dunque, dalle prove di compressione effettuate è stato ricavato il modulo elastico allo scarico per ogni provino, effettuando una regressione lineare del tratto di curva circa rettilineo rappresentante lo scarico del provino.

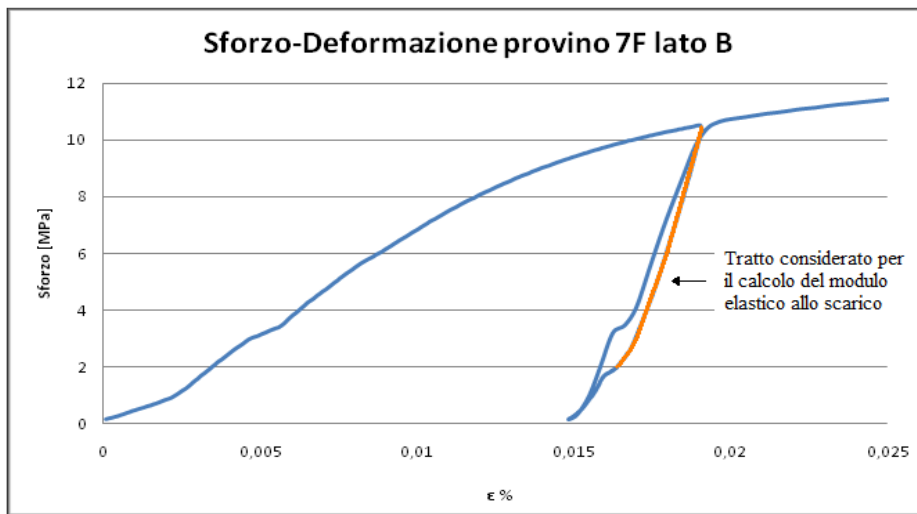


Figura A2. 2: Esempio di curva di compressione. [1]

Si riporta una tabella contenente i risultati ricavati dalle prove.

Tabella A2. 1: Risultati prove di compressione. [1]

<i>Provino</i>	ρ lato A [kg/dm ³]	E_S lato A [MPa]	ρ centro [kg/dm ³]	E_S centro [MPa]	ρ lato B [kg/dm ³]	E_S lato B [MPa]
7H	0.596	/	0.503	/	0.519	3545.93
7F	0.654	4257.28	0.487	3578.913	0.499	3479.86
7I	0.606	4159.014	0.487	3556.157	0.495	3458.9
7M	0.617	4317.523	0.505	3186.323	0.486	3435.0,85
7D	0.612	3183.454	0.468	2580.348	0.486	3494.9
Media	0.617	3979.318	0.49	3225.435	0.497	3494.898

Come si nota per i provini 7H lato A e centro non sono stati calcolati i valori di E_S , in quanto non è stata eseguita la procedura di riferimento. Dunque, una volta ricavati i 3 valori del Modulo di Young medi, uno per il lato A, uno per il lato B e uno per il centro dei provini, sono stati plottati in funzione della densità media della schiuma ottenuta (Tabella A1.1) e interpolati mediante una funzione logaritmica.

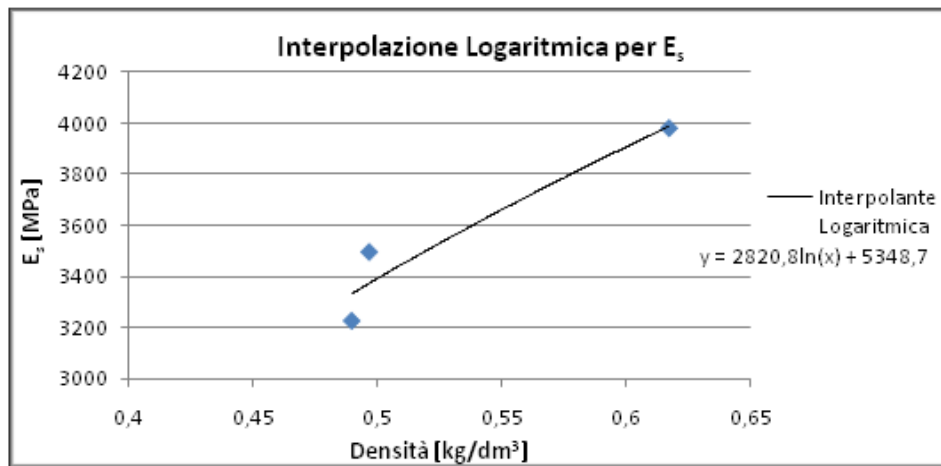


Figura A2. 3: Legame Densità- Modulo di Young. [1]

Per cui ad una densità media di 0.555 kg/dm^3 , valore ottenuto dalla media dei provini integri, corrisponde un Modulo di Young allo scarico medio pari a 3687.849 MPa .

