

Università Politecnica delle Marche



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Studio di soluzioni in Additive Manufacturing volte alla dissipazione di forze impulsive e verifica delle prestazioni

Study of solutions in Additive Manufacturing aimed at dissipation of impulsive forces and performance verification

Relatore:

Martarelli Milena

Candidato:

Omiccioli Andrea

Correlatore:

Banci Loredana

Anno accademico 2021/2022

Sommario

Lista dei grafici e delle figure

Capitolo 1-Introduzione	1
1.1-Benelli: Innovazione e tradizione	1
1.2-Obiettivi dello studio.....	2
Capitolo 2-Stato dell'arte	5
2.1-Sistemi di riduzione del rinculo attualmente utilizzati	5
2.1.1-Sistema Comfortech	5
2.1.2-Sistema Progressive Comfort	6
2.2-Additive Manufacturing	9
2.2.1-Introduzione all'Additive Manufacturing.....	9
2.2.2-Binder Jetting (BJT).....	11
2.2.3-Powder Bed Fusion (PBF)	13
2.2.3.1-Selective Laser Sintering (SLS)	15
2.2.3.2-Multi Jet Fusion (MJF)	18
2.3-Strutture Cellulari	22
2.3.1-Introduzione alle strutture cellulari	22
2.3.2-Classificazione delle strutture cellulari	25
2.3.2.1-Strutture TPMS	28
2.3.2.2-Lattice Structure	30
2.3.3-Stretch-Dominated Structure e Bending-Dominated Structure	32
2.4-Materiali polimerici.....	39
2.4.1-Introduzione	39
2.4.2-Classificazione dei polimeri	40
2.4.3-Caratteristiche e proprietà dei polimeri	47
2.4.3.1-Comportamento viscoelastico dei polimeri.....	48
2.4.3.2-Effetto della temperatura	51
2.4.3.3-Effetto della velocità di deformazione	55

Capitolo 3-Materiali e Metodi	57
3.1-Introduzione	57
3.2-Analisi del sistema Progressive Comfort e dei relativi vincoli.....	57
3.2.1-Vincoli relativi al comportamento dinamico del sistema	61
3.2.2-Vincoli relativi ai materiali utilizzati	63
3.3-Definizione degli obiettivi	64
3.4-Individuazione del nuovo sistema	66
3.4.1-Primi Concept e scelta delle migliori soluzioni.....	66
3.4.2-Primo gruppo di strutture	68
3.4.3-Secondo gruppo di strutture	69
3.5-Procedure di analisi delle varie strutture.....	71
3.5.1-Introduzione	71
3.5.2-Prove Sperimentali Statiche.....	72
3.5.2.1-Obbiettivi e parametri di prova.....	72
3.5.2.2-Set-up di misura	74
3.5.3-Prove sperimentali dinamiche	75
3.5.3.1-Obbiettivi e parametri delle prove	75
3.5.3.2-Set-up di misura	80
3.5.4-Analisi agli elementi finiti (FEM)	83
3.5.4.1-Obbiettivi e parametri dell'analisi.....	83
3.5.4.2-Set-up dell'analisi	87
Capitolo 4-Risultati e discussione	94
4.1-Introduzione ai risultati.....	94
4.2-Prove sperimentali	94
4.2.1-Prove statiche.....	94
4.2.1.1-Strutture del primo gruppo	95
4.2.1.2-Strutture del secondo gruppo.....	98
4.2.1.3-Sistema Progressive Comfort	104
4.2.1.4-Confronti.....	106
4.2.2-Prove dinamiche.....	109

4.2.2.1-Strutture del primo gruppo e sistema Progressive Comfort.....	111
4.2.2.2-Strutture del secondo gruppo e sistema Progressive Comfort.....	117
4.2.2.3-Confronto.....	123
4.2.3-Correlazione tra dati statici e dinamici	125
4.2.3.1-Struttura Lathel	126
4.2.3.2-Struttura Helical	127
4.2.3.3-Struttura SPIN.....	128
4.2.3.4-Confronti.....	130
4.3-Analisi agli elementi finiti.....	131
4.3.1-Struttura g70	133
4.3.1.1-Risultati dell'analisi di sensibilità della mesh	133
4.3.1.2-Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e delle analisi FEM.....	135
4.3.1.3-Valutazione delle tensioni sviluppate.....	138
4.3.2-Struttura Large	140
4.3.2.1-Risultati dell'analisi di sensibilità della mesh	140
4.3.2.2-Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e delle analisi FEM.....	143
4.3.2.3-Valutazione delle tensioni sviluppate.....	147
4.3.2.4-Analisi delle simmetrie	149
4.3.3-Strutture Medium e Small.....	153
4.3.4-Sistema Progressive Comfort	155
4.3.5-Confronti	156
Capitolo 5-Osservazioni e prospettive future	161
5.1-Prove sperimentali.....	161
5.2-Analisi agli elementi finiti.....	163
5.3-Prospettive future.....	166
Bibliografia	169

Lista dei grafici e delle figure

Figura 1-Fucile Benelli, modello “Duca di Montefeltro” [1].....	1
Figura 2-Sistemi brevettati Comfortech (a) e Progressive Comfort (b) [2].....	3
Figura 3-Alcuni esempi di Lattice Structure [3]	3
Figura 4-Sistema Comfortech [1].....	6
Figura 5-Tensioni sviluppate all’interno del Calcio relative alla configurazione di massima deformazione [2].....	6
Figura 6-Componenti del Sistema Progressive Comfort (1-Case,2-Inserito fisso,3- Inserito mobile,4-Calciolo) [2]	7
Figura 7-Zona di montaggio del Sistema Progressive Comfort [2].....	8
Figura 8-Primo (a) ed ultimo (b) modello di Progressive Comfort realizzato [2].....	8
Figura 9-Andamento delle tensioni all’interno del primo (a) ed ultimo modello (b) di Progressive Comfort realizzato [2].....	8
Figura 10-Schema di funzionamento della modalità di stampa Binder Jetting [8].....	12
Figura 11-Schema di funzionamento della modalità di stampa Powder Bed Fusion [10]	13
Figura 12-Schema di funzionamento della modalità di stampa Selective Laser Sintering [11].....	16
Figura 13-Schema di funzionamento della modalità di stampa Multi Jet Fusion [14] .	19
Figura 14-Valori Ra e Rz indicativi relativi alle tecniche di stampa SLS e MJF [15].....	19
Figura 15-Valori medi degli intervalli di tolleranza tipici delle tecniche di stampa SLS e MJF [15].....	19
Figura 16-Range di densità e resistenza a trazione tipici delle tecniche di stampa SLS e MJF [15].....	20
Figura 17-Range del modulo di Young tipici delle tecniche di stampa SLS e MJF [15] .	21
Figura 18-Esempio di Struttura Reticolare presente in natura (alveare) [18]	22
Figura 19-Struttura composta dall’insieme di mesostruttura ed esostruttura [20].....	23
Figura 20- Andamento del Modulo di Young Relativo e della Tensione di Snervamento Relativa in funzione della Densità Relativa di una generica struttura cellulare [22]	24
Figura 21-Suddivisione delle strutture cellulari in funzione della disposizione spaziale delle celle [24]	25
Figura 22-Schiuma a cella aperta (a) ed a cella chiusa (b) [26].....	26
Figura 23-Struttura a nido d’ape (2D) [28].....	27
Figura 24-Auxetic Structure o strutture a coefficiente di Poisson negativo [31]	27

Figura 25-Superficie minima passante per due bordi circolari [33].....	29
Figura 26-Alcuni esempi di strutture TPMS [35]	29
Figura 27-Alcuni esempi di superfici minime di cui possono essere costituite le strutture TPMS [36].....	29
Figura 28-Esempio di Lattice Structure [38].....	30
Figura 29-Esempi di due celle ottenute mediante il Primitive Based Method [24].....	31
Figura 30-Cella unitaria ottenuta mediante Implicit Surface Based Method [24].....	31
Figura 31-Alcuni esempi di Lattice Structure con pattern omogeneo [8].....	32
Figura 32-Lattice Structure con pattern a gradiente [40]	32
Figura 33-Curva Tensione-Deformazione di una Stretch-Dominated Structure (a) e di una Bending Dominated Structure (b) [24]	33
Figura 34-Applicazione del criterio di Maxwell [43].....	36
Figura 35-Cella Cubica Semplice [44]	36
Figura 36-Struttura cubica semplice (a) e traslata (b) [44]	37
Figura 37-Cella cubica a corpo centrato (a) e cella cubica a corpo centrato rinforzato (b) [44].....	38
Figura 38-Cella Gibson-Ashby (a) e Octet Truss (b) [44]	38
Figura 39-Struttura di un polimero [46]	39
Figura 40-Possibili rappresentazioni del polietilene [48].....	39
Figura 41-Monomero dell'etilene (a) ed unità ripetitiva del polietilene (b) [48]	40
Figura 42-Copolimeri statistici (a), alternati (b), a blocchi (c) e ad innesto (d) [50]	42
Figura 43-Macromolecola lineare (a), ramificata (b) e reticolata (c) [48]	42
Figura 44-Disposizione delle macromolecole all'interno di un polimero amorfo [51].	43
Figura 45-Cristallo lamellare di un polimero cristallino [52].....	43
Figura 46-Struttura di un polimero semicristallino nel caso in cui i cristalliti si sviluppano lungo due(a) e tre dimensioni (b) [53]	44
Figura 47-Curva σ - ϵ di fibre, elastomeri e plastiche [53].....	47
Figura 48-Fenomeno del Creep nei materiali polimerici [59]	50
Figura 49-fenomeno del rilassamento nei materiali polimerici [59]	51
Figura 50-Effetto della temperatura sul modulo elastico di un polimero [62].....	52
Figura 51-Modifiche del comportamento di un polimero al variare della temperatura [53]	55
Figura 52-Modifica del comportamento di un polimero termoplastico al variare della velocità di deformazione [65]	56
<i>Figura 53-Componenti del sistema Progressive Comfort [2].....</i>	<i>58</i>

<i>Figura 54-Guide attraverso cui avviene lo scorrimento reciproco tra Inserto Mobile e Case [2].....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 55-Contatto progressivo delle varie alette all'aumentare della forza di sparo ed andamento delle tensioni all'interno del sistema [2]</i>	<i>59</i>
<i>Figura 56-Curva F-S statica che mostra il funzionamento progressivo del Progressive Comfort [2]</i>	<i>60</i>
<i>Figura 57-Punti caratteristici da mantenere all'interno della curva F-S, ed alcuni possibili andamenti della stessa [2]</i>	<i>62</i>
<i>Figura 58-Picco di forza raggiunto con e senza l'utilizzo del Sistema Progressive Comfort, relativo all'utilizzo di cartucce a bassa (a) ed alta energia (b) [2].....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 59-Campioni rappresentativi della prima (a) e seconda (b) soluzione realizzativa [2].....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 61-Strutture del primo gruppo [2].....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 62-Datasheet PA12-JetFusion (PA12) [66]</i>	<i>68</i>
<i>Figura 63-Strutture del secondo gruppo [2]</i>	<i>70</i>
<i>Figura 64-Datasheet PA 2200-Balance 1.0 (PA12) [67]</i>	<i>70</i>
<i>Figura 65-Macchina di prova "Instron" e relative specifiche tecniche [68]</i>	<i>73</i>
<i>Figura 66-Set-up di misura utilizzato per le prove statiche [2]</i>	<i>74</i>
<i>Figura 67-Alloggiamento utilizzato per testare le strutture [2]</i>	<i>75</i>
<i>Figura 68-Alloggiamento utilizzata per testare il sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>75</i>
<i>Figura 69-Indici ottenuti dalle prove dinamiche [69]</i>	<i>78</i>
<i>Figura 70-Set-up di misura utilizzato per le prove dinamiche [2]</i>	<i>80</i>
<i>Figura 71-Cella di carico e relative specifiche tecniche [70].....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 72-Accelerometro e relative specifiche tecniche [71]</i>	<i>82</i>
<i>Figura 73-Laser a triangolazione e relative specifiche tecniche [72]</i>	<i>82</i>
<i>Figura 74-Acquisitore e relative specifiche tecniche [73].....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 75-Set-up di analisi utilizzato per testare le strutture intere [2].....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 76-Set-up di analisi relativo alla 1° configurazione semplificata della struttura Large [2].....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 77-Set-up di analisi relativo alla 2° configurazione semplificata della struttura Large [2].....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 78-Set-up di analisi relativo alla 3° configurazione semplificata della struttura Large [2].....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 79-Set-up di analisi relativo alla 4° configurazione semplificata della struttura Large [2].....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 80-Set-up di analisi relativo al Sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>92</i>

<i>Figura 81-Curve F-S statiche relative alle strutture del primo gruppo (a) (nel grafico b vengono evidenziati i tratti iniziali delle curve) [2]</i>	<i>95</i>
<i>Figura 82-Esempio di una struttura del primo gruppo (Large) di cui ne vengono evidenziate le alette smorzanti e gli elementi atti a garantirne il fine corsa [2] ...</i>	<i>96</i>
<i>Figura 83-Confronto visivo tra le strutture prima e dopo l'esecuzione delle prove statiche [2].....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 84-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura Large [2]</i>	<i>98</i>
<i>Figura 85-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura Large e relativi indici [2]</i>	<i>98</i>
<i>Figura 86-Curve F-S statiche relative alle strutture del primo gruppo [2]</i>	<i>99</i>
<i>Figura 87-Struttura g70 in seguito all'esecuzione della prova statica [2]</i>	<i>100</i>
<i>Figura 88-Struttura Helical prima (b) e dopo (a) l'esecuzione della prova statica [2]</i>	<i>100</i>
<i>Figura 89-Struttura Lathel prima (b) e dopo (a) l'esecuzione della prova statica [2]</i>	<i>101</i>
<i>Figura 90-Struttura SPIN prima (b) e dopo (a) l'esecuzione della prova statica [2] ..</i>	<i>102</i>
<i>Figura 91-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura SPIN [2]</i>	<i>103</i>
<i>Figura 92-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura SPIN e relativi indici [2].....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 93-Curva F-S statica relativa al sistema Progressive Comfort [2].....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 94-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini del sistema Progressive Comfort [2].....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 95-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini del sistema Progressive Comfort e relativi indici [2]</i>	<i>106</i>
<i>Figura 96-Confronto tra le incertezze percentuali relative alle prove effettuate sulle strutture di primo e secondo gruppo e sul sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>106</i>
<i>Figura 97-Confronto tra le curve F-S relative alle strutture di primo e secondo gruppo con quella relativa al Progressive Comfort [2].....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 98-Curve F-S dinamiche ottenute alle varie altezze di rilascio del grave, relative alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>111</i>
<i>Figura 99-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>112</i>
<i>Figura 100-Valori assunti dall'indice DM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>113</i>
<i>Figura 101-Valori assunti dall'indice TT alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>113</i>

<i>Figura 102-Valori assunti dall'indice UM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>114</i>
<i>Figura 103-Valori assunti dall'indice HER alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>115</i>
<i>Figura 104-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort (considerandone un unico provino) [2]</i>	<i>116</i>
<i>Figura 105-Curve F-S dinamiche ottenute alle varie altezze di rilascio del grave, relative alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>117</i>
<i>Figura 106-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>118</i>
<i>Figura 107-Valori assunti dall'indice DM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2].....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 108-Valori assunti dall'indice TT alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]</i>	<i>119</i>
<i>Figura 109-Valori assunti dall'indice UM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2].....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 110-Valori assunti dall'indice HER alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2].....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 111-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort (considerandone un unico provino) [2].....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 112-Confronto tra curva dinamica e curva statica della struttura Lathel [2].</i>	<i>126</i>
<i>Figura 113-Confronto tra curve dinamiche e curva statica della struttura Helical [2]</i>	<i>127</i>
<i>Figura 114-Confronto tra curve dinamiche e curva statica della struttura SPIN [2]..</i>	<i>128</i>
<i>Figura 115-Confronto tra curve dinamiche e curva statica della struttura SPIN [2]..</i>	<i>129</i>
<i>Figura 116-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-4 [2]</i>	<i>133</i>
<i>Figura 117-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-10 [2]</i>	<i>134</i>
<i>Figura 118-Confronto tra le curve F-S stabilizzate ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di elementi Tet-4 e Tet-10 [2].....</i>	<i>135</i>

<i>Figura 119-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali con quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza pari a quello riportato nel datasheet [2].....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 120-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali con quelle relative alle analisi FEM effettuate utilizzando differenti valori del modulo di resistenza del materiale [2].....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 121-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali con quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 900MPa [2]</i>	<i>137</i>
<i>Figura 122-Andamento delle tensioni all'interno della struttura g70 per diversi valori di deformazione imposta [2]</i>	<i>138</i>
<i>Figura 123-Andamento delle tensioni all'interno di una zona della struttura g70 [2]</i>	<i>139</i>
<i>Figura 124-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-4 [2]</i>	<i>140</i>
<i>Figura 125-Primo tratto delle curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-4 [2].....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 126-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-10 [2]</i>	<i>142</i>
<i>Figura 127-Primo tratto delle curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-10 [2].....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 128-Confronto tra le curve F-S stabilizzate ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di elementi Tet-4 e Tet-10 [2].....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 129-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza pari a quello riportato nel datasheet [2].....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 130-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quelle relative alle analisi FEM effettuate utilizzando differenti valori del modulo di resistenza del materiale [2].....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 131-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 450MPa [2]</i>	<i>145</i>
<i>Figura 132-Confronto tra le altezze degli elementi atti a garantire il fine corsa della struttura relativi al modello tridimensionale (a) ed al provino stampato (b) [2]</i>	<i>146</i>
<i>Figura 133-Andamento delle tensioni all'interno della struttura Large [2]</i>	<i>147</i>

Figura 134-Andamento delle tensioni all'interno della struttura Large per diversi valori di deformazione imposta [2].....	148
Figura 135-Andamento delle tensioni all'interno di un elemento della struttura Large [2]	149
Figura 136-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle analisi effettuate sulla struttura Large intera e quelle ottenute dall'analisi delle sue configurazioni simmetriche [2]	150
Figura 137-Struttura Large e sue configurazioni simmetriche [2]	150
Figura 138-Confronto tra il primo tratto della curva F-S ottenuta dalle analisi effettuate sulla struttura Large intera e quello relativo alle curve ottenute dall'analisi delle sue configurazioni simmetriche [2].....	152
Figura 139-Numero di elementi e tempi di calcolo relativi alle analisi effettuate sulle varie configurazioni [2]	153
Figura 140-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 450MPa [2]	154
Figura 141-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 450MPa [2]	154
Figura 142-Confronto tra le curve F-S ottenute dalle prove sperimentali statiche e dall'analisi FEM [2]	156

Capitolo 1-Introduzione

1.1-Benelli: Innovazione e tradizione

I principi cardine su cui si è sempre basata Benelli Armi possono essere riassunti attraverso due concetti, ossia, innovazione e tradizione e questi l'hanno portata a diventare negli anni, una delle aziende leader nel settore delle armi, conosciuta ormai in tutto il mondo. Che la tradizione fosse una delle basi su cui si è costruita questa azienda, lo si poteva capire anche dalla città nella quale si è sviluppata, ed infatti, si colloca in Urbino che da sempre è riconosciuta come una città ricca di arte e storia e tale caratteristica la si può riscontrare semplicemente osservando quelli che sono i fucili prodotti di cui troviamo un esempio in Figura 1.



Figura 1-Fucile Benelli, modello "Duca di Montefeltro" [1]

Questa tradizione intrinseca non ha però impedito ai prodotti Benelli di presentare innovazioni continue, che da sempre conferiscono ad essi un valore aggiunto. Tali elementi innovativi, al contrario di quello che si potrebbe pensare, non sono solamente uno sviluppo recente, poiché Benelli Armi pianta proprio le sue radici nell'innovazione; infatti, ciò che le ha permesso di nascere e di affermarsi nel mondo delle armi è stato proprio l'incontro avvenuto negli anni '60 con Bruno Ciolani da cui è nato il progetto del sistema di riarmo inerziale. All'epoca questa risultò un'importante innovazione che, a differenza della concorrenza, venne compresa e sfruttata dai fratelli Benelli che con lungimiranza fondarono Benelli Armi nel 1967, consapevoli delle potenzialità del sistema brevettato.

Il sistema inerziale è stato ed è ancora oggi un segno distintivo di Benelli anche se, essendo scaduto il brevetto, questo sistema è oggi adottato anche da altre aziende armiere poiché sinonimo di sicurezza, affidabilità e velocità di riarmo. Ma l'innovazione

dei prodotti Benelli non si è limitata a questo, ed infatti, negli anni sono state presentate numerose soluzioni innovative che hanno portato i fucili Benelli ad essere sempre ricercati ed emulati dalle varie aziende leader nel settore. Volendo citare alcuni di questi elementi innovativi, si potrebbe far riferimento al trattamento criogenico, che è un trattamento termico a basse temperature il cui scopo è quello di migliorare le prestazioni balistiche delle canne o al brevetto Comfortech System, che consiste in un calcio modellato in modo tale da ridurre il rinculo dovuto allo sparo, senza portare però ad un aumento del peso dell'arma [1]. Oltre a questi due sistemi sarebbe possibile elencarne molti altri, i quali tutti insieme, confermano il rispetto dei principi cardine ossia innovazione e tradizione.

Come verrà analizzato meglio nel paragrafo successivo, in questo studio si cercherà di realizzare un sistema che, come quelli appena descritti, possa aumentare ulteriormente il livello di innovazione dei prodotti offerti dall'azienda.

1.2-Obiettivi dello studio

In questo studio si è cercato di sviluppare dei dispositivi atti alla riduzione del rinculo dell'arma, alternativi e più performanti rispetto a quelli attualmente utilizzati. Allo stato attuale Benelli Armi fornisce due diversi dispositivi atti a tale scopo, utilizzabili in modo alternativo, i quali sono entrambi brevettati e corrispondono al Sistema Comfortech ed al Sistema Progressive Comfort; il primo risulta un sistema integrato al calcio del fucile che può essere utilizzato solamente su quei fucili che presentano un calcio in polimero; il Sistema Progressive Comfort è invece un dispositivo installato nella cavità presente nella parte posteriore del calcio, che può essere applicato indipendentemente ad un calcio in polimero o in legno, risultando più versatile; i due sistemi vengono rappresentati in Figura 2 [1].



Figura 2-Sistemi brevettati Comfortech (a) e Progressive Comfort (b) [2]

Per trovare una soluzione alternativa a tali sistemi, che presentasse al contempo un aumento delle performance, si è pensato da subito di sfruttare una tecnologia attualmente in forte crescita, ossia l'Additive Manufacturing; essa permette di generare delle strutture molto complesse, irrealizzabili con le tecniche di stampaggio convenzionali. In particolare, in questo studio sono state considerate due principali tipologie di strutture: la prima consiste in delle strutture classiche, che presentano però geometrie e spessori tali per cui possono essere realizzate solamente attraverso dei processi di AM; la seconda consiste invece in delle strutture complesse, chiamate Lattice Structure (Figura 3), generate anch'esse attraverso processi AM. Quest'ultime trovano largo impiego nell'attenuazione degli urti e nell'assorbimento energetico e fanno parte di una famiglia più ampia di strutture definite Strutture Cellulari.