Per definire invece, il comportamento plastico della schiuma sono state mediate tutte le curve sforzo-deformazioni ottenute dalla compressione delle tre parti dei 5 provini, ad eccezione del provino 7F lato B.

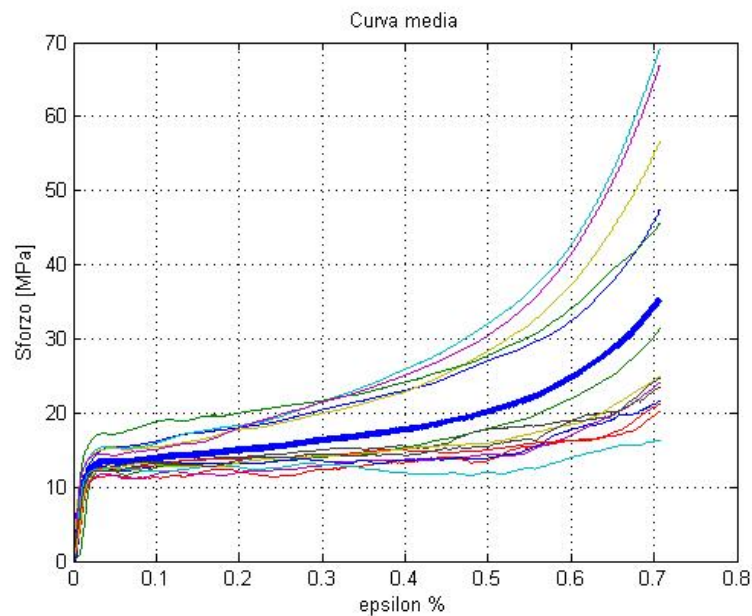


Figura A2. 4: Curve di compressione e comportamento medio. [1]

Appendice 3

Caratteristiche fisiche dei principali acciai scelti

Si riportano quattro tabelle contenenti le composizioni chimiche degli acciai utilizzati.

Tabella A3. 1: Composizioni chimiche acciai inossidabili austenitici.

	AISI 310	AISI 316	AISI 303	AISI 201	AISI 202	AISI 216
<i>C %</i>	0-0.25	0-0.08	0-0.15	0-0.15	0-0.15	0-0.08
<i>Cr %</i>	24-26	16-18.5	17-19	16-18	17-19	17.5-22
<i>Fe %</i>	48.2-57	61.3-72	66.3-71.9	67.5-75	63.5-71.5	57.3-67.8
<i>Mn %</i>	0-2	0-2	0-2	5.5-7.5	7.5-10	7.5-9
<i>Mo %</i>	-	2-3	0-1	-	-	2-3
<i>Ni %</i>	19-22	10-14	8-10	3.5-5.5	4-5	5-7
<i>P %</i>	0-0.045	0-0.045	0-0.2	0-0.06	0-0.06	0-0.045
<i>S %</i>	0-0.03	0-0.03	0.15-0.35	0-0.03	0-0.03	0-0.03
<i>Si %</i>	0-1.5	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1
<i>N %</i>	-	-	-	0-0.25	0-0.25	0.25-0.5

Tabella A3. 2: Composizioni chimiche acciai inossidabili ferritici e martensitici.