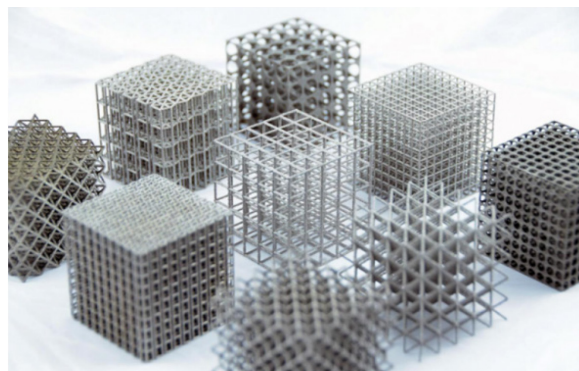


Figura 3-Alcuni esempi di Lattice Structure [3]

I sistemi di riduzione del rinculo attualmente utilizzati vengono realizzati attraverso uno stampaggio ad iniezione e basano il loro funzionamento su delle travi a flessione che, durante l'utilizzo dell'arma, lavorano completamente in campo elastico. In questi sistemi la diminuzione del rinculo è dovuta ad una riduzione del picco della forza

impulsiva generata durante lo sparo; tale riduzione è causata dalle travi di cui è costituito il sistema, le quali permettono di dilazionare la forza in un intervallo di tempo maggiore; la riduzione del rinculo è dovuta in parte anche ad una perdita di energia, causata da attriti e strisciamenti che si instaurano tra i componenti della struttura. Da quanto detto si capisce che i sistemi attuali non permettono di sfruttare la componente viscoelastica di deformazione del materiale e questo è il motivo per cui si è deciso di sfruttare le strutture precedentemente citate. Quest'ultime, essendo realizzate attraverso dei processi di AM possono essere realizzate con qualsivoglia geometria e si cercherà dunque di svilupparne alcune che permettano di sfruttare anche una certa quantità di deformazione viscoelastica del materiale; tale componente di deformazione basa il suo funzionamento su degli attriti interni al materiale di cui è costituito il sistema e permette quindi di dissipare energia. Di conseguenza le strutture che si andranno a considerare possiedono prestazioni potenzialmente superiori rispetto a quelle delle soluzioni attuali; di contro però risultano di difficile progettazione, poiché quando si ha a che fare con strutture aventi geometrie complesse, entrano in gioco una notevole quantità di parametri difficili da gestire. In realtà, anche nei dispositivi attuali è presente una dispersione energetica dovuta alla componente viscoelastica del materiale, ma si ipotizza che tale componente sia limitata e quindi trascurabile; infatti, data la geometria di questi sistemi, la componente di deformazione viscoelastica che si sviluppa al loro interno risulta molto bassa.

Inoltre, durante lo sviluppo del nuovo sistema comfort si terrà conto della possibilità di renderne una parte visibile dall'esterno, o comunque di conferire all'arma alcuni elementi distintivi che permettano all'utente di comprendere che al suo interno è presente un sistema innovativo.

Così come per i sistemi comfort attuali, anche per quelli che si andranno ad implementare verranno utilizzati dei polimeri; questo perché a causa di vincoli legati al funzionamento dell'arma ed alla maneggevolezza della stessa, è necessario ridurre al minimo il peso totale dell'arma, motivo per cui si prediligono i materiali polimerici rispetto a quelli metallici.

Capitolo 2-Stato dell'arte

2.1-Sistemi di riduzione del rinculo attualmente utilizzati

In questo studio verranno ricercate delle soluzioni alternative a quelli che sono i sistemi di riduzione del rinculo attualmente utilizzati presso Benelli Armi, ossia al Sistema Comfortech ed al Sistema Progressive Comfort; quest'ultimi verranno introdotti in questo paragrafo per poi essere analizzati nel capitolo 3.

2.1.1-Sistema Comfortech

Con Sistema Comfortech si intende l'insieme di tre componenti: il calcio, che è l'elemento principale e che è l'artefice della maggior parte della riduzione del rinculo, il nasello, che ha la funzione di rendere più confortevole il contatto tra il volto del tiratore ed il calcio, ed il calciolo, che ha la stessa funzione del nasello ma relativamente al contatto tra calcio e spalla del tiratore [2]. Questo sistema è temporalmente il primo ad essere stato sviluppato e, nel corso degli anni, ha subito varie modifiche ed ottimizzazioni, sia riguardo i materiali utilizzati che per quanto riguarda la geometria del calcio. Il suo funzionamento si basa su delle travi a flessione inserite all'interno del Calcio che, deformandosi, permettono di ridurre il picco della forza impulsiva che si genera sulla spalla del tiratore in seguito allo sparo. In Figura 4 vengono rappresentati i componenti di cui è costituito il sistema e le travi appena citate; in particolare, all'interno del calcio è possibile notare delle cavità a forma di "boomerang" che si istaurano tra una trave e la successiva. All'interno di queste cavità sono stati inseriti dei tappi in gomma che non hanno alcuna funzione strutturale, bensì pratica; essi hanno infatti lo scopo di impedire, durante l'utilizzo dell'arma, l'ingresso di materiale indesiderato all'interno del calcio.

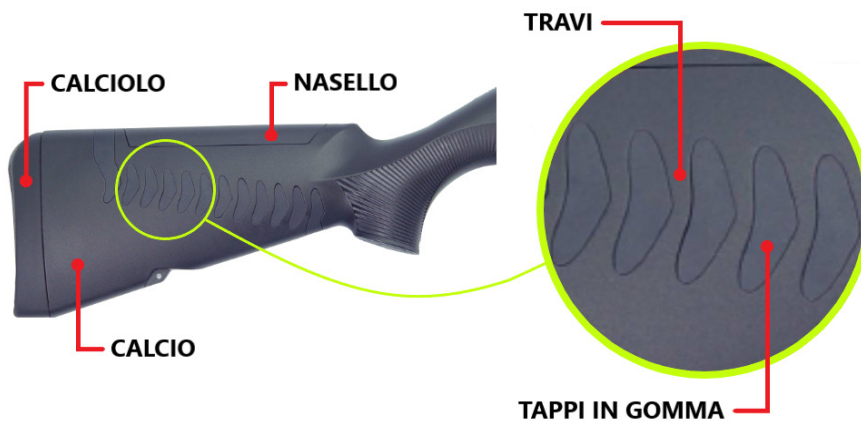


Figura 4-Sistema Comfortech [1]

Il calcio è costituito da un tecnopolimero elastomerizzato che gli permette, durante lo sparo, di raggiungere una deformazione tale da garantire sia la riduzione del picco di forza che delle tensioni che si sviluppavano al suo interno. In Figura 5 viene mostrato l'andamento delle tensioni relative alla configurazione a deformazione massima che corrisponde all'utilizzo di cartucce ad alta energia; vengono però omessi i valori delle tensioni per ragioni di privacy aziendale.

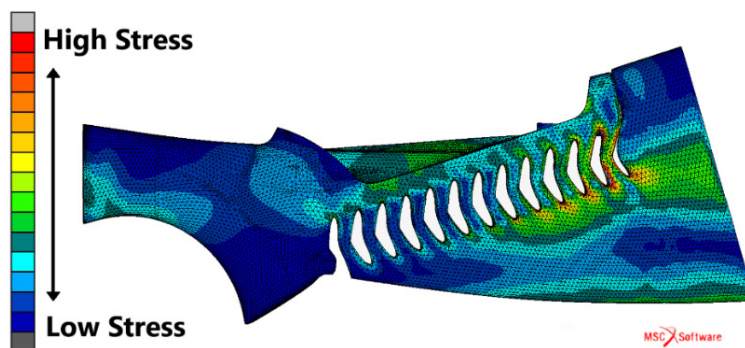


Figura 5-Tensioni sviluppate all'interno del Calcio relative alla configurazione di massima deformazione [2]

2.1.2-Sistema Progressive Comfort

Il successo con il quale è stato accolto il sistema Comfortech, ha portato l'azienda ad investire sul suo miglioramento e nel tempo si è arrivati ad un nuovo sistema chiamato Progressive Comfort. Questa nuova soluzione può essere applicata anche ai calci in legno, al contrario di quanto avviene per il Sistema Comfortech che, essendo integrato

nel calcio, può essere utilizzato solo quando quest'ultimi sono realizzati in polimero. Infatti, il sistema Progressive Comfort è svincolato dal calcio e viene montato direttamente all'interno di quest'ultimo attraverso delle viti; una volta inserito sull'arma esso risulta solidale sia al calcio che al calciolo, ovvero con l'elemento che viene a contatto con la spalla del tiratore. Anche questo meccanismo basa il suo funzionamento sul l'utilizzo di travi che, lavorando a flessione, permettono di ridurre il picco della forza impulsiva che si genera sulla spalla del tiratore in seguito allo sparo.

Il sistema Progressive Comfort è costituito da quattro componenti:

- 1) **Case:** rappresenta il contenitore all'interno del quale viene alloggiato il sistema ammortizzante vero e proprio; è la parte che, dopo il suo montaggio, entra in contatto con il calcio del fucile.
- 2) **Inserito Fisso:** è un inserto che viene fissato in modo solidale al Case, le cui alette entrano in contatto con quelle dell'inserto mobile.
- 3) **Inserito Mobile:** questo inserto è invece solidale al calciolo, ed è provvisto anch'esso di alette, attraverso le quali avviene il contatto con l'inserto fisso.
- 4) **Calciolo:** elemento solidale all'inserto mobile.

In Figura 6 vengono riportati i vari componenti appena descritti, mentre in Figura 7 viene mostrata la zona del calcio in cui il sistema viene inserito.

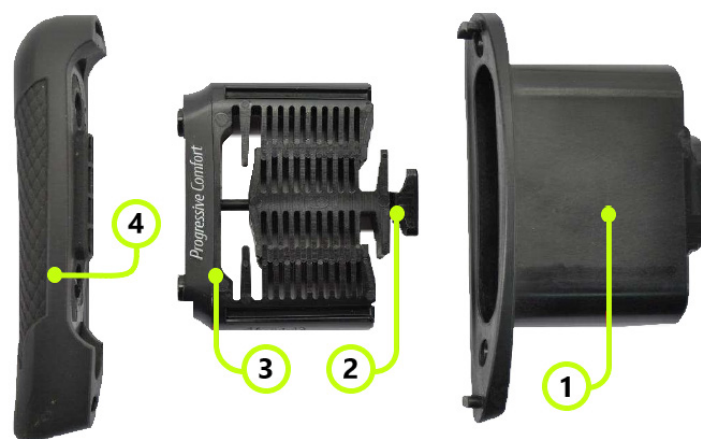


Figura 6-Componenti del Sistema Progressive Comfort (1-Case,2-Inserito fisso,3-Inserito mobile,4-Calciolo) [2]



Figura 7-Zona di montaggio del Sistema Progressive Comfort [2]

In Figura 8 sono riportate due configurazioni del sistema Progressive Comfort che dimostrano come la sua geometria sia stata negli anni ottimizzata per ridurre gli ingombri a parità di prestazioni.

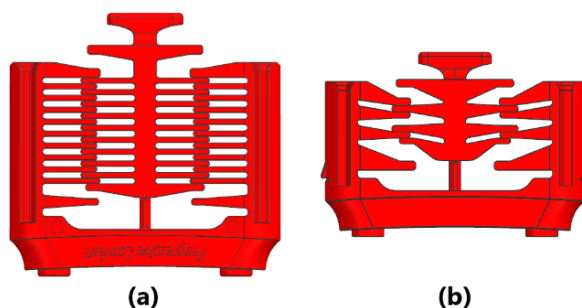


Figura 8-Primo (a) ed ultimo (b) modello di Progressive Comfort realizzato [2]

Infatti, come si può osservare in Figura 9, le tensioni massime che si raggiungono all'interno del primo modello sviluppato, sono in linea di massima le stesse che si generano all'interno del modello più recente, nonostante quest'ultimo possieda degli ingombri nettamente inferiori; delle tensioni rappresentate ne vengono omessi i valori per ragioni di privacy aziendale e per entrambi i modelli ne sono state rappresentate quelle relative all'utilizzo di cartucce ad alta energia.

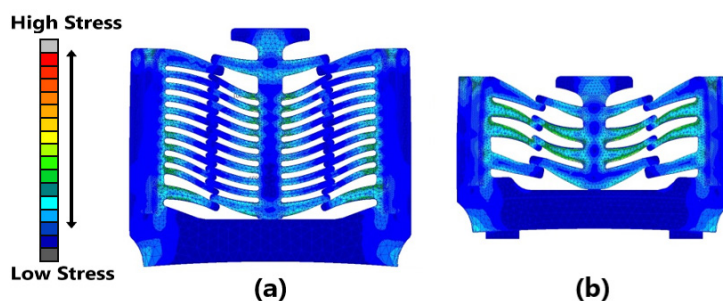


Figura 9-Andamento delle tensioni all'interno del primo (a) ed ultimo modello (b) di Progressive Comfort realizzato [2]

2.2-Additive Manufacturing

2.2.1-Introduzione all'Additive Manufacturing

L' Additive Manufacturing (AM) è una tecnologia produttiva abbastanza recente, che più in generale fa parte di quella che viene considerata la quarta rivoluzione industriale, ossia l'industria 4.0 e spesso viene anche indicata con il nome di stampa 3D. Nasce alla fine degli anni '80 e si basa sul principio secondo cui un componente, dalla geometria più o meno complessa, possa essere fabbricato per graduale deposizione di strati di materiale, ognuno dei quali avente forma e dimensioni tali da creare, a processo ultimato, il prodotto desiderato [4]; l'intero processo si basa interamente sulle informazioni presenti all'interno del modello tridimensionale dell'oggetto che si vuole ottenere.

La norma "ISO/ASTM52921-1" definisce le tecnologie additive come quei processi che aggregano materiale al fine di creare oggetti, partendo dai loro modelli matematici tridimensionali, solitamente per sovrapposizione di strati di materiale e procedendo in maniera opposta a quanto avviene nei comuni processi sottrattivi [5]. Tale tecnologia, inizialmente applicata solamente ai materiali polimerici, aveva una produttività molto scarsa ed è rimasta in fase di stallo per un paio di decenni, durante i quali è stata utilizzata solamente per la realizzazione di prototipi dimostrativi e poco più. Negli ultimi anni, invece, grazie anche ad aziende ed enti di ricerca che hanno investito molto in questo ambito, sono state sviluppate macchine molto più prestanti, la cui produttività e qualità dei prodotti realizzati è notevolmente aumentata, arrivando addirittura a consentire di stampare alcuni materiali metallici. Il principale vantaggio di questa tecnologia è quello di permettere la realizzazione di componenti aventi geometrie e spessori che non potrebbero essere ottenuti attraverso i processi produttivi classici; oltre a questo vantaggio essa porta con sé il limite di una bassa produttività che, ad oggi, non la rende utilizzabile per produzioni in serie, al contrario dei processi produttivi tradizionali, quali ad esempio lo stampaggio a iniezione che viene utilizzato per il sistema Progressive Comfort. C'è da dire però che negli ultimi anni, grazie allo sviluppo esponenziale di questa tecnologia, si è arrivati ad ottenere

delle produttività molto superiori rispetto a quelle di qualche tempo fa, e non è utopico pensare che in un futuro, anche abbastanza prossimo, si possa utilizzare questa tecnica anche per produzioni su larga scala, soprattutto se i pezzi in questione risultano di dimensioni contenute. Ovviamente, dagli anni '80 ad oggi sono state sviluppate numerose tecniche differenti attraverso cui è possibile eseguire il processo di Additive Manufacturing e ciascuna di esse possiede una serie di caratteristiche che permettono di distinguerla dalle altre; tra una tecnica e l'altra possono variare il materiale utilizzato per il componente, il materiale utilizzato per i supporti, la velocità di stampa, le tolleranze e rugosità che si possono ottenere, le dimensioni massime di stampa e così via.

Se si volessero raggruppare le varie tecniche di stampa potrebbe generarsi molta confusione, poiché molti dei produttori dei sistemi di AM hanno attribuito dei nomi personalizzati ai processi ed ai materiali sviluppati, così da differenziare il loro prodotto da quello dei competitors. Questa tendenza ha ovviamente generato un po' di disordine, anche perché spesso le differenze tra i processi sviluppati dai vari produttori possono essere molto sottili. Fortunatamente nel 2012, la ASTM International ha approvato, attraverso una normativa, una classificazione standardizzata di quelli che sono i possibili processi di AM; questa è stata poi aggiornata diverse volte e l'ultimo aggiornamento è descritto nella norma "ISO/ASTM52900-15", che va a suddividere i processi di Additive Manufacturing in sette categorie che si differenziano in base alle modalità attraverso le quali il materiale, di cui sarà composto il pezzo finale, viene processato [6]. Ciascuna di queste categorie potrà poi essere a sua volta suddivisa in sottocategorie che si differenziano tra loro in base ad alcuni dettagli relativi al processo produttivo utilizzato.

Vengono quindi ora elencate le sette principali categorie di processi di AM:

- **Binder Jetting (BJT)**
- **Direct Energy Deposition (DED)**
- **Material Extrusion (MEX)**
- **Material Jetting (MJT)**
- **Powder Bed Fusion (PBF)**
- **Sheet Lamination (SHL)**
- **Vat Photopolymerization (VPP)**

Nelle sezioni successive verranno analizzati in maniera approfondita solamente i processi di Material Jetting (MJT) e di Powder Bed Fusion (PBF), ossia quelli la cui conoscenza è risultata fondamentale durante questo studio; in particolare della PBF ne verranno considerate due differenti sottocategorie, ossia la Selective Laser Sintering (SLS) e la Multi Jet Fusion (MJF).

Dato che i vari processi di AM permettono di generare strutture aventi geometrie e spessori che non possono essere ottenuti tramite altre tecnologie, si è deciso di puntare su di essa per realizzare i nuovi sistemi di riduzione del rinculo; questo perché la maggior parte delle strutture che presentano un'elevata capacità di assorbire urti e di dissipare energia, possiedono forme non convenzionali. In particolare, tramite questa tecnologia è possibile generare delle strutture chiamate strutture cellulari e più nello specifico un loro sottogruppo ossia le cosiddette Lattice Structure; quest'ultime risultano particolarmente utilizzate nell'ambito dell'assorbimento degli urti e verranno descritte più approfonditamente nel paragrafo 2.3.

2.2.2-Binder Jetting (BJT)

Il Binder Jetting Figura 10 è un processo di stampa in cui si va ad inserire nel Workspace una certa quantità di polvere del materiale di cui si vuole ottenere l'oggetto finito, la quale viene poi sparsa attraverso un rullo livellante in modo tale da formarne uno strato; successivamente quest'ultimo viene fatto aderire nelle zone desiderate, definite all'interno del modello 3D del componente, attraverso un legante

(binder) depositato tramite una testina a getto d'inchiostro. Una volta completata l'adesione, si va a posizionare il successivo strato di polvere ed a ripetere il processo; queste iterazioni continuano fino all'ottenimento del componente desiderato. Al completamento del processo l'oggetto stampato si troverà completamente immerso all'interno della polvere non solidificata e sarà quindi necessario estrarlo e sottoporlo ad eventuali operazioni di finitura. I materiali che è possibile stampare con questa tecnica vanno dai polimeri fino ad alcune tipologie di metalli, ed in alcuni casi la polvere da cui viene estratto il pezzo stampato può essere riutilizzata per stampe successive. Generalmente il braccio a cui è fissata la testina a getto d'inchiostro ha la capacità di muoversi lungo i due assi del piano di stampa, mentre l'altezza viene regolata attraverso il movimento lungo l'asse verticale del piatto su cui è posizionato l'oggetto in realizzazione; la quantità di cui il piatto di stampa si sposta di volta in volta, definisce quella che è l'altezza dei layer di stampa, ossia dei vari stati. In questa modalità di stampa la polvere che va a riempire il workspace svolge, per lo meno in parte, la funzione di supporto per il pezzo stampato; tuttavia, se quest'ultimo ha una geometria tale da necessitare di sostegni consistenti, non risulta sufficiente la sola azione della polvere circostante ed è necessario solidificare delle parti di essa che fungano da supporto. Lo stesso discorso vale se si sta stampando un oggetto metallico, poiché data la notevole densità del materiale la sola polvere non è sufficiente a sorreggere l'oggetto stampato [7].

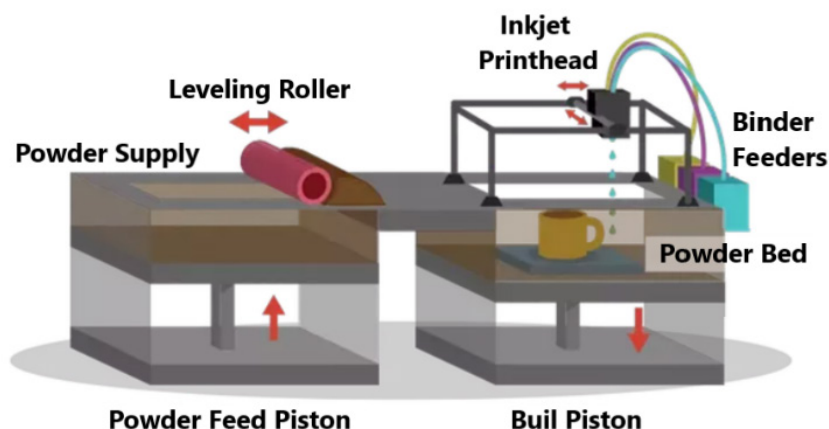


Figura 10-Schema di funzionamento della modalità di stampa Binder Jetting [8]

2.2.3-Powder Bed Fusion (PBF)

Il processo di Powder Bed Fusion (PBF), illustrato in Figura 11, consiste nel depositare all'interno del workspace degli strati di polvere che, di volta in volta, vengono fatti solidificare attraverso l'utilizzo di una sorgente termica; quest'ultima può essere costituita da un laser, da una luce ad infrarossi o da un fascio di elettroni. Una volta che i raggi provenienti dalle sorgenti appena citate arrivano a contatto con la polvere, convertono la loro energia cinetica in calore facendola fondere nelle aree desiderate. Dato che man mano che il processo avanza vengono inseriti nuovi strati di polvere, alla fine del processo il pezzo generato risulta completamente immerso in essa, motivo per cui deve essere estratto e soffiato per eliminare la polvere residua. In seguito, potrebbero essere eseguiti sul componente ottenuto dei trattamenti termici atti a ridurre eventuali stati tensionali presenti al suo interno, ed una serie di procedure per migliorarne la finitura superficiale. Inoltre, è bene ricordare che a causa della necessità di rimuovere a fine processo la polvere non solidificata, non possono essere realizzati pezzi cavi chiusi. La polvere non solidificata da cui viene estratto il pezzo potrebbe essere riutilizzata per un'altra stampa, ma questo dipende dal tipo di materiale utilizzato; infatti, elevate temperature possono cambiare la natura chimica della polvere, soprattutto se si stanno utilizzando materiali polimerici, mentre per quanto riguarda i metalli questi cambiamenti risultano di piccola entità e quindi trascurabili.

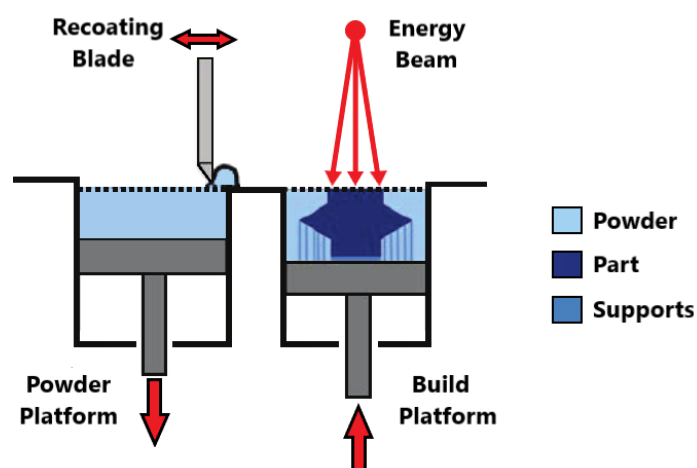


Figura 11-Schema di funzionamento della modalità di stampa Powder Bed Fusion [10]

Generalmente la polvere che riempie il workspace svolge in maniera autonoma la funzione di supporto del pezzo stampato; questo non è però sempre vero, poiché se il pezzo da realizzare avesse una geometria particolare, allora la sola azione autoreggente della polvere non sarebbe sufficiente a sorreggerlo e risulterebbe necessario solidificarne alcune zone che fungano da sostegno. Nella pratica quando si ha a che fare con oggetti in polimero questi supporti non sono quasi mai necessari, mentre se si utilizzano polveri metalliche, risultano spesso indispensabili dato l'elevato peso degli oggetti stampati. In ogni caso, quando si utilizza questa tecnologia di stampa è preferibile evitarne l'utilizzo; essa permette infatti di generare solamente dei supporti dello stesso materiale dell'oggetto da stampare e questo può portare a dei difetti nella struttura dell'oggetto realizzato, poiché la loro rimozione dovrà avvenire meccanicamente.

Questo processo risulta particolarmente competitivo e sta acquisendo negli anni sempre maggior successo; è molto utilizzato nel settore medico ed aerospaziale, poiché permette di ottenere componenti molto complessi, che al contempo presentano ottime capacità meccaniche e finiture superficiali. Due dei limiti che ne stanno però impedendo il completo sdoganamento ed utilizzo, risiedono nel fatto che tale processo presenta un elevato consumo energetico e soprattutto che la sua produttività è ancora abbastanza limitata, anche se in forte aumento. Infatti, soprattutto negli ultimi anni, il processo di PBF è già stato utilizzato per volumi di produzione medio-bassi, ma la speranza è che nel futuro prossimo si riesca ad arrivare ad una produttività tale, da poter impiegarlo anche nella produzione in serie. Esistono diverse sottocategorie di questo processo, le quali si differenziano principalmente in base al modo in cui viene effettuata l'unione delle polveri ed in base ai materiali stampabili; nelle sezioni successive verranno analizzate due di queste sottocategorie, ossia quelle utilizzate durante questo studio [9].

2.2.3.1-Selective Laser Sintering (SLS)

Tra le tecniche produttive più importanti che ricadono all'interno della famiglia Powder Bed Fusion vi è sicuramente la Selective Laser Sintering (SLS) (Figura 12) che, come suggerisce il nome, utilizza un fascio laser come fonte di energia per consolidare la polvere; la potenza di tale laser varia a seconda della tipologia di materiale trattato. Questo processo viene generalmente utilizzato per la realizzazione di componenti polimerici, ma trova applicazione anche con materiali a matrice ceramica o metallica anche se, per la produzione di oggetti in metallo, si prediligono altre tecniche.

La SLS è una tecnica di fabbricazione additiva sviluppata dall'Università di Austin con la cooperazione delle società "DTM" ed "EOS", ed il processo di consolidamento delle polveri che utilizza, come è possibile dedurre facilmente dal titolo, viene spesso identificato con il termine "sinterizzazione"; in realtà, per descrivere tale processo l'utilizzo di questa parola risulta improprio poiché durante il consolidamento della polvere, quest'ultima subisce una fusione solo parziale, mentre nei processi di sinterizzazione veri e propri la temperatura rimane sempre al di sotto di quella di fusione del materiale in questione. L'intero processo avviene in una camera chiusa che permette di ottenere un'atmosfera controllata, la quale viene posta in leggera sovrappressione ed in cui si va ad inserire un gas inerte, come ad esempio argon o azoto, il cui scopo è quello di limitare l'eventuale contaminazione del materiale e la sua ossidazione nel caso in cui si utilizzino polveri metalliche. Inoltre, la polvere utilizzata viene mantenuta ad una certa temperatura andando a riscaldare sia la camera all'interno della quale si trova, sia la base mobile su cui poggia, in modo tale che il laser debba fornire meno energia alla polvere per portarla a fusione. Dato che la polvere che non viene sinterizzata dal laser viene spesso riutilizzata, la temperatura alla quale essa viene riscaldata all'interno della camera non potrà essere troppo alta, altrimenti si rischierebbe modificarne la composizione chimica. Un altro vantaggio relativo al preriscaldamento della camera in cui alloggia la polvere è quello di favorire un ritiro minore e più graduale del materiale in fase di solidificazione e questo permette a sua volta di evitare la creazione di cavità di ritiro. Di contro però, al termine della lavorazione, il blocco formato da polvere e componente si trova ad una temperatura

elevata, ed è quindi necessario attendere che esso si raffreddi prima di poter procedere con la rimozione della polvere in eccesso così evitare deformazioni indesiderate dell'oggetto stampato.

Così come in tutte le tecniche appartenenti alla PBF, anche in questo caso la polvere viene aggiunta strato per strato e lo spessore di ciascuno di essi dipende da come sono stati gestiti i parametri di stampa; il piatto su cui poggia il pezzo in stampa viene fatto gradualmente scendere e di volta in volta attraverso un rullo livellante, viene posizionato il nuovo strato di polvere. Il laser non va ovviamente a sinterizzare l'intero strato di polvere posizionato, ma solamente le zone in cui è necessario farlo allo scopo di ottenere l'oggetto finale; le zone da sinterizzare vengono estrapolate dalla macchina di stampa dal file STL relativo al componente.

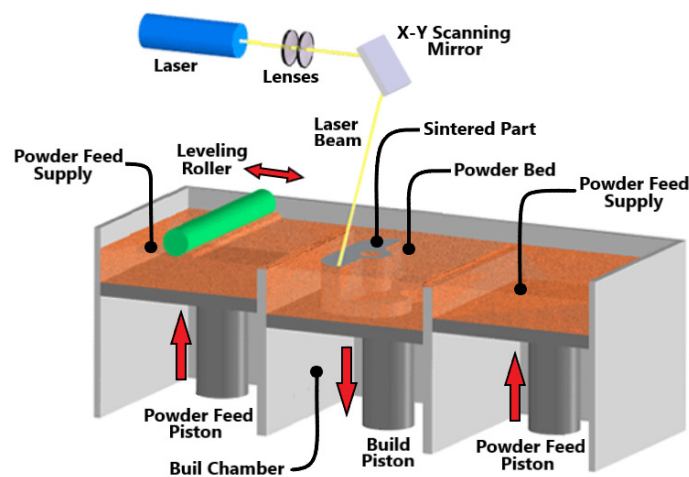


Figura 12-Schema di funzionamento della modalità di stampa Selective Laser Sintering [11]

La tipologia di laser utilizzato varia a seconda del materiale da sinterizzare e nel caso più comune in cui vengono trattati polimeri termoplastici, si utilizza un laser a CO₂ caratterizzato da una lunghezza d'onda pari a circa $\lambda=10,6 \mu\text{m}$; esso viene focalizzato attraverso l'utilizzo di alcune lenti e direzionato attraverso un sistema di scanning. La potenza del laser utilizzato va da potenze di circa 20W, relativamente a macchine di piccole dimensioni, fino ai 200W per macchine più grandi. Lo spessore dei layer realizzabili con questo processo va dagli 0,08 agli 0,15mm, mentre per quanto riguarda la produttività, si aggira intorno agli 1,8 l/h, anche se queste caratteristiche dipendono

nello specifico dalla macchina utilizzata; i valori riportati risultano quindi essere solo dei valori indicativi che possono però dare un'idea di quello che è il processo.

Nonostante la SLS sia una delle tecniche di AM più promettenti, uno dei suoi limiti è costituito dal fatto che le varietà di polveri polimeriche compatibili sono abbastanza limitate e non comprendono alcuni tra i polimeri termoplastici più comuni come il Polipropilene (PP) o il Polietilene (PE); tuttavia, recentemente sono stati creati dei materiali che ne simulano le proprietà, poiché questo processo è oggetto di continui sviluppi. In generale, circa il 90% delle polveri utilizzate è costituita da poliammidi, come ad esempio nylon (PA) e suoi compositi, mentre in parte minore vengono utilizzati materiali come il Policarbonato (PC), Polistirene (PS), Polioossimetilene (POM). Questa tecnologia possiede quindi una gamma limitata di polveri stampabili e questo è dovuto al fatto che esse, per poter essere processate, devono possedere una combinazione di proprietà intrinseche (termiche, reologiche, ottiche, ecc...) ed estrinseche (forma, distribuzione dimensionale, ecc...), che permettano un'interazione ottimale con la radiazione del laser. Le caratteristiche degli oggetti realizzati attraverso la SLS, così come quelli ottenuti con tutte le altre tecniche AM, mostrano un'elevata dipendenza dai parametri di processo, i quali devono essere ottimizzati per garantire le migliori condizioni di sinterizzazione possibili; questo permette di ottenere dei pezzi che possiedono proprietà confrontabili con quelle dei prodotti ottenuti con i processi produttivi convenzionali. Come accennato in sezione 2.2.3, nei processi di PBF il supporto utilizzato risulta essere dello stesso materiale del pezzo da produrre, tuttavia, nel caso specifico della SLS essi non vengono quasi mai utilizzati; questo perché questa tecnica di stampa viene generalmente sfruttata per stampare polimeri, i quali riescono ad essere sorretti dalla semplice azione della polvere non solidificata che li circonda. Inoltre, la possibilità di utilizzare la polvere come supporto permette la realizzazione di più componenti alla volta, i quali possono essere posti uno sopra l'altro sfruttando così l'intero volume di stampa [12].

2.2.3.2-Multi Jet Fusion (MJF)

La Multi Jet Fusion (MJF) (Figura 13) è una tecnica di stampa sviluppata di recente dalla società Hewlett-Packard (HP) e nonostante venga inserita all'interno della famiglia Powder Bed Fusion (PBF), in realtà è una combinazione tra quest'ultima tecnologia e la Binder Jetting (BJT). Infatti, così come per tutte le tecniche di PBF, anche nella MJF uno strato di polvere viene depositato, steso e livellato attraverso un apposito meccanismo. Al contrario, il metodo utilizzato per solidificare quest'ultima risulta lo stesso utilizzato nella BJT; in questo processo viene infatti depositato attraverso una testina a getto d'inchiostro, in corrispondenza delle zone di polvere che si vogliono far solidificare, quello che viene chiamato agente di fusione. Quest'ultimo non è altro che un liquido conduttore di calore che possiede una capacità di assorbire energia maggiore rispetto a quella della polvere da solidificare; questo fa sì che le zone in cui è stato depositato l'agente, quando esposte ai raggi UV, assorbano una quantità di energia tale da portare a fusione la polvere posizionata in quella zona, mentre quella che non è entrata in contatto con il liquido subisce solamente un riscaldamento che non ne implica la solidificazione. In realtà, le testine a getto d'inchiostro presenti in questa tipologia di stampanti sono due poiché, oltre all'agente di fusione, viene utilizzato anche un agente di dettaglio, il quale ha una funzione simile ma non del tutto uguale; quest'ultimo viene depositato solamente in corrispondenza dei bordi dell'oggetto da realizzare, ed essendo termoisolante permette di creare tra il bordo del pezzo e la polvere circostante un notevole gradiente di temperatura. Questo fenomeno permette di ottenere dei componenti aventi delle superfici chiaramente definite e con una miglior finitura superficiale rispetto a quelli ottenuti attraverso la SLS, senza la necessità di dover subire processi di post-produzione [13].

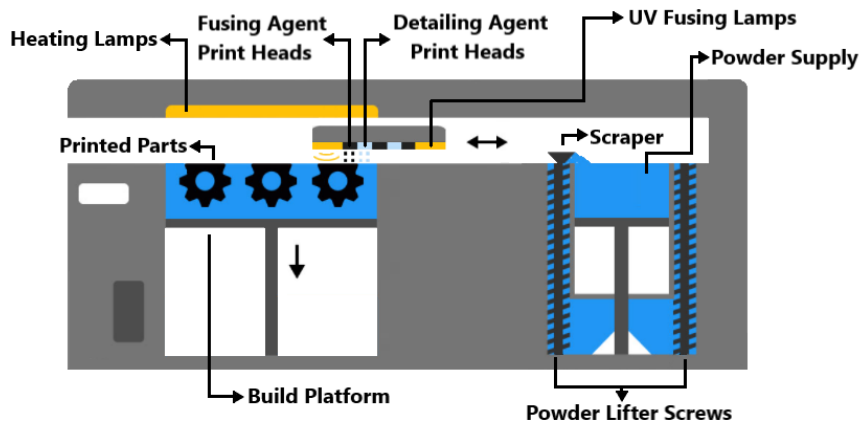


Figura 13-Schema di funzionamento della modalità di stampa Multi Jet Fusion [14]

In Figura 14 vengono confrontati i valori di rugosità media (R_a) e di profondità di rugosità media (R_z) tipici delle due tecniche; ovviamente essi risultano indicativi poiché dipendenti da diversi fattori.

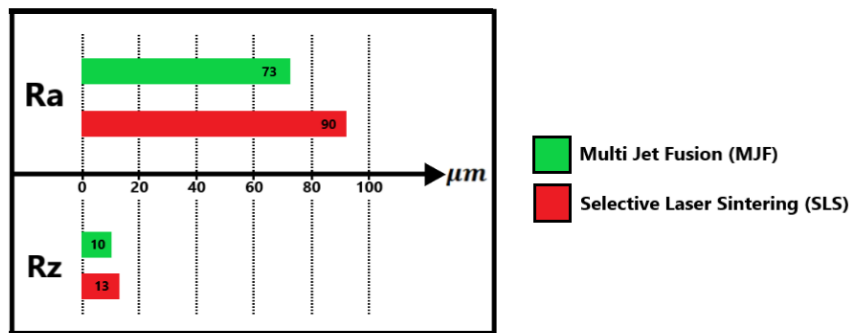


Figura 14-Valori R_a e R_z indicativi relativi alle tecniche di stampa SLS e MJF [15]

In generale attraverso la MJF si riescono anche ad ottenere degli intervalli di tolleranza più stretti rispetto a quelli realizzabili attraverso la SLS. In Figura 15 viene mostrato un confronto tra i valori tipici di tali intervalli relativamente alle due tecniche; i valori riportati fanno riferimento a pezzi di dimensioni non superiori ai 100mm.

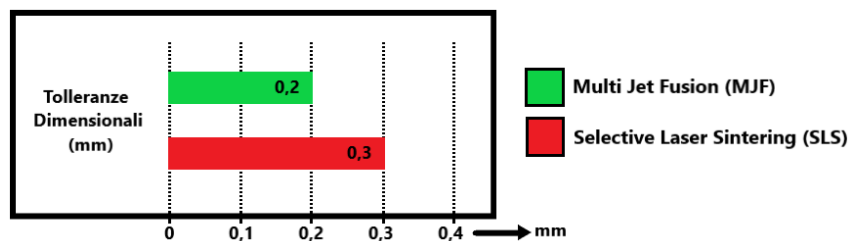


Figura 15-Valori medi degli intervalli di tolleranza tipici delle tecniche di stampa SLS e MJF [15]

I materiali utilizzati in questa tecnica, in termini chimici, sono gli stessi utilizzati nella SLS e tra tutti uno dei più utilizzati è sicuramente il nylon (PA), le cui varianti più diffuse sono il PA11 ed il PA12. L'utilizzo degli stessi materiali non impedisce però a questa tecnica di realizzare oggetti con delle proprietà meccaniche migliori rispetto alla SLS; mentre in quest'ultima la polvere viene sottoposta ad una fusione solo parziale, nella MJF viene completamente fusa e questo permette di ottenere caratteristiche meccaniche omogenee in tutte e tre le direzioni di stampa ed una maggiore densificazione della polvere, che in alcuni casi arriva ad eguagliare quella ottenuta con un classico stampaggio ad iniezione. In Figura 16 viene rappresentato un confronto tra i range tipici di densità e resistenza a trazione dei pezzi prodotti attraverso SLS e MJF, tenendo in considerazione che i valori forniti sono indicativi poiché essi variano in base al pezzo, alla macchina ed ai parametri di stampa.

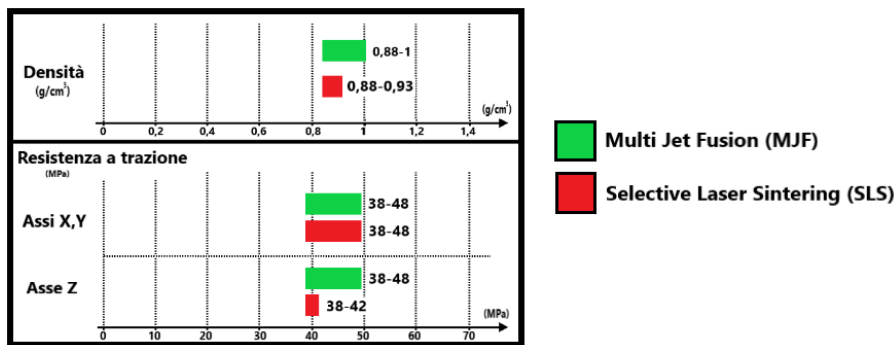


Figura 16-Range di densità e resistenza a trazione tipici delle tecniche di stampa SLS e MJF [15]

Osservando quanto riportato in Figura 16, oltre a notare quanto già detto sulle densità ottenute attraverso le due tecniche, è possibile osservare che la resistenza a trazione dei pezzi prodotti attraverso la MJF risulta confrontabile lungo tutti e tre gli assi; al contrario, per quanto riguarda quelli prodotti attraverso SLS si osserva che il confronto regge solamente lungo gli assi X e Y, mentre lungo Z, ovvero l'asse perpendicolare al piano di stampa, si ha una netta riduzione della resistenza. Ciò conferma che i pezzi prodotti attraverso MJF risultano maggiormente isotropi rispetto a quelli in SLS.

In Figura 17 viene invece confrontato il modulo di Young relativo ai materiali dei pezzi ottenuti attraverso le due tecniche; si osserva come per la MJF, nonostante vi sia

un piccolo scostamento di tale valore tra gli assi X, Y e Z, i pezzi ottenuti sono nel complesso più rigidi rispetto a quelli realizzati attraverso SLS.

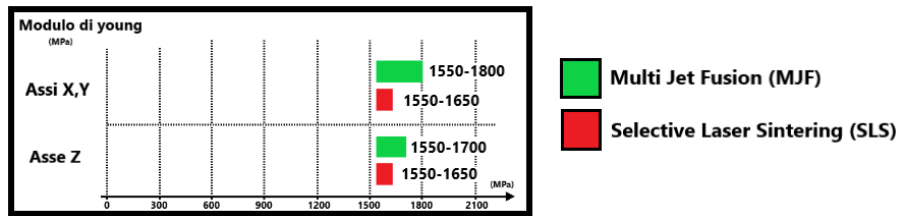


Figura 17-Range del modulo di Young tipici delle tecniche di stampa SLS e MJF [15]

Infine, la capacità produttiva della MJF risulta essere nettamente superiore a quella della SLS, mentre i layer realizzabili risultano abbastanza sottili per entrambe le tecniche; il loro valore minimo si aggira attorno agli 80 micron. Da quanto detto si evince che, nonostante la MJF sia di sviluppo più recente rispetto alla SLS, non solo permette di raggiungerne gli stessi risultati, ma in alcuni casi addirittura di superarli ed è quindi legittimo aspettarsi nel futuro un'affermazione totale di questa tecnica [16].

2.3-Strutture Cellulari

2.3.1-Introduzione alle strutture cellulari

Con strutture cellulari si intendono tutte quelle strutture costituite da travi o superfici interconnesse tra loro a formare una struttura chiusa, spesso costituita da unità elementari (celle) che si ripetono nello spazio; esistono svariati esempi di tali strutture già presenti in natura, dalle quali spesso si prende spunto per svilupparne di nuove: tra queste troviamo, ad esempio, la struttura esagonale con cui vengono realizzati gli alveari (Figura 18) e la struttura porosa del femore bovino. In generale le strutture cellulari risultano anisotrope, poiché a seconda della direzione lungo cui vengono sollecitate, esibiscono un comportamento differente e questo dipende principalmente dalla loro geometria [17].



Figura 18-Esempio di Struttura Reticolare presente in natura (alveare) [18]

Tali strutture hanno trovato negli anni sempre maggior impiego in ambito ingegneristico poiché, a seconda della geometria che sfruttano, si riescono ad ottenere strutture che possiedono elevata resistenza meccanica, ottimo assorbimento energetico, piuttosto che la capacità di isolamento termico o acustico, il tutto garantendo al contempo una massa notevolmente inferiore rispetto alle strutture convenzionali. Esse trovano largo impiego in svariati ambiti come, ad esempio, quello aerospaziale, dove vengono richieste strutture particolarmente leggere e resistenti, in ambito biomedico, dove vengono utilizzate per realizzare varie tipologie di protesi e nel motorsport dove vengono utilizzate per creare pezzi alleggeriti o strutture dedite alla riduzione degli urti.

Parlando di strutture cellulari può essere di particolare importanza introdurre i concetti di mesostruttura ed esostruttura. Con il primo termine si intende quella parte di struttura in cui si ha una ripetizione di celle che possono essere caratterizzate da dimensioni e disposizioni più o meno regolari; con esostruttura si intende invece la parte rigida della struttura che va ad avvolgere la mesostruttura come un guscio. Ovviamente, le strutture cellulari possono sia essere formate dalla sola mesostruttura, che dall'accoppiamento di essa con l'esostruttura (Figura 19); quest'ultima soluzione costruttiva viene utilizzata quando si vuole conferire una rigidità maggiore alla struttura o quando risulta indispensabile una superficie su cui applicare le forze esterne che sia in grado di distribuirle omogeneamente su tutta la mesostruttura [19].