	AISI 436	AISI 446	AISI 410	AISI 403
<i>C %</i>	0-0.12	0-0.2	0-0.15	0-0.15
<i>Cr %</i>	16-18	23-27	11.5-13.5	11.5-14
<i>Fe %</i>	78.8-82.3	69.3-77	83.3-88.5	83.3-88.5
<i>Mn %</i>	10-	0-1.5	0-1	0-1
<i>Mo %</i>	0.75-1.25	-	-	-
<i>Ni %</i>	-	0-0.25	0-0.1	0-0.5
<i>P %</i>	1.00E-09	0-0.04	0-0.04	0-0.04
<i>S %</i>	1.00E-09	0-0.03	0-0.03	0-0.03
<i>Si %</i>	0-1	0-1	0-1	0-1
<i>N %</i>	-	0-0.25	-	-

Tabella A3. 3: Composizioni chimiche acciai al carbonio.

<i>Material</i>	<i>C</i> %	<i>Fe</i> %	<i>Mn</i> %	<i>P</i> %	<i>S</i> %	<i>Si</i> %
AISI 1340	0.38-0.43	97.2-97.9	1.6-1.9	0-0.035	0-0.04	0.15-0.35
AISI 1118	0.14-0.2	98-98.5	1.3-1.6	0-0.04	0.08-0.13	
AISI 1095	0.9-1.03	98.4-98.8	0.3-0.5		0-0.04	0-0.05

Tabella A3. 4: Composizioni chimiche acciai basso-legati.

	AISI 9255	AISI 4130	AISI 4320
<i>C</i> %	0.51-0.59	0.28-0.33	0.17-0.22
<i>Cr</i> %	-	0.8-1	0.4-0.6
<i>Fe</i> %	96.2-97	97-98.2	97.6-98.4
<i>Mn</i> %	0.7-0.95	0.4-0.9	0.45-0.65
<i>Mo</i> %	-	0.15-0.25	0.2-0.3
<i>Ni</i> %	-	-	1.65-2
<i>P</i> %	0-0.035	0-0.04	0-0.035
<i>S</i> %	0-0.04	0-0.04	0-0.04
<i>Si</i> %	1.8-2.2	0.1-0.35	0.15-0.35
<i>Co-Cu</i> %	-	-	0.25

Appendice 4

Riassunto delle caratteristiche delle simulazioni svolte per macchine di alta, media e bassa gamma.

Si riportano tre tabelle contenenti le caratteristiche delle simulazioni che rientrano nelle zone valide rispettivamente per le autovetture di alta, media e bassa gamma.

Tabella A4. 1: Simulazioni svolte valide per autovetture di alta gamma.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>Forma Sezione</i>	<i>Dimensioni</i>	<i>Costo [€/pz]</i>	<i>Wm [mm]</i>	<i>Y'₄₈ [N/kg]</i>
1	Fe 360	Rombo	20x20x2 [mm ³]	1.68	28.28	27962.52
2	Fe 360	Quadrata	20x20x2 [mm ³]	1.68	20	31440.58
3	Fe 360	Tonda	27x2.5 [mm ²]	2.35	27	34310.00
4	DOCOL800DP	Rombo	30x30x1.5 [mm ³]	5.78	42.43	45195.27
5	DOCOL800DP	Quadrata	30x30x1.5 [mm ³]	5.82	30	50503.31
6	DOCOL800DP	Tonda	32x2 [mm ²]	5.22	32	43573.80
7	AISI 304	Tonda	25x1.5 [mm ²]	2.72	25	22232.36
8	Fe 360	Quadrata	30x30x1.5 [mm ³]	4.13	30	40423.56
9	AISI 304	Rombo	20x20x2 [mm ³]	2.52	28.28	20190.21
10	AISI 304	Quadrata	30x30x1.5 [mm ³]	5.12	30	31054.87
11	AISI 4320	Quadrata	32x32x1.3 [mm ³]	4.57	32	45933.50
12	AISI 310	Tonda	39x1 [mm ²]	6.68	39	30047.82
13	AISI 446	Quadrata	31x31x1 [mm ³]	4.55	31	41521.76
14	AISI 316	Rombo	27x27x3 [mm ³]	4.69	38.18	33578.51
15	AISI 403	Tonda	24x3 [mm ²]	1.58	24	39544.69
16	AISI 436	Tonda	36x1.5 [mm ²]	4.80	36	36499.84
17	AISI 1340	Quadrata	16x16x2.5 [mm ³]	0.72	16	37364.20
18	AISI 1118	Tonda	23x2 [mm ²]	1.53	23	24285.33
19	AISI 303	Quadrata	18x18x3 [mm ³]	1.75	18	24764.54
20	AISI 4130	Tonda	28x2.15 [mm ²]	2.37	28	34880.49
21	AISI 1340	Quadrata	16x16x2 [mm ³]	0.81	16	36850.08
22	AISI 9255	Rombo	22x22x1.5 [mm ³]	1.91	31.11	41514.33
23	AISI 9255	Tonda	28x1 [mm ²]	2.72	28	37534.18
24	AISI 4130	Quadrata	30x30x1.5 [mm ³]	3.80	30	44727.15
25	AISI 4130	Tonda	30x3 [mm ²]	2.50	30	40613.49
26	AISI 4130	Rombo	29x29x2.5 [mm ³]	3.13	41.01	38220.92
27	AISI 9255	Rombo	30x3 [mm ²]	0.84	17	42448.92
28	DOCOL800DP	Tonda	30x3 [mm ²]	5.80	30	48161.14
29	DOCOL800DP	Quadrata	27x27x2 [mm ³]	5.10	27	54200.05