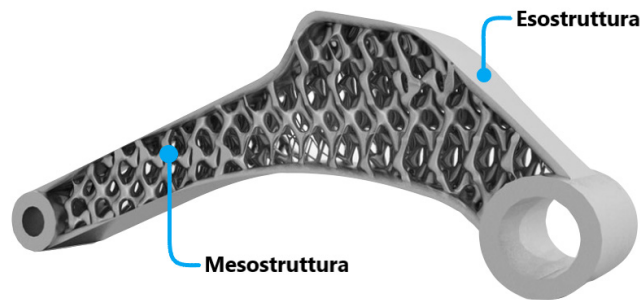


Figura 19-Struttura composta dall'insieme di mesostruttura ed esostruttura [20]

Definire comportamento e proprietà meccaniche delle strutture reticolari risulta più complesso rispetto al caso in cui si abbia a che fare con strutture classiche, poiché le variabili da tenere in considerazione aumentano notevolmente. Infatti, le proprietà di queste strutture non solo dipendono dalle caratteristiche del materiale con cui sono realizzate, ma anche dalla dimensione e geometria della cella, dal modo in cui essa viene ripetuta nello spazio, dal metodo di interconnessione tra una cella e l'altra, dalla forma e dimensione delle superfici/travi di cui la cella è costituita, ma anche dalla densità relativa della struttura e da ulteriori fattori. Tra tutti i parametri appena citati, oltre che sulla geometria e dimensione della cella, particolare attenzione va posta sulla densità relativa della struttura poiché ne influenza fortemente le caratteristiche; tale grandezza adimensionale è una proprietà tipica delle strutture cellulari che si aggiunge e differenzia dalla densità del materiale che è invece una caratteristica propria di

quest'ultimo. In generale la densità relativa (ρ_r) viene definita come una grandezza fisica adimensionale, calcolata come il rapporto tra la densità di una sostanza presa in esame e la densità di una sostanza di riferimento [21]; nel caso specifico delle strutture reticolari può però essere definita come il rapporto tra il volume effettivo di materiale che compone una cella ($V_{effettivo}$), ed il volume totale racchiuso all'interno della stessa (V_{cella}):

$$\rho_r = \frac{V_{solido}}{V_{cella}} \quad (Eq. 1)$$

Le proprietà meccaniche di una struttura cellulare dipendono anche da altre caratteristiche della struttura come, ad esempio, dimensione e geometria della cella; nonostante ciò, è possibile legare alcune di queste proprietà alla sua densità relativa. Infatti, come emerso da studi effettuati all'università di Cambridge, è possibile legare ad essa il valore del modulo di Young (E) e della tensione di snervamento (σ_s) di una struttura cellulare; a tale scopo è però necessario suddividere tali strutture in Bending Dominated Structure ed in Stretch Dominated Structure, le quali verranno analizzate più approfonditamente in sezione 2.3.3.

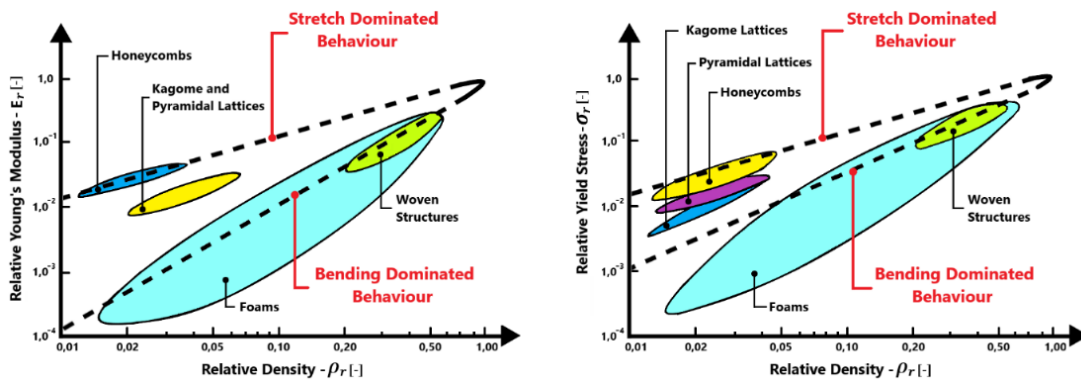


Figura 20- Andamento del Modulo di Young Relativo e della Tensione di Snervamento Relativa in funzione della Densità Relativa di una generica struttura cellulare [22]

In realtà, ciò che viene raffigurato in Figura 20 non sono gli andamenti del modulo di Young e della tensione di snervamento relativi al materiale, né tantomeno quelli relativi alla struttura reticolare, bensì vengono indicati i valori “relativi” di tali grandezze. Con modulo di Young relativo (E_r) si intende il rapporto tra il valore del modulo elastico della struttura reticolare (E_s) ed il modulo elastico proprio del

materiale (E) con cui essa è realizzata; allo stesso modo con tensione di snervamento relativa ($\bar{\sigma}_r$) si intende il rapporto tra la tensione di snervamento della struttura reticolare ($\bar{\sigma}_{s_reticolare}$) e quella propria del materiale ($\bar{\sigma}_s$). Osservando tali grafici si evince che, sia il modulo elastico relativo, che la tensione di snervamento relativa, tendono a crescere all'aumentare della densità relativa. Le pendenze delle rette che identificano tali relazioni risultano però differenti seconda della tipologia di struttura considerata. In particolare, le Bending dominated Structure possiedono un tasso di crescita maggiore rispetto alle Stretch Dominated Structure, ossia una pendenza maggiore delle curve; nonostante ciò, per tali strutture i valori assunti dalle grandezze considerate risultano sempre inferiori rispetto a quelli relativi alle Stretch Dominated Structure. [23]

2.3.2-Classificazione delle strutture cellulari

Esistono diverse classificazioni delle strutture cellulari, ed una di esse è quella che le suddivide secondo quanto riportato in Figura 21, ossia in funzione della disposizione spaziale delle celle che le costituiscono; quest'ultime possono infatti avere una disposizione casuale (stocastica) oppure ordinata [24].

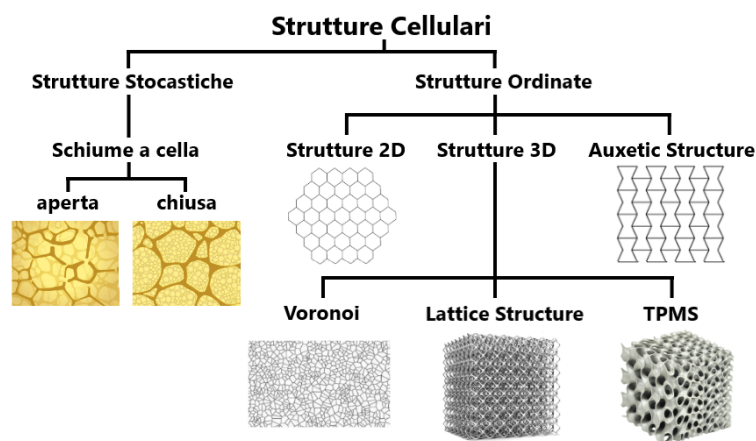


Figura 21-Suddivisione delle strutture cellulari in funzione della disposizione spaziale delle celle [24]

Le strutture stocastiche sono costituite dalle schiume e generalmente per ottenerle si va ad iniettare un gas (aria, argon o azoto) all'interno del materiale fuso; quest'ultimo durante la solidificazione intrappola al suo interno il gas

precedentemente inserito, dando vita alla struttura caratteristica di una schiuma. Queste strutture vengono definite stocastiche poiché non si ha un controllo preciso e puntuale, ma solamente parziale, di quella che è la disposizione delle bolle di gas intrappolate della struttura; infatti, la densità e la dimensione delle cavità presenti nella struttura viene regolata semplicemente modificando la quantità di gas inserita all'interno di essa.

Le schiume possono essere a loro volta suddivise in schiume a cella aperte ed a cella chiusa (Figura 22); le prime sono costituite da pori connessi gli uni agli altri a formare una rete di interconnessioni, mentre in quelle a cella chiusa ciascuno dei pori presenti risulta essere indipendente da quelli adiacenti. Studi effettuati su queste strutture hanno dimostrato che le schiume a cella aperta possiedono una buona capacità di assorbimento degli urti, mentre quelle a cella chiusa una buona rigidità e resistenza [25].

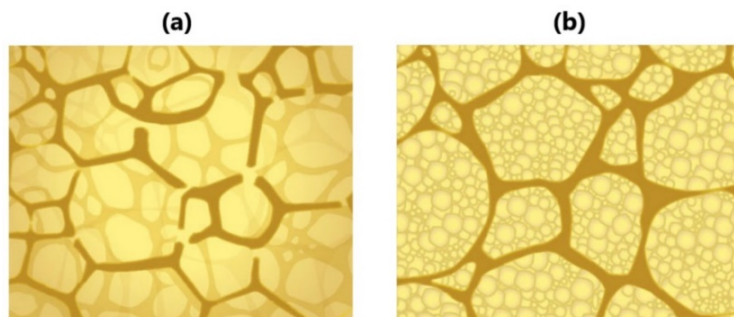


Figura 22-Schiuma a cella aperta (a) ed a cella chiusa (b) [26]

Le strutture omogenee sono invece quelle che possiedono un'organizzazione controllata delle celle nello spazio; esse possono essere ulteriormente suddivise in strutture 2D, 3D ed Auxetic Structure.

Le prime possiedono due delle tre dimensioni nettamente superiori alla terza e possono quindi essere rappresentate su di un piano; le loro proprietà meccaniche sono strettamente legate alla geometria, dimensione e disposizione delle celle che la costituiscono. Un classico esempio di una struttura di questo tipo è quella che replica la disposizione degli atomi all'interno del grafene (Figura 23), la quale viene chiamata anche struttura a nido d'ape [27].

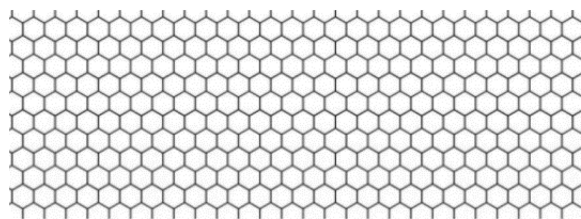


Figura 23-Struttura a nido d'ape (2D) [28]

Le Auxetic Structure sono invece delle strutture particolari e vengono anche chiamate a Coefficiente di Poisson Negativo, poiché quando sottoposte a carichi esterni presentano un comportamento meccanico insolito rispetto a quello delle strutture tradizionali. Il coefficiente di Poisson di un materiale è definito come il rapporto tra la deformazione contrattile laterale e la deformazione longitudinale che esso presenta quando sottoposto ad una sollecitazione di trazione applicata longitudinalmente; questa definizione può essere ampliata anche alle strutture e questo equivale ad affermare che esse diventano più sottili quando vengono allungate [29]. Questo è quello che succede per la maggior parte dei materiali e delle strutture ma, in alcuni casi, come ad esempio per le Auxetic Structure, il coefficiente di Poisson assume un valore negativo e questo ne implica l'inversione del comportamento; esse subiscono un'espansione laterale quando allungate longitudinalmente e diventano più sottili quando compresse. Queste strutture risultano interessanti dato che, se realizzate con un'adeguata progettazione, permettono di ottenere strutture con elevata tenacità, resistenza a sollecitazioni di taglio e strappo, buona resilienza e ottima capacità di assorbimento energetico. In Figura 24 vengono riportati alcuni esempi di Auxetic Structure realizzate in due o tre dimensioni [30].

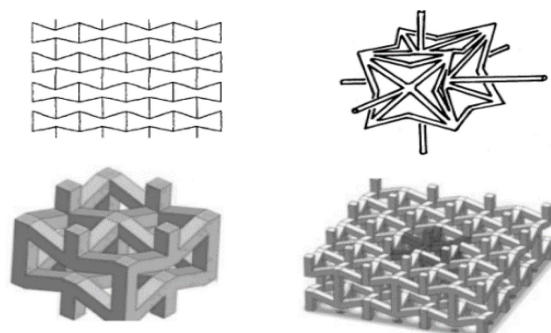


Figura 24-Auxetic Structure o strutture a coefficiente di Poisson negativo [31]

Infine, tra le strutture omogenee rientrano anche le strutture 3D le cui dimensioni lungo le tre dimensioni dello spazio risultano tra loro confrontabili; esse possono essere ulteriormente suddivise in Voronoi, strutture TPMS e Lattice Structure.

Nelle due sezioni seguenti verranno analizzate in maniera approfondita sia le Strutture TPMS che le Lattice Structure, poiché esse sono le due tipologie di strutture cellulari utilizzate durante questo studio [24].

2.3.2.1-Strutture TPMS

Le strutture TPMS o Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) sono delle soluzioni molto interessanti di cui per spiegare la logica costruttiva è necessario partire dalla definizione di superficie minima. Quest'ultime vengono definite come delle superfici che permettono di ridurre al minimo l'area localmente; questo significa che, date una o più curve chiuse nello spazio, la superficie minima ad esse associata è quella che possiede l'area minore tra tutte quelle che hanno come bordi tali curve. Di conseguenza, se si considera un percorso chiuso che giace su di un piano, allora la sua superficie minima risulta essere la superficie racchiusa al suo interno e collocata su quel piano. Le cose cambiano se il percorso chiuso non giace su di un unico piano; in questo caso le superfici minime relative a tali percorsi possono assumere forme anche abbastanza particolari. Un'altra caratteristica fondamentale di queste particolari superfici è che la somma delle curvature di ciascun punto contenuto in essa deve risultare nulla, altrimenti non si può parlare di superficie minima. Infatti, se si osserva l'immagine mostrata in Figura 25, la superficie minima che collega due cerchi posizionati a diverse altezze ma con stesso asse di simmetria e dimensioni, non come è, come si potrebbe immaginare, quella che possiede la forma di un cilindro; questo proprio perché essa non avrebbe in ogni punto curvatura nulla, come invece per definizione devono possedere le superfici minime [32].

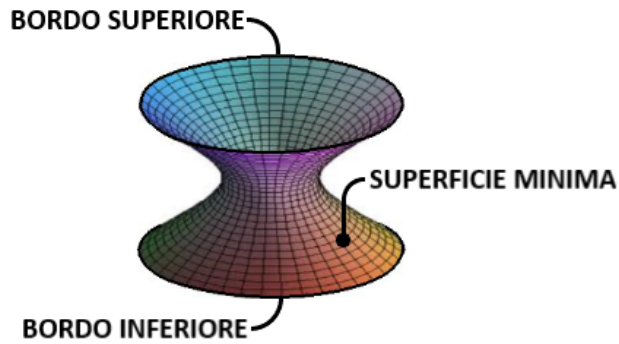


Figura 25-Superficie minima passante per due bordi circolari [33]

Ora che è stato introdotto il concetto di superficie minima è possibile definire le strutture TPMS; esse non sono altro che delle superfici minime caratterizzate da una struttura cristallina, ossia che si ripetono periodicamente in tutte e tre le direzioni dello spazio e questo è il motivo per cui vengono chiamate superfici triplamene periodiche (Figura 26,27). Queste strutture, essendo costituite da superfici, non soffrono di problematiche dovute a stress localizzati e vengono spesso utilizzate per creare scambiatori di calore o sistemi di controllo acustici; spesso la loro forma viene estrapolata dall'osservazione di elementi già presenti in natura poiché, a causa di alcuni principi fisico-matematici, le strutture naturali tendono spesso ad essere costituite da superfici minime [34].

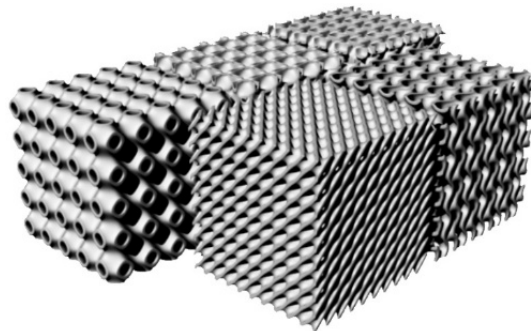


Figura 26-Alcuni esempi di strutture TPMS [35]

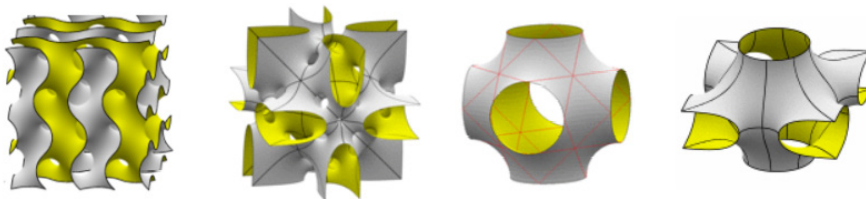


Figura 27-Alcuni esempi di superfici minime di cui possono essere costituite le strutture TPMS [36]

2.3.2.2-Lattice Structure

Le Lattice Structure sono definite in letteratura come oggetti di natura periodica, costituiti da celle unitarie che si ripetono ed interconnettono lungo le tre direzioni dello spazio. La cella viene quindi considerata come il più piccolo elemento della struttura che può essere ripetuto, ed è generalmente costituita da quelli che vengono definiti beam, ossia da elementi rigidi che possono avere diverse dimensioni e geometrie; quest'ultimi risultano tra loro interconnessi in corrispondenza di quelli che vengono definiti nodi Figura 28 [37].

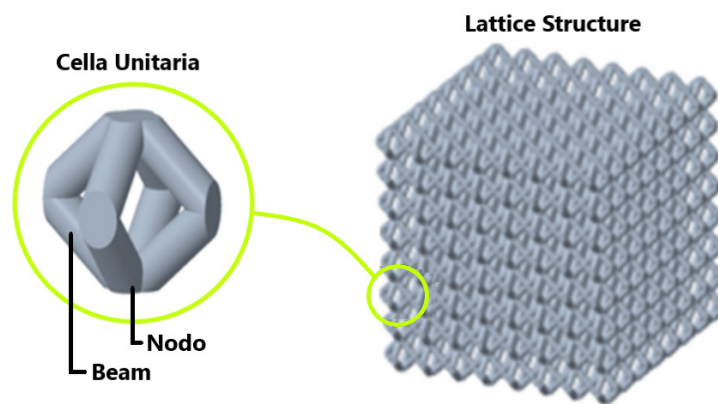


Figura 28-Esempio di Lattice Structure [38]

Le celle unitarie che caratterizzano queste strutture possono essere generate basandosi su diversi principi, anche se nella realtà i metodi maggiormente utilizzati sono tre, ossia il Primitive Based Method, l'Implicit Surface Based Method ed il Topology Optimization Method [24].

Il Primitive Based Method sfrutta alcune semplici primitive geometriche, le quali vengono sottoposte tra loro a somme o sottrazioni booleane e permettono così di ottenere la cella unitaria desiderata. In Figura 29 è possibile notare due esempi applicativi di tale metodo: nel primo caso viene sottratta una sfera ad un cubo (Figura 29a), mentre nel secondo caso la somma booleana di quattro cilindri viene sottratta sempre ad un cubo (Figura 29c); dai due differenti casi appena descritti vengono rispettivamente ottenute le celle riportate in Figura 29b ed in Figura 29.

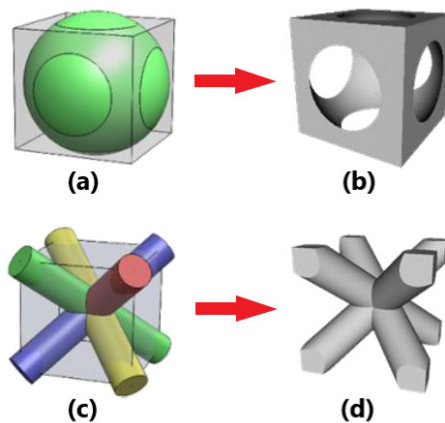


Figura 29-Esempi di due celle ottenute mediante il Primitive Based Method [24]

L'Implicit Surface Based Method definisce invece la cella unitaria della struttura attraverso un'equazione implicita definita nello spazio, la quale permette di identificare una serie di punti che se uniti danno vita alla cella in questione. Questo metodo è molto comodo quando si devono effettuare numerose modifiche alla geometria della cella poiché ne permette un controllo parametrico. In Figura 30 viene mostrato un esempio di cella unitaria ottenuta attraverso questo metodo e la sua equazione implicita corrispondente.

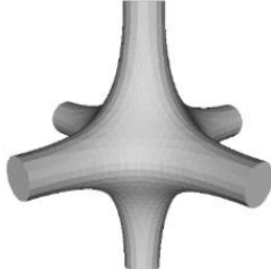
$$\begin{aligned}
 F(x, y, z) &= \cos(2\pi x) + \cos(2\pi y) + \cos(2\pi z) \\
 &+ a(\cos(2\pi x)\cos(2\pi y) \\
 &+ \cos(2\pi y)\cos(2\pi z) \\
 &+ \cos(2\pi z)\cos(2\pi x)) + b = 0
 \end{aligned}$$


Figura 30-Cella unitaria ottenuta mediante Implicit Surface Based Method [24]

Infine, il Topology Optimization Method utilizza un algoritmo matematico che permette di ottenere una distribuzione ottimale del materiale all'interno della cella generata.

La ripetizione delle celle così create permetterà poi di generare la vera e propria Lattice Structure; a tale scopo deve essere prima definito il pattern della struttura, ossia la disposizione delle celle nello spazio, la quale può seguire logiche differenti. Nel caso più semplice viene ripetuta omogeneamente la stessa cella nelle tre dimensioni

dello spazio fino ad ottenere una struttura della grandezza desiderata (Figura 31). In alcuni casi, invece, le celle che vengono ripetute non risultano essere tutte uguali o comunque non delle stesse dimensioni; un esempio delle strutture così ottenute viene riportato in Figura 32 dove è possibile a notare osservare quella che viene definita struttura a gradiente, ossia una struttura le cui celle tendono ad ingrandirsi man mano che ci si sposta lungo una data direzione dello spazio. Così come la forma e la dimensione della cella, anche la sua distribuzione nello spazio (pattern) influisce su quelle che sono le caratteristiche finali della struttura [39]. Questo è dovuto al fatto che il comportamento meccanico di una struttura lattice, ma più in generale di una struttura reticolare, dipende, oltre che dal materiale di cui è costituita e dalla densità relativa della struttura, anche dall'architettura della stessa.

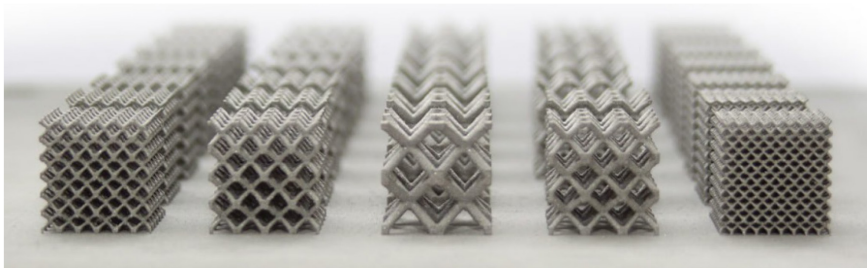


Figura 31-Alcuni esempi di Lattice Structure con pattern omogeneo [8]

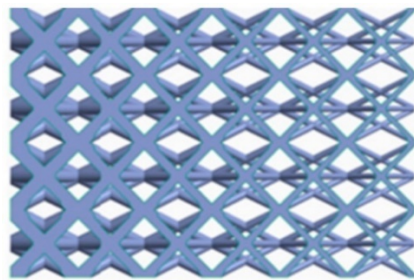


Figura 32-Lattice Structure con pattern a gradiente [40]

2.3.3-Stretch-Dominated Structure e Bending-Dominated Structure

Le Strutture Lattice possono essere suddivise in base al grado di connettività tra gli elementi delle stesse, ossia in base al modo in cui queste strutture si trovano a lavorare; sulla base di questa classificazione le Lattice Structure possono essere

suddivise in Stretch-Dominated Structure (trazione prevalente) e Bending-Dominated Structure (flessione prevalente) [41].

Le prime possiedono un alto grado di connettività e risultano dunque particolarmente rigide e resistenti quando sottoposte all'azione di carichi esterni; questo le rende idonee a tutte quelle applicazioni strutturali in cui, pur riducendo il peso rispetto ad una struttura classica, si vogliono garantire alti livelli di resistenza. Inoltre, data la geometria di tali strutture, gli elementi che le costituiscono si trovano a lavorare principalmente sotto sforzi di trazione/compressione.

Al contrario le Bending-Dominated Structure possiedono un basso grado di connettività e questo porta i suoi elementi a lavorare principalmente a flessione; pertanto, vengono utilizzate quando la deformazione strutturale è la caratteristica ricercata, ossia in tutte quelle applicazioni atte alla dispersione energetica e/o attenuazione degli urti.

Le differenze tra il comportamento delle due tipologie di strutture appena descritte possono essere meglio comprese andandone ad osservare quelle che sono le curve Tensione-Deformazione; a tal proposito in Figura 33 vengono mostrate le curve $\sigma - \varepsilon$ relative a due strutture differenti, di cui una possiede un comportamento a trazione prevalente (Figura 33a) e l'altra a flessione prevalente (Figura 33b), ma entrambe presentano la stessa densità relativa [24].

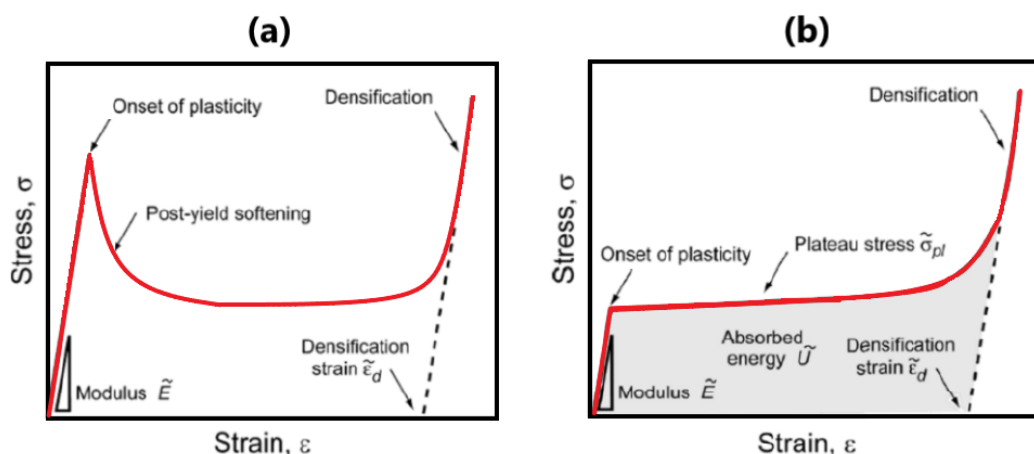


Figura 33-Curva Tensione-Deformazione di una Stretch-Dominated Structure (a) e di una Bending-Dominated Structure (b) [24]

Si osserva che, per entrambe le strutture, tali curve sono caratterizzate da tre tratti ben distinti; un primo tratto elastico lineare che termina in corrispondenza dello snervamento della struttura, uno in cui la tensione rimane più o meno costante all'aumentare della deformazione, ed un tratto finale dove la tensione cresce bruscamente e si verifica quindi un fenomeno chiamato densificazione. Nel tratto iniziale la struttura si trova a lavorare completamente in campo elastico e quindi, una volta rilasciato il carico, la deformazione viene completamente recuperata; questo invece non accade se viene superato lo snervamento, poiché in tal caso si avrà una certa deformazione residua. Confrontando i tratti lineari delle due strutture si osserva che, a parità di densità relativa, vi è un'elevata differenza tra quelli che sono i valori della tensione di snervamento; in particolare, nelle strutture a trazione prevalente i valori di tensione raggiunti prima dello snervamento sono nettamente superiori di quelli raggiunti nelle strutture a flessione prevalente. Inoltre, sempre per quanto riguarda le strutture a trazione prevalente si nota che, appena superato lo snervamento, si instaura un tratto di curva con pendenza negativa, il quale non è invece presente nell'altra tipologia di strutture; nella pratica questo tratto coincide con un rilassamento improvviso del materiale di cui è costituita la struttura e successivamente ad esso si instaura un tratto a tensione costante. Nelle strutture a flessione prevalente, invece, i valori della tensione di snervamento risultano nettamente inferiori; in questo caso, una volta superato lo snervamento della struttura, si passa subito alla zona a tensione costante, identificata con il nome di Plateau, senza che prima si verificano fenomeni di rilassamento. Il fatto di arrivare a deformazioni elevate senza mai raggiungere alti valori di tensione, fa capire perché queste strutture trovino largo impiego in quelle applicazioni atte all'assorbimento energetico; infatti, in linea generale strutture che permettono di raggiungere grandi deformazioni senza toccare alti valori di stress sono più efficaci a tale scopo. I tratti finali delle curve relative ad entrambe le strutture sono quelli in cui si verifica la cosiddetta densificazione della struttura; in corrispondenza dell'inizio di tale tratto la struttura risulta essere completamente compattata su sé stessa, tanto da non avere

più spazi vuoti al suo interno, o comunque molto pochi, e questo porta ad un rapido incremento della tensione.

Spesso capire se una struttura ricade all'interno della famiglia delle Stretch Dominated Structure o delle Bending Dominated Structure risulta complicato. A tale scopo viene utilizzato il cosiddetto Criterio di Maxwell, definito dallo stesso nel 1864, che permette di definire se la struttura presenta l'uno o l'altro comportamento. Questo criterio viene applicato alla singola cella e la va a considerare come un telaio spaziale i cui elementi sono connessi attraverso giunti senza attrito; i risultati ottenuti dall'analisi della singola cella possono poi essere estesi a tutta la struttura purché essa sia costituita interamente da una ripetizione della cella analizzata. L'equazione che permette di applicare il criterio di Maxwell a strutture tridimensionali assume la seguente forma:

$$M = b - 3j + 6 \quad (\text{Eq. 2})$$

Dove b è il numero di elementi rigidi (beam) di cui è costituita la struttura, mentre j è il numero di connessioni (nodi) presenti in essa.

Tale criterio enuncia che se la struttura considerata presenta un valore di M inferiore a zero risulta un cinematismo e di conseguenza, se soggetta a carichi esterni, i suoi elementi tenderanno a flettersi e si ha dunque a che fare con una Bending-Dominated Structure. Al contrario, se si ottiene un valore di M maggiore o uguale a zero allora la struttura risulta rigida e di conseguenza, se sottoposto a carichi esterni, i suoi elementi lavoreranno principalmente a trazione/compressione e si ha dunque a che fare con una Stretch-Dominated Structure [42]. In Figura 34 vengono mostrati alcuni esempi applicativi del criterio di Maxwell; in generale le strutture costituite da triangoli presentano un comportamento a trazione/compressione prevalente, mentre in caso contrario il comportamento sarà a flessione prevalente.

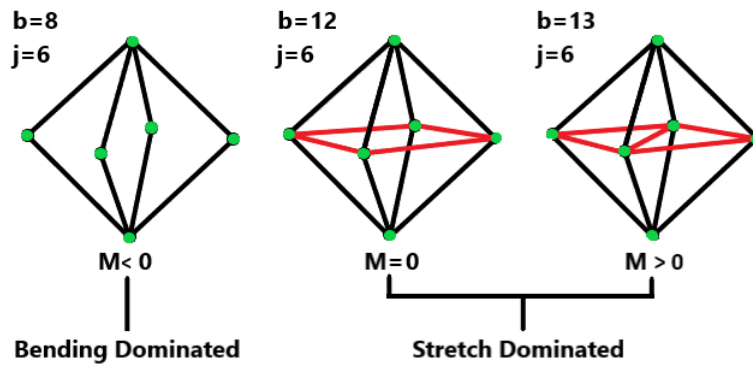


Figura 34-Applicazione del criterio di Maxwell [43]

Vengono ora analizzate rapidamente alcune tra le principali celle che caratterizzano le due tipologie di strutture appena descritte. In Figura 35 è possibile osservare la cella cubica semplice, nella quale una serie di beam ($b=12$) sono interconnessi a formare un cubo, ed i cui nodi ($j=8$) sono posti in corrispondenza degli spigoli dello stesso; essa fa parte delle Bending Dominated Structure poiché applicandovi il criterio di Maxwell si ottiene un valore negativo di M ($M=-6$).

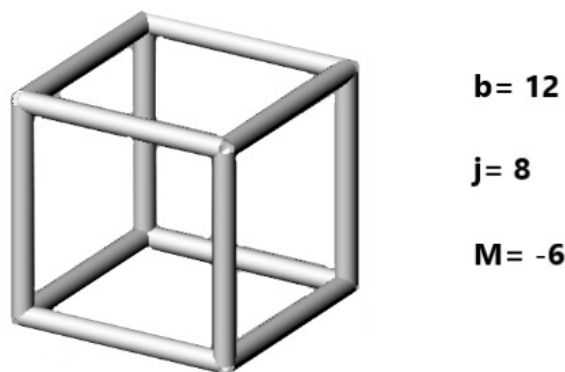


Figura 35-Cella Cubica Semplice [44]

La cella cubica semplice è una delle più comuni e con essa vengono comunemente generate due strutture: la struttura cubica semplice (Figura 36a) e la struttura cubica traslata (Figura 36b). La prima tipologia di struttura è ottenuta assemblando le celle cubiche semplici, facendone coincidere vertici e lati delle facce adiacenti e si ottiene una struttura con un buon livello di rigidità. La struttura cubica traslata, invece, è ottenuta sempre assemblando le celle cubiche semplici, ma in questo caso facendone

coincidere i vertici con il punto centrale del lato della cella adiacente; questo genera una struttura fortemente anisotropa.

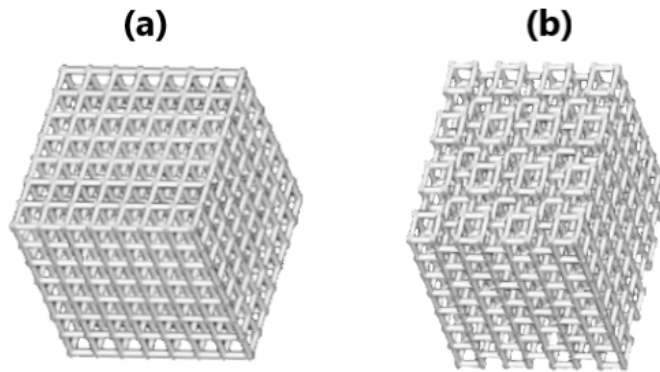


Figura 36-Struttura cubica semplice (a) e traslata (b) [44]

La seconda tipologia di cella analizzata è quella cubica a corpo centrato (Figura 37a); rispetto alla cella cubica semplice, presenta un nodo aggiuntivo posizionato al centro della cella, da cui partono degli elementi che lo collegano a tutti gli altri nodi. Applicando il criterio di Maxwell alla cella appena descritta si ottiene un valore di M pari a -1 e quindi essa presenta un comportamento a flessione prevalente; tuttavia, il comportamento di tale struttura si avvicina molto a quello delle strutture a trazione prevalente poiché il valore di M , pur essendo negativo, non si discosta molto dallo zero.

Una cella molto simile è quella a corpo centrato rinforzato; essa sfrutta come base la struttura cubica a corpo centrato, aggiungendovi sei elementi che partono dal nodo centrale e terminano al centro delle facce della cella (Figura 37b). Applicando il criterio di Maxwell a quest'ultima si ottiene un valore positivo di M ($M=5$) e quindi essa presenta un comportamento a trazione/compressione prevalente.

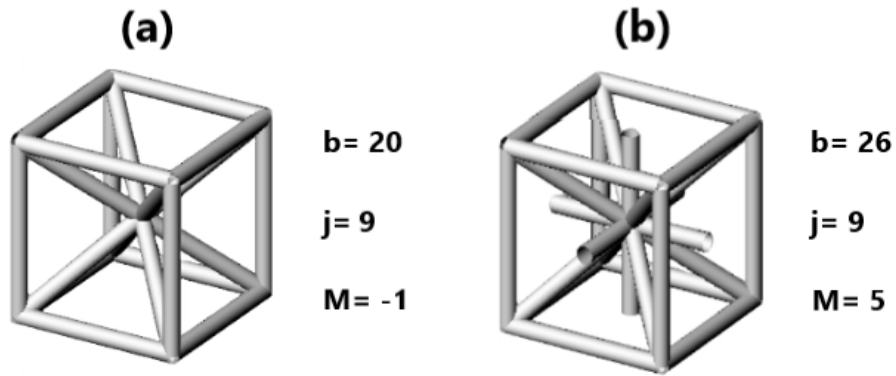


Figura 37-Cella cubica a corpo centrato (a) e cella cubica a corpo centrato rinforzato (b) [44]

Molto interessante è la cella Gibson-Ashby, in cui i beam che la costituiscono sono posizionati in modo tale da lavorare a flessione in modo marcato (Figura 38a); applicando il criterio di Maxwell a tale cella si ottiene infatti un valore di M fortemente negativo ($M=-30$).

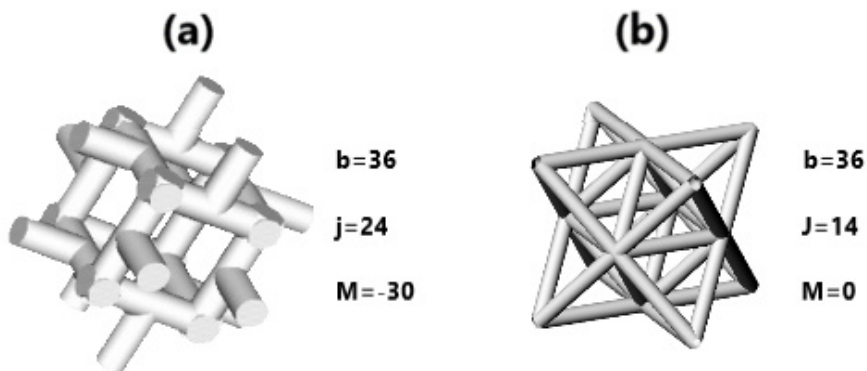


Figura 38-Cella Gibson-Ashby (a) e Octet Truss (b) [44]

L'ultima tipologia di cella considerata è la Octet Truss, i cui beam formano un ottaedro sulle cui facce triangolari sono costruiti otto tetraedri (Figura 38b); questa cella presenta un valore di M pari a zero e presenta quindi un comportamento a trazione/compressione prevalente [44].

In Figura 41, considerando sempre il caso del polietilene, è possibile notare come unità ripetitiva e monomero non coincidano nemmeno quando essa è formata da un unico monomero. Si nota infatti che l'etilene, ossia il monomero da cui si forma il polietilene, per poter diventare un'unità ripetitiva deve rompere il doppio legame presente tra i suoi atomi di carbonio; così facendo potrà poi legarsi ad altre unità ripetitive, che in questo caso sono uguali tra loro.

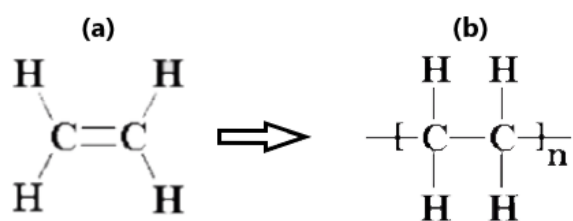


Figura 41-Monomero dell'etilene (a) ed unità ripetitiva del polietilene (b) [48]

Ad oggi, grazie alle loro proprietà, i polimeri vengono utilizzati in innumerevoli applicazioni ingegneristiche e la maggior parte di essi viene prodotta per sintesi partendo da monomeri ottenuti dalla lavorazione del petrolio.

2.4.2-Classificazione dei polimeri

Dato che esistono innumerevoli tipologie di polimeri, in letteratura sono presenti diverse classificazioni degli stessi [49].

Una prima loro suddivisione è quella che li differenzia in base alla loro origine:

- **Polimeri naturali:** composti polimerici presenti in natura; comprendono enzimi, acidi nucleici e proteine, i quali sono di origine biologica ed hanno una struttura particolarmente complessa, mentre quelli di origine vegetale come la gomma naturale e l'amido di cellulosa hanno una struttura molto più semplice.
- **Polimeri sintetici:** composti polimerici artificiali prodotti attraverso diverse reazioni chimiche; essi possono essere suddivisi a loro volta in numerose sottocategorie.

- **Polimeri semisintetici o artificiali:** composti polimerici prodotti attraverso diverse reazioni chimiche che sfruttano come prodotto di partenza un polimero naturale.

Una seconda classificazione può essere effettuata in base alla natura chimica del polimero:

- **Polimeri organici:** l'atomo principale della catena polimerica è il carbonio.
- **Polimeri inorganici:** l'atomo principale della catena polimerica non è il carbonio.

I polimeri organici, al contrario di quelli inorganici, tendono a decomporsi o fondere a temperature relativamente basse e questo è dovuto alla reazione degli atomi di carbonio di cui sono costituiti con l'ossigeno.

Un'altra classificazione è quella che differenzia i polimeri in base al modo in cui i monomeri di cui sono costituiti si dispongono lungo la catena polimerica:

- **Omopolimeri:** polimero costituito da un'unica tipologia di monomero e di conseguenza da un'unica tipologia di unità ripetitiva (all'interno di questa classificazione ricadono, ad esempio, il polietilene ed il polipropilene).
- **Copolimeri:** polimero costituito dalla ripetizione di due o più unità ripetitive differenti; essi possono essere ulteriormente suddivisi in:
 - **Copolimeri Statistici (Random):** l'ordine con cui le unità ripetitive si susseguono è casuale (Figura 42a).
 - **Copolimeri Alternati:** alternanza regolare delle varie unità ripetitive (Figura 42b).
 - **Copolimeri a blocchi (Segmentati):** catena costituita da segmenti caratterizzati dalla ripetizione di una data unità ripetitiva, i quali si alternano con altri segmenti costituiti da un'unità differente; la lunghezza di ciascun segmento risulta variabile (Figura 42c).
 - **Copolimeri ad innesto:** catena principale costituita da un'unica tipologia di unità ripetente; dalla catena principale partono

periodicamente delle catene secondarie costituite da tipologie di unità differenti (Figura 42d).

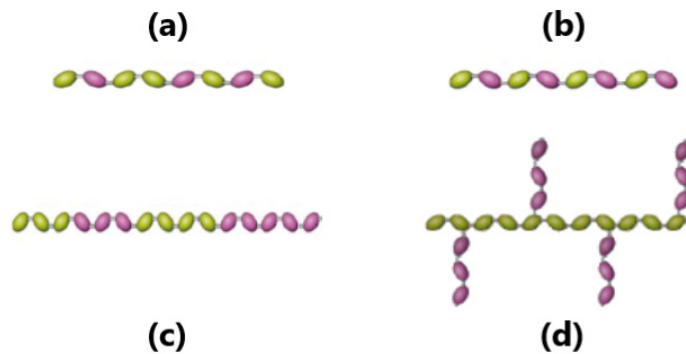


Figura 42-Copolimeri statistici (a), alternati (b), a blocchi (c) e ad innesto (d) [50]

I polimeri possono essere suddivisi anche in base alla disposizione delle catene polimeriche (macromolecole) che li costituiscono:

- **Polimeri lineari**: le macromolecole formano lunghe catene più o meno raggomitolate (Figura 43a).
- **Polimeri ramificati**: le macromolecole sono caratterizzate da una catena principale da cui partono delle ramificazioni laterali (Figura 43b).
- **Polimeri reticolati**: costituiti da macromolecole lineari che si legano tra loro a formare un reticolo (Figura 43c).

I polimeri lineari, possedendo una struttura semplice, sono generalmente solubili in solventi e rammolliscono all'aumentare della temperatura fino a diventare liquidi; al contrario i polimeri reticolati e ramificati, data la loro struttura più complessa, risultano insolubili ed infusibili.

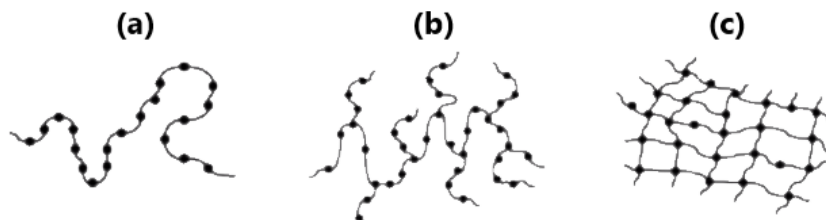


Figura 43-Macromolecola lineare (a), ramificata (b) e reticolata (c) [48]

Un'ulteriore suddivisione dei polimeri viene effettuata in base alla struttura che essi possiedono, ossia in base alle modalità attraverso cui le sue macromolecole sono legate tra loro:

- **Polimeri amorfi:** le macromolecole sono tenute insieme da legami deboli e di conseguenza, non sono in grado di disporsi a formare un cristallo; esse orientano quindi in modo casuale ed assumono una forma raggomitolata (Figura 44).



Figura 44-Disposizione delle macromolecole all'interno di un polimero amorfo [51]

- **Polimeri cristallini:** costituiti da macromolecole fortemente connesse tra loro attraverso legami covalenti; esse si dispongono secondo schemi ben definiti così da formare dei cristalli lamellari di circa 12-20 nm all'interno della struttura, ed a loro volta, quest'ultimi si dispongono con ordine all'interno del volume del polimero. In realtà anche in questa tipologia di polimeri definiti cristallini è sempre presente una piccola quantità di zone amorphe necessarie a legare tra loro i vari cristalli (Figura 45).