Tabella A4. 2: Simulazioni svolte valide per autovetture di media gamma.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>Forma Sezione</i>	<i>Dimensioni</i>	<i>Costo [€/pz]</i>	<i>W_m [mm]</i>	<i>Y'₄₈ [N/kg]</i>
1	Fe 360	Rombo	20x20x2 [mm ³]	1.68	28.28	27962.52
2	Fe 360	Quadrata	20x20x2 [mm ³]	1.68	20	31440.58
3	Fe 360	Tonda	27x2.5 [mm ²]	2.35	27	34310.00
7	AISI 304	Tonda	25x1.5 [mm ²]	2.72	25	22232.36
8	Fe 360	Quadrata	30x30x1.5 [mm ³]	4.13	30	40423.56
9	AISI 304	Rombo	20x20x2 [mm ³]	2.52	28.28	20190.21
11	AISI 4320	Quadrata	32x32x1.3 [mm ³]	4.57	32	45933.50
13	AISI 446	Quadrata	31x31x1 [mm ³]	4.55	31	41521.76
15	AISI 403	Tonda	24x3 [mm ²]	1.58	24	39544.69
17	AISI 1340	Quadrata	16x16x2.5 [mm ³]	0.72	16	37364.20
18	AISI 1118	Tonda	23x2 [mm ²]	1.53	23	24285.33
19	AISI 303	Quadrata	18x18x3 [mm ³]	1.75	18	24764.54
20	AISI 4130	Tonda	28x2.15 [mm ²]	2.37	28	34880.49
21	AISI 1340	Quadrata	16x16x2 [mm ³]	0.81	16	36850.08
22	AISI 9255	Rombo	22x22x1.5 [mm ³]	1.91	31.11	41514.33
23	AISI 9255	Tonda	28x1 [mm ²]	2.72	28	37534.18
24	AISI 4130	Quadrata	30x30x1.5 [mm ³]	3.80	30	44727.15
25	AISI 4130	Tonda	30x3 [mm ²]	2.50	30	40613.49
27	AISI 9255	Rombo	30x3 [mm ²]	0.84	17	42448.92

Tabella A4. 3: Simulazioni svolte valide per autovetture di bassa gamma.

<i>Sim.</i>	<i>Materiale</i>	<i>Forma Sezione</i>	<i>Dimensioni</i>	<i>Costo [€/pz]</i>	<i>W_m [mm]</i>	<i>Y'₄₈ [kN/kg]</i>
2	Fe 360	Quadrata	20x20x2 [mm ³]	1.68	20	31440.58
15	AISI 403	Tonda	24x3 [mm ²]	1.58	24	39544.69
17	AISI 1340	Quadrata	16x16x2.5 [mm ³]	0.72	16	37364.20
18	AISI 1118	Tonda	23x2 [mm ²]	1.53	23	24285.33
19	AISI 303	Quadrata	18x18x3 [mm ³]	1.75	18	24764.54
21	AISI 1340	Quadrata	16x16x2 [mm ³]	0.81	16	36850.08
27	AISI 9255	Rombo	30x3 [mm ²]	0.84	17	42448.92

Appendice 5

Programma MatLab per ricavare il comportamento medio a flessione dei tubi testati nelle prove sperimentali