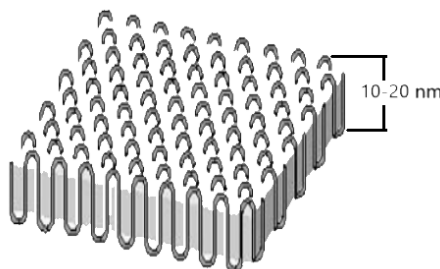


Figura 45-Cristallo lamellare di un polimero cristallino [52]

- **Polimeri semicristallini:** possiedono una struttura al cui interno presenta, in porzioni variabili, sia zone in cui le macromolecole sono disposte in maniera

casuale sia zone in cui si dispongono in modo ordinato; la sua struttura è quindi una combinazione tra quella dei polimeri amorfi e di quelli cristallini. Le zone cristalline vengono chiamate anche cristalliti, ed esse sono legate tra loro da zone amorphe più o meno estese. I cristalliti possono svilupparsi sia in due (Figura 46a) che in tre dimensioni (Figura 46b) ed in quest'ultimo caso si genera una struttura detta sferulitica.

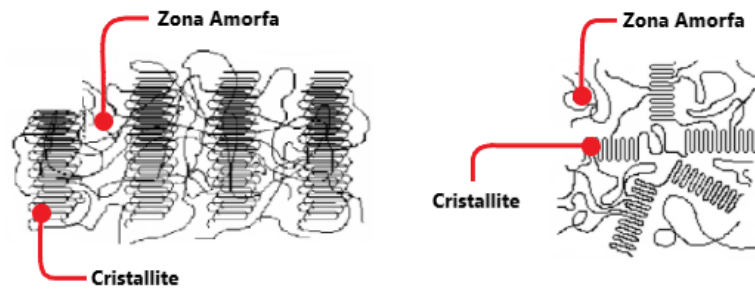


Figura 46-Struttura di un polimero semicristallino nel caso in cui i cristalliti si sviluppano lungo due(a) e tre dimensioni (b) [53]

Il processo con cui i polimeri vengono ottenuti è chiamato processo di polimerizzazione; la particolare tipologia di polimerizzazione utilizzata per svolgere questo processo permette di definire un'ulteriore classificazione dei polimeri:

- **Polimeri di addizione:** ottenuti attraverso un processo di poliaddizione che consiste nell'aggiunta di monomeri insaturi attraverso meccanismi radicalici o ionici di diverso tipo. Quella appena descritta è una reazione a catena che non prevede l'eliminazione di prodotti secondari e che genera dunque catene ad elevato peso molecolare; i polimeri così prodotti possiedono ottime proprietà. In questi polimeri l'unità ripetitiva della catena coincide con il monomero di partenza, per cui il peso molecolare può essere calcolato come la somma dei pesi molecolari dei monomeri presenti nella catena.
- **Polimeri di condensazione:** ottenuti attraverso un processo di policondensazione in cui la formazione del polimero avviene per stadi (inizio, accrescimento, terminazione); in ognuno di questi stadi si ha l'eliminazione di prodotti secondari di basso peso, motivo per cui difficilmente si raggiungono

pesi molecolari elevati. Le proprietà dei prodotti così ottenuti sono generalmente scadenti ad eccezione del nylon; esso riesce comunque a formare catene molto lunghe che gli conferiscono un peso molecolare elevato ed ottime proprietà.

Una delle classificazioni più importanti ed utilizzate per i polimeri è quella che li suddivide in base al loro comportamento termico [54]:

- **Polimeri termoplastici:** sono costituiti da macromolecole lineari o ramificate tenute insieme da legami deboli come, ad esempio, forze di Van Der Waals o legami a idrogeno. Essendo le macromolecole di questi polimeri tenute insieme da legami deboli, questo fa sì che se gli si somministra sufficiente energia termica gli atomi che le compongono iniziano a vibrare a causa dell'aumento di temperatura; questo indebolisce ulteriormente i legami causando inizialmente uno scorrimento semplificato tra le macromolecole, fino ad arrivare poi alla completa fusione del materiale. Fornendogli calore, questi polimeri possono dunque essere più volte rimodellati, ed inoltre, presentano delle temperature di fusione e transizione vetrosa ben definite, al contrario di quanto accade invece nei termoindurenti. Il rimodellamento appena descritto viene considerato reversibile poiché, se il polimero portato a fusione viene in seguito raffreddato, si ripristinano le sue proprietà fisiche e meccaniche originali; in realtà non è totalmente corretto fare questa assunzione poiché ogni volta che il materiale subisce un riscaldamento si perdono, anche se in quantità minima, alcune delle sue proprietà. Di questa categoria di polimeri fanno parte, ad esempio, il Polietilene (PE), il Polietilentereftalato (PET), il Polipropilene (PP) ed il Nylon (PA).
- **Polimeri termoindurenti:** costituiti da macromolecole reticolate tenute insieme da forti legami covalenti che gli permettono di comportarsi come fossero un'unica grande molecola. Fornendo a questi polimeri energia termica non si genera alcun indebolimento dei legami atomici presenti tra le macromolecole

ed arrivati ad una certa temperatura essi, invece di fondere, bruciano. Di conseguenza una volta ottenuti, questi polimeri non possono essere rimodellati, se non con lavorazioni per asportazione di truciolo e questo ne limita le applicazioni; un riscaldamento porterebbe anzi ad un loro ulteriore indurimento poiché favorirebbe la creazione di nuovi legami tra le macromolecole. Sono i primi polimeri ad essere stati sviluppati e, rispetto ai termoplastici, presentano una resistenza meccanica e termica maggiore. Di questa categoria di polimeri fanno parte, ad esempio, il Poliuretano (PU), la Poliimmide (PI) e le resine epossidiche.

L'ultima classificazione che verrà analizzata è quella che suddivide i polimeri in base alla loro risposta alla deformazione (Figura 47) [55]:

- **Fibre:** polimeri costituiti da lunghe macromolecole che si dispongono lungo una direzione preferenziale, la quale viene identificata come direzione della fibra; lungo tale direzione presentano un'elevata resistenza all'estensione ed allo stiramento a causa dei forti legami covalenti presenti tra le varie catene polimeriche, mentre possiedono scarsa resistenza alle sollecitazioni perpendicolare alla fibra. Esistono varie tipologie di fibre, le quali vengono generalmente suddivise in naturali, ottenute dalla trasformazione di materie prime di origine organica (acetato, cupro, ecc.), e sintetiche, ottenute invece dai derivati del petrolio (acrilico, poliammide, neoprene, ecc.).
- **Elastomeri:** polimeri che, come le fibre, sono costituiti da lunghe macromolecole che però in questo caso non si dispongono lungo una direzione preferenziale ma si posizionano in modo casuale all'interno del volume del polimero. Quando il materiale viene stirato, queste macromolecole si allineano lungo la direzione di applicazione del carico per poi tornare alla loro conformazione iniziale quando la sollecitazione viene interrotta; tale meccanismo è facilitato dai deboli legami con cui le macromolecole sono legate (idrogeno, Van Der Waals, ecc...). Gli elastomeri presentano quindi una grande

elasticità, sono in grado di subire grandi deformazioni quando sottoposti a carichi esterni e recuperano completamente tutta la deformazione non appena il carico viene rimosso.

- **Plastiche:** polimeri sintetici ad alto peso molecolare costituiti da catene polimeriche molto lunghe; a temperatura ambiente presentano una buona rigidità che risulta però inferiore rispetto a quella delle fibre lungo la loro direzione preferenziale.

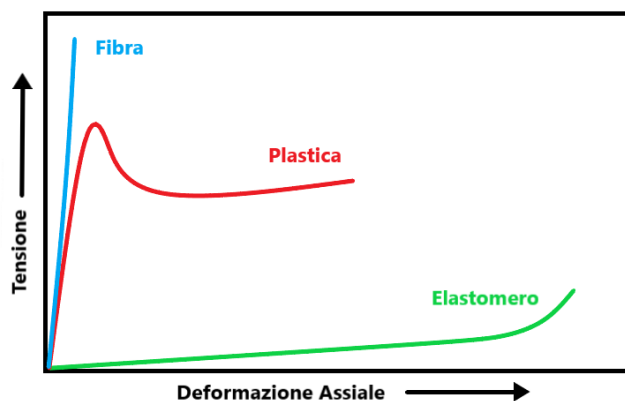


Figura 47-Curva σ - ϵ di fibre, elastomeri e plastiche [53]

2.4.3-Caratteristiche e proprietà dei polimeri

Al giorno d'oggi sono disponibili una grandissima varietà di polimeri, ciascuna delle quali possiede proprietà chimico-fisiche e meccaniche differenti; tali proprietà dipendono da diversi fattori ed in particolare da forma, dimensione e struttura delle macromolecole che costituiscono il polimero, fino ad arrivare alle modalità attraverso cui è avvenuta la polimerizzazione. Oltre ad essere influenzati da queste ed altre grandezze legate alla struttura chimica del materiale, la maggior parte dei polimeri mostra una marcata dipendenza da alcune variabili comuni che ne influenzano notevolmente il comportamento meccanico; ovviamente l'entità della dipendenza da questi fattori dipende dalla particolare tipologia di polimero considerato. Le principali variabili da cui dipende il comportamento esibito dai polimeri sono il tempo di applicazione del carico, la temperatura e la velocità di deformazione; vengono ora

analizzati gli effetti che la variazione di tali grandezze generano sulle proprietà dei polimeri.

2.4.3.1-Comportamento viscoelastico dei polimeri

In questa sezione verrà innanzitutto introdotta la relazione matematica che definisce il comportamento dei materiali polimerici, dopodiché si valuterà la risposta di tali materiali quando soggetti a carichi o deformazioni statiche che si protraggono nel tempo [56].

Un materiale completamente elastico, se sottoposto a carichi statici uniassiali, si deforma linearmente in accordo con la legge di Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Eq. 3})$$

Dove σ è la tensione applicata al materiale, ε la sua deformazione, ed E il suo modulo di Young. In questo caso, quando la forza esterna viene rimossa, il materiale deformato torna istantaneamente alla sua forma originale, a patto che durante la fase di carico non ne sia stata superata la tensione di snervamento (σ_s).

Al contrario, un materiale viscoso è caratterizzato da un comportamento Newtoniano descritto attraverso la seguente legge:

$$\sigma = \eta\dot{\varepsilon} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{Eq. 4})$$

Dove σ rappresenta la tensione applicata al materiale, ε la sua deformazione, η la sua viscosità e t il tempo di applicazione del carico. In questo caso la tensione, oltre ad essere correlata alla deformazione del materiale, dipende anche dalla velocità con cui tale deformazione viene applicata ($\dot{\varepsilon}$), oltre che dalla viscosità del materiale. I materiali che presentano tale comportamento, una volta che subita una certa deformazione, scorrono in maniera irreversibile e non sono più in grado di recuperarla.

Infine, i materiali polimerici possiedono un comportamento che viene detto viscoelastico, il quale presenta caratteristiche intermedie rispetto ai due appena analizzati e dunque, per descriverlo matematicamente, non possono essere utilizzate

le relazioni precedenti. In genere, il comportamento meccanico di questi materiali, viene approssimato alla somma di una componente conservativa relativa al comportamento elastico, ed una componente dissipativa rappresentativa del comportamento viscoso. A tale scopo viene quindi definito il modulo complesso E^* nel seguente modo [57]:

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (\text{Eq. 5})$$

Dove E' è chiamato modulo conservativo e rappresenta l'energia immagazzinata nel materiale, mentre E'' è chiamato modulo dissipativo poiché rappresenta l'energia dissipata.

Per valutare in maniera più approfondita il comportamento dei polimeri, occorre analizzarne la risposta quando soggetti a carichi o deformazioni statiche che si protraggono nel tempo; a tale scopo vengono ora introdotti due fenomeni cui tali materiali sono soggetti, ossia lo scorrimento viscoso (o Creep) ed il rilassamento [58]. Lo scorrimento viscoso si manifesta quando ad un materiale polimerico viene applicata una data tensione e mantenuta costante nel tempo (Figura 48). Appena la tensione viene applicata il materiale subisce una deformazione istantanea che rappresenta la componente di deformazione elastica e mantenendola costante, il materiale continua a deformarsi nel tempo. La deformazione avanza sempre più lentamente fintanto che la tensione interna al materiale eguaglia in modulo quella applicata, dopodiché cessa di aumentare; questa seconda componente di deformazione viene definita deformazione viscoelastica. Una volta rimosso il carico, a patto che non sia stata superata la tensione di snervamento, il materiale recupera tutta la deformazione cui è stato sottoposto; la componente di deformazione elastica viene recuperata immediatamente, mentre quella viscoelastica necessita di un tempo più o meno lungo. La deformazione elastica è dovuta alla distorsione dei legami atomici intramolecolari, ossia a modifiche della forma delle macromolecole e variazioni delle distanze intermolecolari. La deformazione viscoelastica, invece, è dovuta al riarrangiamento a medio e corto raggio dei segmenti di catene polimeriche adiacenti; quest'ultimo meccanismo necessita di tempo per svilupparsi a causa degli attriti intermolecolari,

pertanto, la velocità con cui si verifica dipende dallo stato di aggregazione del materiale. Poiché entrambe le deformazioni possono essere recuperate, da un punto di vista meccanico il fenomeno risulta completamente reversibile, mentre non lo è da un punto di vista termodinamico. Infatti, mentre la componente elastica di deformazione restituisce completamente l'energia da lei immagazzinata durante l'applicazione del carico, al contrario, la componente viscoelastica la restituisce solo parte; una componente dell'energia immagazzinata da quest'ultima viene infatti dissipata a causa degli attriti interni al materiale che si sviluppano durante lo scorrimento a corto e medio raggio delle macromolecole. La componente viscoelastica di deformazione è dunque quella di maggior interesse ai fini dello studio; infatti, lo scopo dei sistemi di riduzione del rinculo che vogliono essere sviluppati è proprio quello di dissipare energia, evitando però il superamento della tensione di snervamento del materiale di cui sono costituiti e deformazioni residue non recuperabili. In realtà, anche quando non viene superata la tensione di snervamento, potrebbero verificarsi deformazioni plastiche di piccola entità legate al riarrangiamento a lungo raggio delle macromolecole; questo fenomeno è causato da moti diffusivi che potrebbero presentarsi all'interno dei materiali polimerici, tuttavia, è raro che si verifichi. Una peculiarità di quest'ultima possibile componente di deformazione è che, oltre a non essere sempre presente, può verificarsi solamente se viene superata una certa soglia di tensione il cui valore è comunque inferiore allo snervamento del materiale. In ogni caso, dato che tale componente di deformazione risulta molto piccola, viene quasi sempre trascurata.

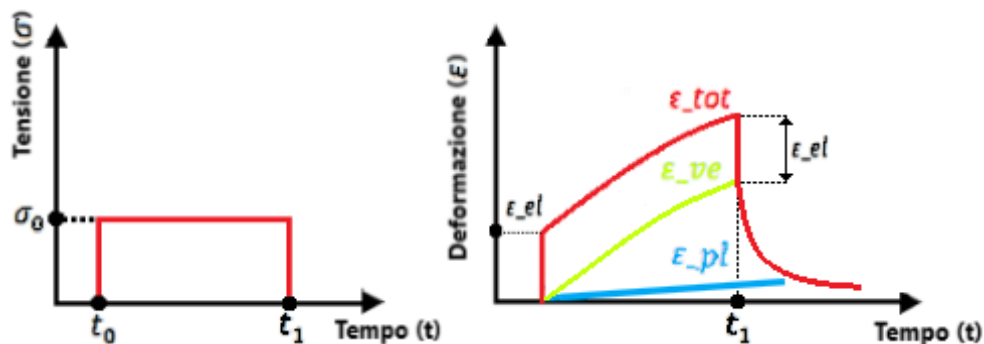


Figura 48-Fenomeno del Creep nei materiali polimerici [59]

Il fenomeno del rilassamento, invece, basandosi sui suoi principi di funzionamento, viene valutato in modo differente. Infatti, viene imposta al materiale una certa deformazione e mantenuta costante per un certo intervallo di tempo (Figura 49); non appena viene applicata la deformazione si instaura improvvisamente un certo valore di tensione, che tende però a diminuire nel tempo. Anche in questo caso quando viene rilasciato, se non è stata superata al suo interno la tensione di snervamento, il materiale recupera tutta la deformazione impostagli precedentemente; per fare questo il materiale impiegherà un certo periodo di tempo più o meno lungo, recuperando prima la componente di deformazione elastica e solo in seguito la componente viscoelastica.

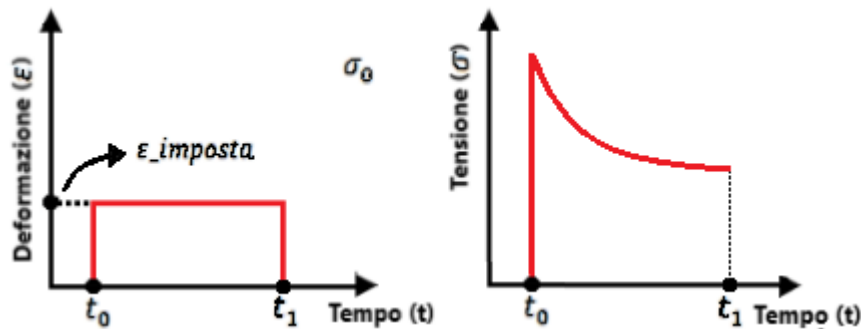


Figura 49-fenomeno del rilassamento nei materiali polimerici [59]

Ovviamente quando soggetto a carichi o deformazioni statiche che si protraggono nel tempo, un polimero può presentare una componente viscoelastica di deformazione di un più o meno marcata; la sua percentuale rispetto alla deformazione totale, valutata attraverso l'indice di cedevolezza al Creep ($D(t)$), dipende infatti dalle caratteristiche del polimero, dal valore di tensione o deformazione applicata, dalla temperatura e dalla velocità di applicazione del carico o della deformazione.

2.4.3.2-Effetto della temperatura

È noto come la temperatura influenzi in modo significativo le proprietà chimico-fisiche e meccaniche di tutti i materiali e non fanno eccezione i polimeri, ed anzi, quando sottoposti ad una variazione di temperatura, essi modificano maggiormente le loro caratteristiche rispetto ad altri materiali. La struttura di cui sono costituiti gioca un

ruolo fondamentale sulla loro sensibilità alle variazioni di temperatura, ed in particolare, vi è una grande differenza tra la risposta mostrata dai polimeri amorfi e semicristallini rispetto a quelli cristallini [60]. Questa differenza può essere meglio compresa ricordando quanto detto in sezione 2.4.2 riguardo i polimeri termoplastici e termoindurenti [61]; i primi sono costituiti da una struttura amorfa o semicristallina e quando vengono riscaldati, prima si ammorbidiscono, ed in seguito, se la temperatura viene ulteriormente aumentata, arrivano a fondere. Al contrario, i polimeri termoindurenti sono caratterizzati da una struttura cristallina e quando vengono riscaldati non fondono né presentano alcun rammollimento, bensì si irrigidiscono. In Figura 50 si nota quanto appena descritto; vengono infatti mostrati gli andamenti dei moduli conservativi, relativi alle tre tipologie di polimero precedentemente citate, in funzione della temperatura. Si osserva come i polimeri semicristallini ed amorfi possono assumere tre stati chimico-fisici differenti: vetroso, gommoso e fuso; il passaggio da uno stato all'altro avviene a temperature ben definite, in corrispondenza delle quali si nota un crollo della rigidità. Questi tre stadi non sono invece presenti nei polimeri cristallini in cui si passa direttamente dallo stato solido alla degradazione; questo avviene in corrispondenza della temperatura limite di stabilità chimica (T_L) alla quale il polimero inizia a subire trasformazioni irreversibili.

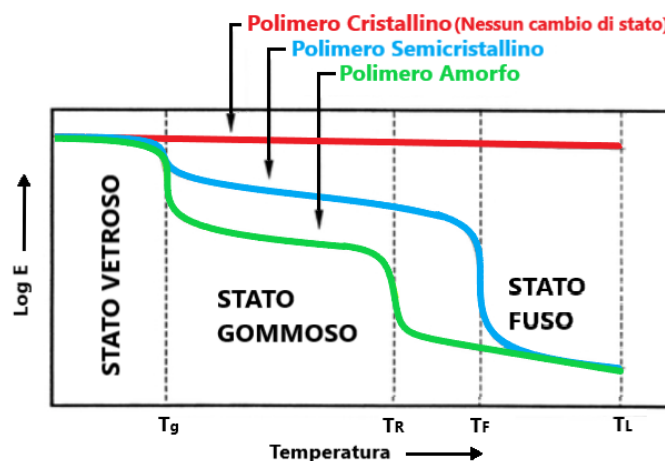


Figura 50-Effetto della temperatura sul modulo elastico di un polimero [62]

Vengono ora vengono analizzate le temperature caratteristiche relative ai polimeri amorfi e semicristallini. T_g , definita temperatura di transizione vetrosa, è alla

temperatura in corrispondenza della quale il polimero passa dallo stato vetroso, ossia dal suo stato solido, ad uno stato gommoso; allo stato vetroso il polimero risulta particolarmente rigido mentre allo stato gommoso risulta molto più malleabile. Si nota come in corrispondenza di tale temperatura la variazione del modulo elastico conservativo (E') risulti più marcata nei polimeri amorfi rispetto che in quelli semicristallini; le variazioni delle caratteristiche di un polimero che avvengono in corrispondenza di T_g sono infatti legate alla modifica dei legami atomici delle zone amorfe presenti al suo interno, ed ovviamente, quest'ultime sono presenti in maggior percentuale nei polimeri amorfi. Da ciò si evince che l'effetto del passaggio dallo stato vetroso a quello gommoso è tanto meno evidente quanto è in proporzione maggiore la percentuale di struttura cristallina presente all'interno del polimero, rispetto a quella amorfa. I polimeri con struttura amorfa e semi cristallina sono caratterizzati anche da un'altra temperatura caratteristica, in corrispondenza della quale si ha il passaggio dallo stato gommoso allo stato liquido; come si nota in Figura 50, per i polimeri amorfi viene indicata come temperatura di rammollimento (T_R), mentre per i semicristallini come temperatura di fusione (T_F). I polimeri amorfi, avendo una struttura disordinata, non presentano un punto di fusione ben definito e dunque, in corrispondenza della temperatura di rammollimento, iniziano a modificare lentamente il proprio stato da solido a liquido. In genere, nell'intorno di tale temperatura, il polimero presenta caratteristiche intermedie ai due stati. Il fenomeno del rammollimento si riduce man mano che la cristallinità del polimero aumenta, ossia man mano che aumenta la percentuale di struttura cristallina all'interno del campione. Nei polimeri semicristallini tale fenomeno scompare e non presentano dunque alcuna temperatura di rammollimento; in questo caso, infatti, il passaggio dallo stato gommoso a quello fuso è più rapido e la temperatura in corrispondenza della quale avviene tale trasformazione è definita temperatura di fusione (T_F).