Nella prima parte del codice è possibile caricare contemporaneamente i file da mediare. Successivamente si è impostato uno spostamento minimo, in moda da andare a creare un vettore unico di spostamento, valido per interpolare le singole curve. Nel ciclo **for** vengono ri-campionati i vettori delle forze, sulla base del nuovo vettore spostamento precedentemente creato. Nella parte finale i nuovi vettori forza vengono mediati fra loro e rappresentati in un grafico.

```
clear all
close all
clc

[nomefile percorso]=uigetfile('*.txt','Scegli i files da
caricare',... 'MultiSelect','on');

cd(percorso)

delta_spost=0.005;
spost_end=50;

for kj=1:length(nomefile)
    a=importdata([char(nomefile(:,kj))]);
    forza = a.data(:,3)';
    spost = a.data(:,2)';
    for ii=1:1:length(spost)-1
        if spost(ii+1) <= spost(ii)
            spost(ii+1)=spost(ii+1)+100*ii*eps;
        end
    end
    spost_new = [0:delta_spost:spost_end];
    forza_new(kj,:) = interp1(spost,forza,spost_new,'cubic');
end

forza_media=mean(forza_new);
plot(spost_new,forza_new(1,:),spost_new,forza_new(2,:), 'r',...
    spost_new,forza_new(3,:), 'm',spost_new,forza_media, '--r')
ret=xlswrite('segnale_mediato.xlsx',[forza_media;spost_new]);
```


BIBLIOGRAFIA

- [1] Andrea Villa. *Produzione di barre tubolari anti-intrusione laterali tramite schiumatura diretta*. Politecnico di Milano 2009-2010.
- [2] Ashwin Sheshadri A., *Design and analysis of a composite beam for side-impact protection of occupants in a sedan*. May, 2006.
- [3] *European new car assessment programme (EuroNCAP) – Side impact testing protocol*. May, 2004
- [4] www.euroncap.it
- [5] *European new car assessment programme (EuroNCAP) – Pole side impact testing protocol*. May, 2008.
- [6] Andrea Calonghi. *Alternative design of front door side impact beam for Nissan Navara*. Cranfield University 2005-2006.
- [7] <http://www.sulit.com>
- [8] <http://www.autoindustryinsider.com>
- [9] <http://www.boronextrication.com>
- [10] <http://www.constellium.com>
- [11] <http://www.autoblog.com>
- [12] <http://www.bmw.it>
- [13] Salvatore Iannace, Letizia Verdolotti, Stefano Colini. *La storia dei materiali cellulari nell'ingegneria*.2008.
- [14] V.C.Srivastava, K.L. Sahoo, *Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science*. Materials Science-Poland, 2007. Vol.25, No.3.
- [15] John Banhart. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in materials science, 2001. Vol.46, pp.559-632.
- [16] G.J.Davies, Shu Zhen. *Metallic foams: their production, properties and applications*. Journal of Materials Science, 1983. Vol.18, pp. 1899-1911.
- [17] S.W.Youn, C.G. Kang. *Evaluation of mechanical properties of porous 6061 alloys fabricated by the powder compression and induction heating process*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004. Vol.35A,pp. 2419-2426.
- [18] M.F.Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley. *Metal Foams: A Design Guide*.
- [19] I.W.Hall, M.Gauden, C.-J.Yu. *Crushing of aluminum closed cell foams: density and strain rate effects*. Scripta Materialia. 2000.Vol.43,pp.515-521.