In realtà non è sempre possibile effettuare una distinzione tra polimeri amorfi e semicristallini poiché esistono un'infinità di polimeri che possiedono caratteristiche intermedie; dunque, quella in Figura 50 è solamente una distinzione a livello generale tra i possibili comportamenti dei vari polimeri.

Le temperature caratteristiche descritte hanno grandissima importanza in ambito tecnologico; devono, per esempio, essere considerate per la scelta del processo di lavorazione più adatto al polimero considerato, piuttosto che per valutare se esso sia compatibile con le condizioni climatiche dell'ambiente in cui è destinato ad operare. Queste temperature possono variare notevolmente da polimero a polimero e possono assumere valori sia positivi che negativi [63]. Finora è stato valutato come si modifica il modulo conservativo al variare della temperatura, ma quando un polimero viene sottoposto ad un certo ΔT , subisce delle modifiche anche il comportamento che esso esibisce se sottoposto a carichi esterni [64].

È bene ricordare che i polimeri, così come i metalli, possono avere un comportamento duttile piuttosto che fragile a seconda della loro composizione chimica e delle condizioni sotto cui si trovano ad operare; il comportamento esibito dai polimeri risulta però molto più sensibile, rispetto a quello dei metalli, alle variazioni di temperatura e questo è dovuto allo scorrimento reciproco delle catene polimeriche li costituiscono; in questi materiali, infatti, i legami atomici che intercorrono tra le macromolecole tendono facilmente ad indebolirsi quando sottoposti ad un aumento di temperatura. In particolare, tanto maggiore in percentuale è la quantità di struttura amorfa presente all'interno del polimero, tanto più il suo comportamento risulta sensibile alle variazioni di temperatura e viceversa; infatti, le strutture amorphe presentano legami deboli tra macromolecole, mentre le strutture cristalline legami forti di tipo covalente. Ovviamente, per ciascun polimero i range di temperatura all'interno dei quali esso presenta modifiche del suo comportamento saranno differenti. In Figura 51 viene riportato l'esempio del polimetilmetacrilato (plexiglass) dal quale si nota quanto appena descritto, ossia come si modifica la curva $\sigma - \varepsilon$ del polimero al variare della temperatura alla quale si trova; man mano che la temperatura aumenta il materiale tende ad assumere un comportamento duttile, al contrario se diminuisce tende ad un comportamento fragile.

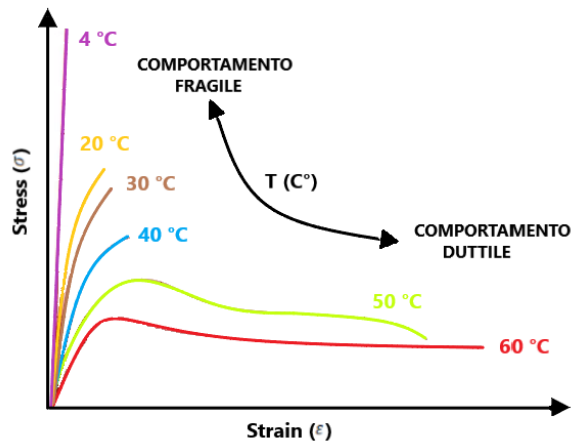


Figura 51-Modifiche del comportamento di un polimero al variare della temperatura [53]

2.4.3.3-Effetto della velocità di deformazione

La temperatura non è però l'unica variabile in grado di modificare il comportamento dei polimeri; infatti, un effetto simile a quello ottenuto attraverso una variazione di temperatura può essere ottenuto modificando la velocità con cui il polimero viene deformato [64]. In particolare, le variazioni del comportamento di un polimero causate da un aumento della velocità di deformazione, sono in linea con quelle che si manifestano in seguito ad una riduzione della temperatura; viceversa, una riduzione della velocità di deformazione porta le stesse conseguenze di un aumento di temperatura. Infatti, osservando quanto riportato in Figura 52, si nota come al diminuire della velocità di deformazione (strain rate) il polimero tende ad esibire un comportamento duttile; al contrario, aumentando la velocità di deformazione esso tende ad esibire ad un comportamento fragile. Le motivazioni alla base di questo fenomeno sono di natura chimica e da ricercarsi dunque nei legami presenti tra le varie catene polimeriche del materiale; in particolare, tale fenomeno è legato allo scorrimento reciproco tra catene polimeriche le quali, a seconda della velocità di deformazione, avranno a disposizione un tempo maggiore o minore per scorrere e riarrangiarsi tra loro. Ovviamente se la velocità di deformazione è alta, avendo meno tempo a disposizione per manifestarsi, gli scorrimenti reciproci tra catene polimeriche tendono ad essere di minor entità; questo rende il materiale rigido e caratterizzato da un comportamento fragile. Viceversa, una velocità di deformazione bassa favorisce gli

scorrimenti tra macromolecole e questo lo rende malleabile e caratterizzato da comportamento duttile. Come nel caso della temperatura, l'impatto della velocità di deformazione sul modulo complesso e sul comportamento del materiale sarà tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale di struttura amorfa presente nel polimero considerato; essendo la struttura amorfa caratterizzata da legami deboli tra macromolecole, questo fa sì che lo scorrimento reciproco tra quest'ultime sia facilitato.

Come verrà analizzato meglio nel capitolo successivo, durante lo sviluppo delle nuove strutture atte alla riduzione del rinculo sarà necessario fare in modo che esse, quando deformate, presentino una componente di deformazione viscoelastica; questa, andandosi a sommare alla deformazione di natura elastica, permetterà di dissipare energia ed attenuare di conseguenza il picco di forza trasmessa. Ottenere una componente di deformazione viscoelastica non è però affatto scontato poiché le forze da attenuare, essendo legate allo sparo e dunque di natura impulsiva, sviluppano elevate velocità di deformazione; questo implica che le macromolecole di cui è costituito il polimero hanno a disposizione poco tempo per scorrere reciprocamente e manifestare la componente viscoelastica di deformazione.

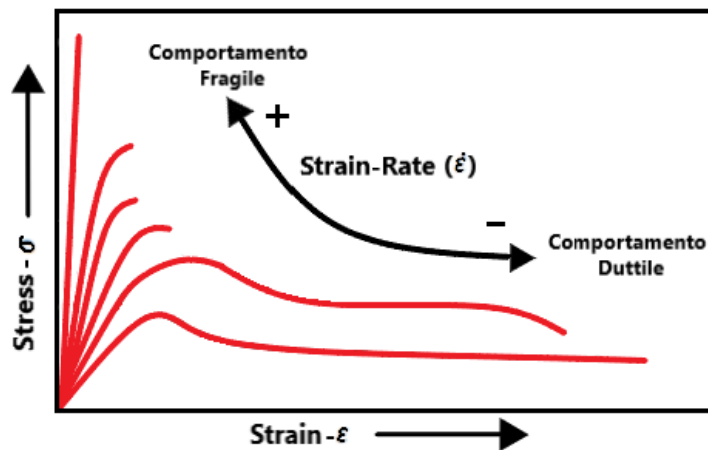


Figura 52-Modifica del comportamento di un polimero termoplastico al variare della velocità di deformazione [65]

Capitolo 3-Materiali e Metodi

3.1-Introduzione

In questo capitolo verrà innanzitutto analizzato in maniera più approfondita il sistema Progressive Comfort cercando di identificarne vincoli costruttivi e di utilizzo, i quali dovranno poi essere estesi anche ai sistemi futuri.

Verranno poi definiti nel dettaglio gli obiettivi che i nuovi sistemi dovranno essere in grado di raggiungere. Quest'ultima analisi, combinata con quella dei vincoli, ha permesso di gettare le basi per i primi concept. Infatti, sulla base di quanto emerso dalle analisi appena descritte sono state valutate diverse possibili soluzioni realizzative del nuovo sistema, per poi sceglierne le più promettenti.

Si passerà poi ad analizzare tutti i metodi attraverso cui è stata effettuata la caratterizzazione dei sistemi scelti; in particolare essi sono stati sottoposti a delle prove sperimentali, suddivise in statiche e dinamiche, e ad analisi agli elementi finiti.

Verranno infine descritte anche le modalità attraverso cui queste prove ed analisi sono state effettuate; nel caso delle prove sperimentali saranno analizzate le macchine di prova attraverso cui esse sono state effettuate ed i relativi set-up di misura, mentre per quanto riguarda le analisi FEM se ne indicheranno i software ed i set-up di analisi utilizzati.

3.2-Analisi del sistema Progressive Comfort e dei relativi vincoli

I dispositivi atti alla riduzione del rinculo attualmente utilizzati in Benelli sono due: Il Sistema Comfortech e il Sistema Progressive Comfort. Nel proseguo dello studio verrà analizzato da un punto di vista tecnico solamente il sistema Progressive Comfort, poiché sarà quest'ultimo ad essere utilizzato come base per lo sviluppo dei nuovi sistemi. Come mostrato precedentemente nel paragrafo 2.1, esso è costituito dall'insieme di quattro componenti, ossia Case, Inserto Fisso, Inserto Mobile e Calciolo di cui se ne descrive ora in maniera più approfondita il funzionamento. In Figura 53 si nota come il Calcio risulta solidale al Case, motivo per cui durante lo sparo

quest'ultimo si trova ad arretrare assieme all'arma; il Case risulta però solidale anche all'Inserito Fisso e di conseguenza anche quest'ultimo è vincolato ad arretrare con l'arma. Il Calciolo viene invece considerato fisso poiché durante lo sparo si trova in contatto con la spalla del tiratore che ne impedisce il movimento; esso risulta inoltre solidale all'Inserito Mobile che si trova quindi a sua volta vincolato. Essendo l'Inserito Fisso libero di arretrare, quello Mobile solidale alla spalla del tiratore, ed i due inserti in contatto attraverso le loro alette, questo fa sì che durante lo sparo si verifichi un moto relativo tra i due che porta le alette a flettersi, generando così l'azione smorzante desiderata.

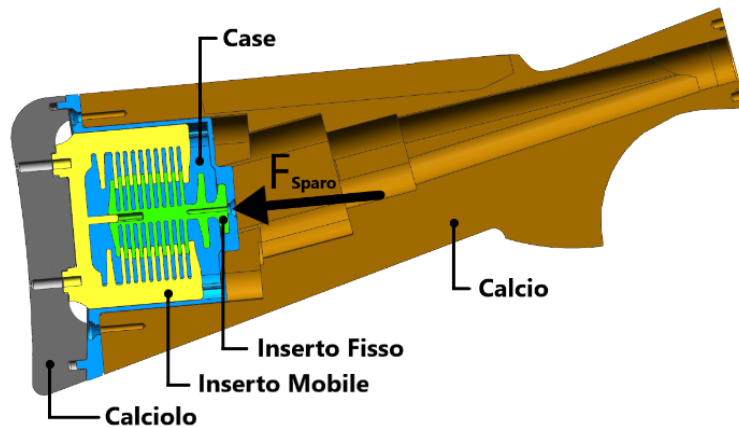


Figura 53-Componenti del sistema Progressive Comfort [2]

Al contrario di quanto suggeriscono i nomi assegnati ai componenti è l'Inserito Fisso ad effettuare il moto retrogrado; nonostante ciò, si è scelta tale nomenclatura poiché considerando un sistema di riferimento solidale con l'arma è possibile considerare l'Inserito Mobile in movimento e tale riferimento permette di comprendere più facilmente il moto relativo che si instaura tra Inserito Fisso ed Inserito Mobile. Infatti, si considera che l'Inserito Mobile scorra all'interno del Case attraverso le guide poste su entrambi i componenti, le quali vengono mostrate in Figura 54.

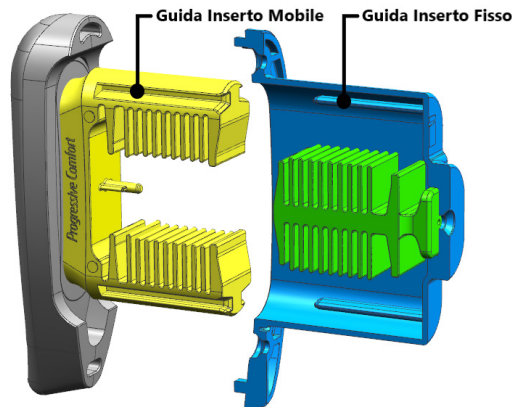


Figura 54-Guide attraverso cui avviene lo scorrimento reciproco tra Inserito Mobile e Case [2]

Non tutte le alette di cui sono provvisti i due inserti entrano però in contatto reciproco nello stesso istante. Il sistema è infatti costituito da tre differenti set di alette che ne permettono il funzionamento progressivo, ciascuna delle quali inizia a lavorare in seguito a valori di spostamento dell'Inserito Fisso differenti, i quali dipendono dall'energia sviluppata dalla cartuccia utilizzata.

Nelle immagini di Figura 55 è possibile osservare il funzionamento del sistema Progressive Comfort al variare della cartuccia sparata e per ciascuna configurazione vengono rappresentate le tensioni raggiunte all'interno dei due inserti. Nella condizione indeformata vi è un semplice contatto tra le alette del primo set; esse iniziano invece a deformarsi a flessione nel caso in cui si vada a sparare con cartucce a bassa energia. Se si continua poi ad aumentare la forza in gioco utilizzando cartucce a media energia, anche le alette più spesse relative al secondo set iniziano a lavorare; infine, se vengono sparate cartucce ad alta energia entrano in gioco anche le ultime alette disponibili, ossia quelle del terzo set.

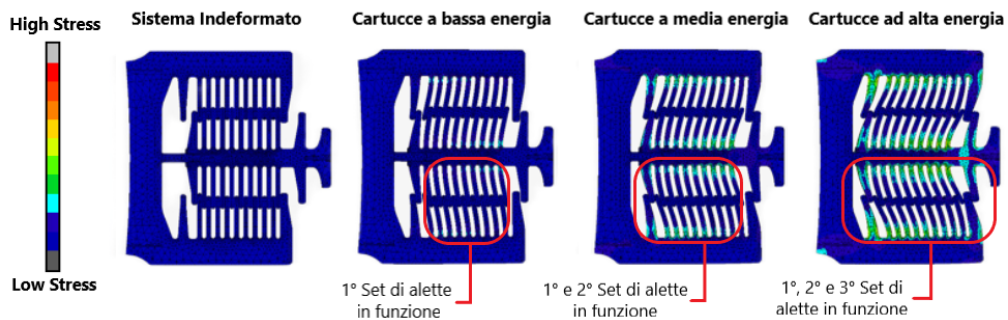


Figura 55-Contatto progressivo delle varie alette all'aumentare della forza di sparo ed andamento delle tensioni all'interno del sistema [2]

In Figura 56 viene invece graficata la forza che si sviluppa nel sistema in funzione di uno spostamento imposto all'Inserito Mobile pari a 9,5mm; si nota chiaramente il funzionamento progressivo del sistema poiché si ha un primo tratto in cui esso possiede una rigidezza K_{1s} , che coincide con il contatto delle sole alette del primo stadio, dopodiché entrano in gioco anche quelle del secondo stadio e la rigidezza aumenta assumendo un valore pari a K_{2s} ; infine quando iniziano a lavorare anche quelle del terzo stadio si sviluppa una rigidezza pari a K_{3s} .

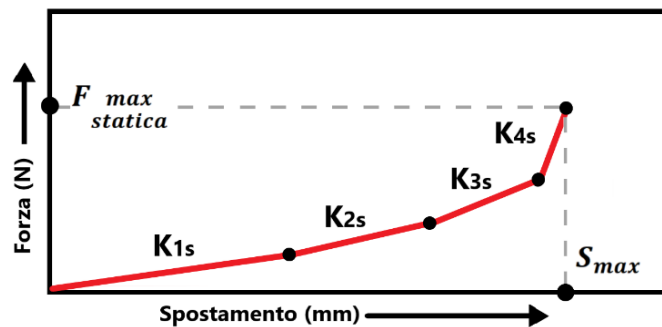


Figura 56-Curva F-S statica che mostra il funzionamento progressivo del Progressive Comfort [2]

Nel grafico si nota un ulteriore tratto al quale è associato un valore di rigidezza K_{4s} che ha inizio quando l'Inserito Mobile, arrivato al suo fine corsa che corrisponde a 9mm di spostamento, entra in contatto diretto con il Case; essendo quest'ultimo molto più rigido rispetto alle alette del sistema, fa sì che la pendenza della curva aumenti nettamente in quest'ultimo tratto, il quale termina in corrispondenza di una deformazione del sistema pari a 9,5mm. In realtà durante l'utilizzo dell'arma tale spostamento non viene mai raggiunto, ed è stato valutato solamente per tenere conto di quello che sarebbe il comportamento del sistema nel caso in cui esso fosse inavvertitamente sottoposto a forze di sparo superiori a quelle standard.

Quanto mostrato è però l'andamento della curva F-S ricavata attraverso un'analisi agli elementi finiti, relativa al caso in cui lo spostamento imposto di 9,5mm sia applicato con incrementi molto lenti dello stesso, ossia in maniera quasi statica. In realtà, quando questo sistema viene utilizzato all'interno dell'arma, la forza che si scarica su di esso in seguito allo sparo non viene impressa in modo statico, bensì dinamico. Dato che il sistema è costituito da materiali polimerici ed essendo le

proprietà di quest'ultimi dipendenti dalla velocità di deformazione, allora il comportamento dinamico del sistema non coincide con quanto rappresentato in Figura 56. Infatti, applicare al sistema il carico in modo dinamico, o alternativamente imporre uno spostamento dinamico, ne provoca un aumento della rigidità e di conseguenza con la stessa deformazione si ottengono dei valori superiori di forza. Da prove sperimentali si è visto come per il Progressive Comfort l'andamento della curva F-S dinamica possa essere ottenuta andando a moltiplicare i valori di forza del caso statico per un opportuno coefficiente moltiplicativo, il cui valore non verrà però indicato per questioni di privacy aziendale. Ovviamente tale coefficiente risulta fortemente legato alla geometria dei componenti, così come al materiale ed alla velocità di deformazione cui il sistema è stato sottoposto e per questo motivo non potrà essere utilizzato come coefficiente di valenza generale ed essere automaticamente esteso anche ai sistemi futuri. Poiché questo coefficiente viene determinato considerando un grafico Forza-Spostamento e non Tensione-Deformazione si ha che quella che viene valutata è la rigidità relativa all'insieme di materiale e struttura; di conseguenza una variazione della geometria del sistema o la scelta di un nuovo materiale potrebbero portare a cambiamenti più o meno marcati di tale coefficiente.

Vengono ora mostrati i vincoli costruttivi che l'attuale sistema soddisfa e che dovranno quindi essere soddisfatti anche dal nuovo sistema, necessari a far sì che la sua funzione sia svolta correttamente: questi sono principalmente suddivisibili in vincoli relativi al comportamento dinamico del sistema ed in vincoli relativi ai materiali utilizzati.

3.2.1-Vincoli relativi al comportamento dinamico del sistema

Per definire il comportamento dinamico del nuovo sistema si farà riferimento alla curva F-S statica utilizzata per descrizione del funzionamento del Progressive Comfort (Figura 56); In questo caso verranno definiti tre imprescindibili punti caratteristici sulla curva F-S (Figura 57) mentre l'andamento non sarà soggetto a particolari vincoli poiché non vi sono associazioni dirette tra quello che è l'andamento della curva F-S di una

struttura ed il suo assorbimento energetico. Pertanto, la curva F-S potrà quindi assumere un qualsivoglia andamento continuo senza dover necessariamente presentare un andamento discreto (lineare a tratti), come invece succede in quella relativa al Progressive Comfort. Uno dei punti caratteristici per i quali la curva dovrà necessariamente passare è sicuramente l'origine degli assi (P_1); Il secondo punto caratteristico, indicato come P_2 , è quello che presenta uno spostamento del sistema pari a 3,2mm ed una forza pari a 70N applicata staticamente, poiché la curva F-S che si sta considerando è appunto quella relativa al caso statico: il valore di forza di 70N rappresenta il carico medio di stretta che un tiratore esercita sulla spalla quando imbraccia un'arma. Questo punto deve essere ottenuto poiché il sistema dovrà permettere all'utente di notare, quando va ad applicare manualmente sul calciolo una piccola forza, uno spostamento visibile ad occhio nudo; questo gli permetterà di percepire già al momento dell'acquisto una sensazione di comfort dell'arma, senza doverla necessariamente provare sul campo.

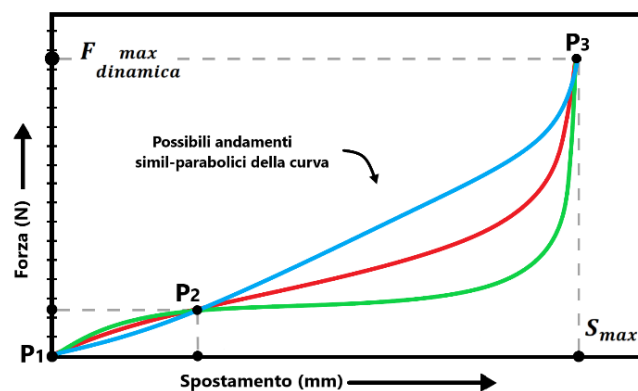


Figura 57-Punti caratteristici da mantenere all'interno della curva F-S, ed alcuni possibili andamenti della stessa [2]

Il terzo ed ultimo punto caratteristico della curva che si vuole ottenere (P_3) è quello che coincide con i valori massimi di spostamento e forza, i quali vengono raggiunti attraverso l'utilizzo di cartucce ad alta energia. Al contrario della forza, la quale risulta direttamente legata all'energia sviluppata durante lo sparo, lo spostamento massimo raggiungibile attraverso l'utilizzo di cartucce ad alta energia è invece una grandezza sulla quale si ha controllo e che nel Progressive Comfort corrisponde a 9mm: tale

valore era stato imposto in fase di progetto del sistema per evitarne un eccessivo movimento in fase di sparo che avrebbe reso l'arma instabile, con conseguente difficoltà di messa in mira del colpo successivo, come accade ad alcuni sistemi di riduzione del rinculo della concorrenza già presenti sul mercato. Per i nuovi sistemi che si andranno a sviluppare si è però pensato di non vincolare il valore dello spostamento massimo a 9mm, ma di concedere al sistema la possibilità di subire deformazioni maggiori in modo tale da avere un più ampio margine di manovra per il suo sviluppo; si è scelto di aumentare lo spostamento disponibile anche perché, in linea generale, maggiore è lo spostamento che un dispositivo ha a disposizione, maggiore è l'assorbimento energetico che riesce a generare. Di contro però, il valore della deformazione dovrà comunque limitarsi ad assumere valori di poco superiori ai 9mm attuali, poiché spostamenti eccessivi potrebbero influire sulla stabilità dell'arma. Ovviamente, al contrario di quanto accadeva per i punti precedenti in cui il valore dello spostamento risultava un vincolo fisso, in questo caso esso risulta solamente un limite superiore; infatti, se si riuscisse ad ottenere un sistema che porti a performance maggiori dell'attuale attraverso spostamenti inferiori, non sarebbe di certo un problema, bensì un vantaggio.