- [20] Chin-Jye Yu, Harald H. Eifert, John Banhart, Joachim Baumeister. *Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications*. Mat Res Innovate. 1998.
- [21] V.S. Deshpande, N.A. Fleck. *High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams*. International Journal of Impact Engineering, 2000. Vol.24, pp.277-298.
- [22] A. Paul, U. Ramamurty. *Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam*. Materials Science and Engineering, 2000.
- [23] H.Zhao, I.Elnasri. *The Mechanism of Strength Enhancement under Impact Loading of Cellular Materials*.
- [24] T. Mukai, T. Miyoshi, S. Nakano, H. Somekawa, K. Higashi. *Compressive response of a closed-cell aluminum foam at high strain rate*. Scripta Materialia, 2006. Vol.54, pp.533-537.
- [25] C.M. Cady, G.T. Gray III, C. Liu, C.P. Trujillo, B.L. Jacquez, and T. Mukai. *Compressive properties of a closed-cell aluminum foam as a function of strain rate and temperature*. Shock Compression of Condensed Matter, 2001.
- [26] J. Banhart, J. Baumeister. *Deformation characteristics of metal foams*. Journal of materials science, 1998. Vol.33, pp. 1431-1440.
- [27] Yishan Pan, Xiangfeng Lv, Zhonghua Li, Xiaochun Xiao. *Study on Dynamic Energy Absorption Ability of Closed-cell Si-Al Foam Metals Considering Geometry Size*. Tech Science Press, 2011. Vol.6, pp. 127-132.
- [28] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber. *Aluminium foams for transport industry*. Materials & Design, 1997. Vol. 18, pp. 217-220.
- [29] Lorenzo Peroni, Massimiliano Avalle, Marco Peroni. *The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions*. International Journal of Impact Engineering, 2008. Vol.35, pp.644–658.
- [30] John Banhart. *Metallic foams: challenges and opportunities*. Eurofoam 2000: p. pp. 13-20.
- [31] Tea Seong Lim, D.G. Lee. *Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes*. Composite Structures, 2002. Vol.56, pp. 211-221.
- [32] H.R.Zarei, M. Kröger. *Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization*. International Journal of Impact Engineering, 2008. Vol.35, pp. 521-529.
- [33] Russell R. Barton. *Simulation metamodels*. Winter Simulation Conference, 2000.
- [34] Thomas Kühne. *Matters of metamodeling*. Softw Syst Model, 2006. Vol. 5, pp.369–385.
- [35] Victoria C.P. Chen, Kwok-Leung Tsui, Russell R. Barton, Martin Meckesheimer. *A review on design, modeling and applications of computer experiments*. IIE Transactions, 2006. Vol.38, pp.273-291.

- [36] Scott W. Doebbling, Francois M. Hemez, John F. Schultze, Amanda L. Cundy. *A Metamodel-Based Approach to Model Validation for Nonlinear Finite Element Simulations*. For Proceedings of IMAC XX, Los Angeles, CA. Feb. 4-7, 2002.
- [37] Z. Quian, C.C. Seepersad, V. Roshan Joseph, Janet K. Allen, C. F. Jeff Wu. *Building Surrogate Models Based on Detailed and Approximate Simulations*. Transactions of the ASME, July 2006.
- [38] Bianca M. Colosimo, Luca Pagani, and Matteo Strano. *Metamodeling based on the fusion of FEM simulations results and experimental data*. Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, 2013.
- [39] B. M. Colosimo, M. Pacella. *On integrating multisensor data for quality*. 10th A.I.T.E.M. Conference Enhancing the Science of Manufacturing, 2011.
- [40] H. Xia, Y. Yu Din, B.K. Mallick. *Bayesian hierarchical model for combining misaligned two-resolution metrology data*. IIE Transactions, 2011. Vol.43, pp. 242–258.
- [41] D. Jones, D.R. Schonlau, Matthias Welch W.J. *Efficient global optimization of expensive black-box functions*. Journal of Global optimization, 1998. Vol. 13, pp. 455–492.
- [42] J. Mockus, V. Tiesis, A. Zilinskas. *The application of Bayesian methods for seeking the extremum*. Towards Global Optimization, 1978.
- [43] Matteo Strano, Valerio Mussi, Michele Monno. *Non-conventional technologies for the manufacturing of anti-intrusion bars*. International Journal of Material Forming, 2010. Vol. 3, pp. 1111-1114.
- [44] W.Chen, T.Wierzbicki, S.Santosa. *Bending collapse of thin-walled beams with ultralight filler: numerical simulation and weight optimization*. Acta Mechanica, 2002. Vol. 153, pp. 183-206.
- [45] H.-S.Kim, W.Chen T.Wierzbicki. *Weight and crash optimization of foam-filled three-dimensional “S” frame*. Computational Mechanics, 2002.Vol. 28, pp. 417-424.
- [46] Pierangelo Andreini. *Manuale dell’ingegnere meccanico*. Seconda edizione Hoepli.
- [47] *Abaqus Analysis User’s Manual*. Simulia.