3.2.2-Vincoli relativi ai materiali utilizzati

I materiali utilizzabili per i nuovi Sistemi Comfort devono obbligatoriamente possedere delle caratteristiche che li rendano idonei all'applicazione considerata.

Dovranno innanzitutto possedere delle prestazioni meccaniche adeguate che permettano al sistema di resistere alle sollecitazioni cui si troverà sottoposto durante il suo utilizzo; sarà necessario che presentino compatibilità chimica con un certo numero di elementi con cui potrebbero venire in contatto durante tutta la loro vita utile (Olio, Alcol, Plasma, ecc...).

Dovranno inoltre essere in grado resistere a temperature estreme, che vanno dai -40°C agli 80°C, senza presentare fenomeni di rammollimento o transizione vetrosa; per quanto riguarda invece la resistenza ad usura e fatica, è necessario che garantiscano la resistenza del sistema a cicli di 100.000 ripetizioni.

3.3-Definizione degli obiettivi

Come già accennato nel Capitolo 1, attraverso questo studio si cercherà di ottenere un sistema atto alla riduzione del rinculo che fornisca delle performance migliori rispetto a quelle attualmente ottenute, le quali verranno ricercate sfruttando delle innovazioni tecnologiche.

Andando più nel dettaglio, l'obiettivo principale del sistema che si andrà a sviluppare è quello di permettere una riduzione del picco di forza di rinculo maggiore rispetto a quanto già effettuato dal sistema Progressive Comfort; questo porterebbe a migliorare il comfort dell'arma e ne aumenterebbe l'apprezzamento da parte dell'utente.

Osservando in Figura 58 l'andamento della forza impulsiva generata sulla spalla del tiratore durante lo sparo in funzione del tempo, si nota che a differenza del caso in cui si spari senza utilizzare alcun sistema di attenuazione, il "Progressive Comfort" provoca una riduzione del picco di oltre il 30%, sia che si consideri il caso in cui vengono utilizzate cartucce ad alta che a bassa energia. Risulta quindi indispensabile che il nuovo sistema permetta una riduzione del picco di circa il 50%, cosicché l'utilizzatore possa effettivamente percepirne un miglioramento, poiché riduzioni inferiori non riuscirebbero ad essere apprezzate.

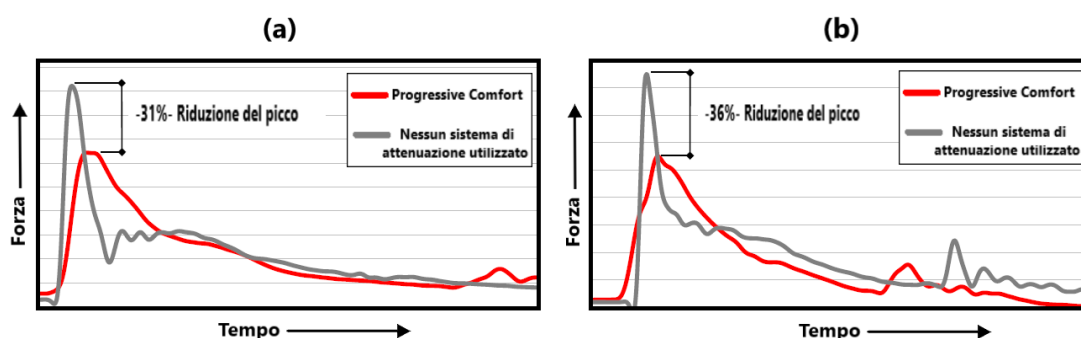


Figura 58-Picco di forza raggiunto con e senza l'utilizzo del Sistema Progressive Comfort, relativo all'utilizzo di cartucce a bassa (a) ed alta energia (b) [2]

È opportuno ripetere che, al contrario di quanto avviene nel sistema attuale, si cercherà di ridurre il picco di forza attraverso una dissipazione energetica legata sia ad una nuova struttura dell'elemento smorzante sia alla componente viscoelastica di deformazione del materiale di cui sarà costituito il sistema; infatti, nel Progressive

Comfort la riduzione del picco di rinculo è principalmente legata ad un ritardo della forza nel tempo e ad una dissipazione di energia causata dagli attriti che si sviluppano tra i vari componenti del sistema. Ovviamente, gli effetti di dissipazione energetica legati alla componente di deformazione viscoelastica del materiale, potranno poi sommarsi a quelli del ritardo della forza nel tempo, ed a quelli dovuti ad eventuali strisciamenti presenti tra le parti delle strutture; tutti questi effetti concorreranno ad abbassare il picco di rinculo.

Oltre alla riduzione del picco di forza di rinculo che si scarica sulla spalla del tiratore, questo sistema dovrà permettere di raggiungere ulteriori obiettivi che, nonostante non verranno approfonditi in questo studio, risultano ugualmente importanti. Tale sistema dovrà infatti possedere un peso inferiore o al massimo uguale a quello del Progressive Comfort; questo poiché le armi semiautomatiche Benelli, avvalendosi dell'Inertia Driven System (Sistema Inerziale), necessitano di un peso totale dell'arma contenuto al fine di garantirne l'affidabilità con tutte le diverse grammature di cartucce; inoltre, un'arma più leggera è da ricercarsi anche perché sinonimo di comfort e maneggevolezza.

Poiché lo scopo di questo studio è quello di ricercare soluzioni alternative agli attuali sistemi di riduzione del rinculo, che possano poi essere applicati in futuro ad una quanto più ampia gamma possibile di fucili prodotti, questo ne rende il costo di realizzazione un fattore da tenere assolutamente in considerazione; in particolare uno degli obiettivi è quello di far sì che il nuovo sistema non presenti costi superiori all'attuale, tenendo a mente che un aumento di costo può essere giustificato solamente da un incremento notevole della performance.

3.4-Individuazione del nuovo sistema

3.4.1-Primi Concept e scelta delle migliori soluzioni

Una volta identificati i vincoli del sistema e gli obiettivi che esso dovrà soddisfare, ne sono state poi proposte ed analizzate diverse possibili soluzioni realizzative.

Inizialmente non ci si è posti limiti e sono stati valutati svariati possibili sistemi che sfruttassero come base di partenza, sia il Sistema Comfortech, che il sistema Progressive Comfort; inoltre dato che il sistema da sviluppare deve prevedere al suo interno delle innovazioni tecnologiche si è pensato alla possibilità di realizzarlo attraverso dei processi di Additive Manufacturing (AM) che permettono di realizzare geometrie particolari non realizzabili con i processi tradizionali.

Valutando poi meglio obiettivi e vincoli si è pensato di eliminare tutte quelle soluzioni che utilizzavano come base il Sistema Comfortech poiché, essendo i costi di produzione legati all'AM tutt'ora elevati, stampare pezzi di dimensioni importanti come possono essere quelle legate a tale sistema genererebbe costi non sostenibili; si è quindi deciso di utilizzare come base il Sistema Progressive Comfort in quanto possiede dimensioni limitate e di conseguenza costi di stampa inferiori rispetto al Sistema Comfortech. La scelta di utilizzare come base tale sistema è stata dettata anche dal fatto che la tecnologia AM, risulta relativamente nuova e le conoscenze a riguardo limitate; per iniziare ad approcciarsi ad essa è conveniente partire da problemi semplificati, domini ristretti e quindi volumi limitati come sono quelli del Progressive Comfort. Non è però escluso che se questo studio porterà risultati soddisfacenti e se in futuro tale tecnologia diminuirà i suoi costi di produzione, allora i risultati ottenuti possano essere applicati anche a dei sistemi che utilizzino come base il "Sistema Comfortech".

Utilizzando come base il sistema Progressive Comfort si è dunque deciso di imporre come vincolo costruttivo quello di mantenere invariati Case e Calciolo, eliminando invece gli altri elementi del sistema. Sono stati infatti sostituiti Inserto Fisso e Mobile con un unico componente, il quale dovrà essere in grado di attenuare il rinculo dell'arma; sarà inoltre necessario che quest'ultimo possieda delle guide che ne

permettano lo scorrimento all'interno del Case, così come avveniva per l'Inserito Mobile.

Vengono ora analizzate le due principali soluzioni realizzative ipotizzate, relative al componente atto alla riduzione del rinculo che dovrà essere inserito all'interno del nuovo sistema; tali strutture verranno in seguito realizzate e testate poiché in esse si sono intravisti forti elementi innovativi che possano permetterle di differenziarsi rispetto al sistema attuale. La prima soluzione, mostrata in Figura 59a, è costituita da un certo numero di "molle", cui spetta il compito di attenuare la forza di rinculo, e da un certo numero di elementi che ne garantiscono il fine corsa, atti ad evitarne una deformazione eccessiva che le porti a rottura; di questa particolare soluzione ne sono state proposte diverse varianti che verranno poi analizzate in maniera più approfondita nel paragrafo 3.4.2. Essa è inoltre provvista alle estremità di due basamenti che permettono alla forza di sparo di distribuirsi in modo omogeneo all'interno di tutta la struttura. La seconda soluzione realizzativa prevede invece l'utilizzo di Lattice Structure, di cui un esempio ne viene mostrato in Figura 59b, che come noto sono particolarmente utilizzate nell'ambito dell'assorbimento degli urti. Si è deciso di testare diverse varianti di tali strutture, le quali differiscono notevolmente tra loro e che verranno analizzate in maniera più approfondita nel capitolo 3.4.3. Anche quest'ultima tipologia di struttura possiede alle estremità dei basamenti atti a distribuirne in maniera omogenea la forza di sparo al loro interno.

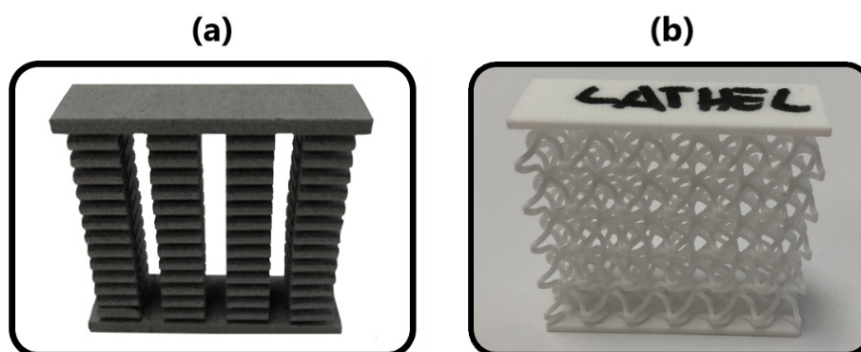


Figura 59-Campioni rappresentativi della prima (a) e seconda (b) soluzione realizzativa [2]

È doveroso aggiungere che le strutture di entrambe le soluzioni realizzative scelte verranno realizzate attraverso processi di AM, poiché la loro geometria ed i loro spessori non possono essere ottenuti attraverso dei processi produttivi convenzionali.



3.4.2-Primo gruppo di strutture

La prima soluzione realizzativa individuata è stata applicata a tre differenti strutture che differiscono tra loro per numero e dimensioni delle molle presenti; ovviamente tale caratteristica incide sulla rigidezza del sistema e questo permette di ottenere tre strutture che possano resistere a carichi differenti ed essere quindi, in studi futuri, combinate per realizzare il comportamento progressivo ricercato. Come mostrato in Figura 61 le tre strutture verranno identificate con i seguenti nomi: Small, Medium e Large.



Figura 60-Strutture del primo gruppo [2]

Tutte e tre queste strutture sono state modellate attraverso il software HyperWorks ed ottenute attraverso la tecnica di stampa Multi Jet Fusion (MJF) che utilizza un agente di fusione per consolidare il letto di polvere (Capitolo 2); in particolare la macchina utilizzata in questo caso è una HP-4200 ed il materiale di cui sono costituite tali strutture è un PA12 il cui nome specifico è PA12-JetFusion il cui datasheet viene riportato in Figura 62.

Multi Jet Fusion  
Polvere PA12

PA12 (MJF)		scheda tecnica
Proprietà generali	Densità delle parti	1,01 g/cm ³ <small>Metodo ASTM D972</small>
	<hr/>	
Proprietà meccaniche	Resistenza alla trazione, carico max - XY	48 MPa/6960 psi
	Resistenza alla trazione-, carico max - Z	48 MPa/6960 psi
	Modulo di trazione - XY	1700 MPa/245 ksi
	Modulo di trazione - Z	1700 MPa/245 ksi
	Allungamento a rottura - XY	20%
	Allungamento a rottura - Z	15% <small>Metodo ASTM D638</small>
Proprietà termiche	Temperatura di rammollimento (0,45 MPa) - Z	175 °C
	Temperatura di rammollimento (1,82 MPa) - Z	95 °C <small>Metodo ASTM D648</small>

Figura 61-Datasheet PA12-JetFusion (PA12) [66]

3.4.3-Secondo gruppo di strutture

Come accennato nel paragrafo 3.4.1 la seconda soluzione realizzativa consiste nell'utilizzare differenti tipologie di Lattice Structure. Prima di procedere alla modellazione attraverso l'utilizzo di opportuni software si è cercato di capire sulla base di quali principi scegliere tali strutture poiché ne esistono infinite varianti.

Nonostante l'obiettivo finale sia quello di realizzare delle strutture complesse che siano in grado di modulare la loro risposta in funzione delle differenti tipologie di cartucce sparate ricreando quindi un comportamento progressivo simile a quello del Progressive Comfort, si è comunque deciso di generare inizialmente delle strutture semplici; questo ha portato ad avere un maggior controllo dei vari parametri necessari alla loro modellazione, e ad una più facile interpretazione dei risultati ottenuti dalla loro successiva caratterizzazione. Solamente in studi futuri, sulla base dei risultati ottenuti, sarà quindi possibile combinare tali strutture, per arrivare ad individuarne una che possieda tutte le caratteristiche ricercate. Si è deciso di utilizzare questo approccio poiché, come descritto nel capitolo 2, le Strutture Lattice risultano caratterizzate ed influenzate da un grandissimo numero di fattori: materiale, dimensione e geometria delle celle, disposizione e metodo di interconnessione tra quest'ultime, forma e dimensione delle travi o delle superfici di cui sono costituite, densità relativa della struttura e così via.

Sulla base di queste considerazioni sono state scelte delle Lattice Structure che possiedono celle di forma e dimensioni uguali tra loro e disposte omogeneamente all'interno del workspace, ciascuna delle quali è stata dimensionata per resistere a carichi differenti così da poter in futuro combinarle e ricreare il comportamento progressivo ricercato. In Figura 63 vengono mostrate le strutture scelte ed è possibile notare come tra di esse solamente la struttura SPIN risulti una struttura Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), mentre tutte le altre sono delle Bending Dominated Structure (BDS).

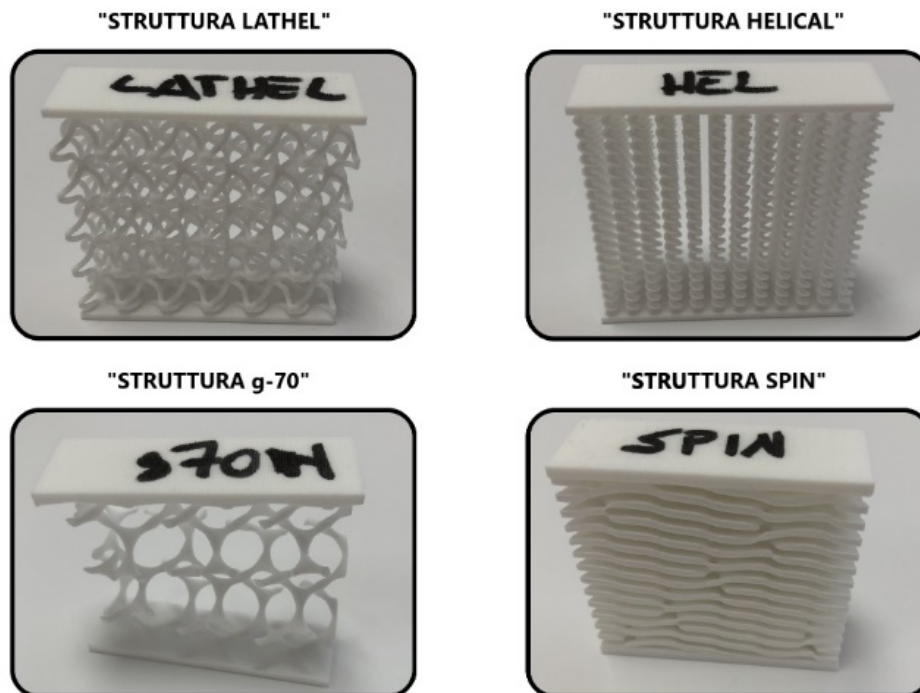


Figura 62-Strutture del secondo gruppo [2]

Queste strutture sono state modellate attraverso il software nTopology ed ottenute attraverso la tecnica di stampa Selective Laser Sintering (SLS) che utilizza un fascio laser per consolidare il letto di polvere (Capitolo 2); in particolare la macchina utilizzata in questo caso è una EOS-P770 ed il materiale di cui sono costituite tali strutture è un PA12 il cui nome specifico è PA-2200-Balance 1.0. Il datasheet di tale materiale viene riportato in Figura 64.

PA 2200 Balance 1.0			
PA12		EOS GmbH - Electro Optical Systems	
Mechanical properties			
Izod Impact notched (23°C)	4.4	kJ/m ²	ISO 180/1A
Shore D hardness (15s)	75	-	ISO 868
3D Data			
		Value	Unit
Tensile Modulus			
X Direction	1650	MPa	ISO 527-1/-2
Y Direction	1650	MPa	
Z Direction	1650	MPa	
Tensile Strength			
X Direction	48	MPa	ISO 527-1/-2
Y Direction	48	MPa	
Z Direction	42	MPa	
Strain at break			
X Direction	18	%	ISO 527-1/-2
Y Direction	18	%	
Z Direction	4	%	
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)			
	53	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)			
	4.8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)			
	1500	MPa	ISO 178
Thermal properties			
		Value	Unit
Melting temperature (20°C/min)			
	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)			
	163	°C	ISO 306
Burning behavior			
			UL 94
Test passed, HB	0.5	mm	
Test passed, HB	1.6	mm	
Test passed, HB	3.2	mm	

Figura 63-Datasheet PA 2200-Balance 1.0 (PA12) [67]

3.5-Procedure di analisi delle varie strutture

3.5.1-Introduzione

In questo paragrafo vengono descritte tutte le procedure di analisi seguite per la caratterizzazione delle strutture, attraverso cui sono state individuate le più indicate al raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Tutte le strutture realizzate sono state sottoposte sia a prove virtuali che sperimentali; le prove sperimentali sono state suddivise in statiche e dinamiche ed effettuate presso il laboratorio balistico di Benelli Armi; per quanto riguarda invece le prove virtuali, sono state effettuate solamente analisi agli elementi finiti (FEM) di tipo statico, poiché per effettuare delle analisi dinamiche sarebbe stata necessaria la conoscenza di svariati parametri relativi a materiali e strutture che per essere ricavati necessitano di numerose prove e quindi tempistiche molto lunghe.

Viene ora descritto nel dettaglio il flusso di lavoro seguito per effettuare le prove.

Innanzitutto, per ciascuna struttura sono stati prodotti dei campioni da sottoporre alle prove sperimentali statiche e dinamiche, ed in particolare, per ogni tipologia di struttura sono stati stampati sei provini di cui tre utilizzati per le prove statiche e tre per quelle dinamiche. Per ogni tipologia di prova eseguita su di una data struttura, sono stati considerati tre campioni della stessa in modo tale che i risultati potessero avere valore statistico.

In seguito, sono state effettuate le prove statiche avvalendosi di un sistema di prova universale "Instron" tramite cui si è ricavato, per ciascuna struttura, l'andamento della forza ad essa applicata in funzione del suo spostamento.

Si è poi passati alle prove dinamiche che consistono in prove d'impatto realizzate servendosi di un maglio, attraverso le quali è stato possibile valutare spostamento, accelerazione e forza trasmessa dalle varie strutture. Delle prove statiche se ne è poi valutata la riproducibilità, mentre delle prove dinamiche se ne è considerata anche la ripetibilità.

Infine, sono state eseguite delle analisi FEM statiche che, al contrario delle prove sperimentali, non sono state eseguite sulla totalità delle strutture; infatti, essendo

quest'ultime costituite da geometrie complesse, si è reso necessario l'utilizzo di mesh sofisticate che hanno portato a lunghi tempi di calcolo. Lo scopo di queste analisi è quello di iniziare ad approcciarsi alla simulazione di strutture complesse come possono essere quelle considerate in questo studio; infatti, dato che quest'ultime sono state realizzate attraverso dei processi additivi che generano la struttura attraverso la creazione di strati successivi di materiale, questo le rende con tutta probabilità anisotrope; inoltre le modalità attraverso cui il materiale viene fatto solidificare potrebbero far sì che le sue reali proprietà differiscano rispetto a quelle fornite nel datasheet, nonostante esse tengano conto del processo utilizzato. Ovviamente le analisi FEM eseguite, essendo di tipo lineare, non hanno lo scopo di cogliere il completo comportamento della struttura, bensì solamente del tratto in cui essa si trova a lavorare in campo elastico.

Tutte le prove e le analisi descritte sono state eseguite anche sul Progressive Comfort, in modo tale da poterne confrontare i risultati con quelli relativi alle strutture testate e trarre quindi delle conclusioni riguardo l'efficacia dei nuovi sistemi individuati.

3.5.2-Prove Sperimentali Statiche

3.5.2.1-Obiettivi e parametri di prova

Le prove sperimentali statiche consistono in prove di compressione in controllo di spostamento; quest'ultimo viene applicato nella direzione lungo cui la struttura si troverebbe a deformarsi in condizioni di sparo, quando inserita all'interno dell'arma. Nel caso delle strutture di prova lo spostamento imposto risulta pari a 20mm, mentre per il Progressive Comfort a 9,5mm che corrisponde alla corsa massima del sistema.

La macchina di prova utilizzata è la "Instron" mostrata in Figura 65 assieme alle sue principali specifiche tecniche; tale sistema ha permesso di monitorare l'andamento della forza (F) applicata alle strutture in funzione dello spostamento (S) imposto e di estrarne quindi per ciascuna il grafico che mette in relazione tali grandezze (F-S).



Features
Load measurement accuracy: +/- 0.5% of reading down to 1/1000 of load cell capacity option
Up to 2.5 kHz data acquisition rate option simultaneous on load, extension, and strain channels
Capacity 0.5 kN
Vertical test space of 726 mm
Speed range of 0.05-2500 mm/min
customizable control panel
Automatic gain adjustment
Automatic transducer recognition for load cells and extensometers
extra height and width options available
thousand of optional grips and fixtures
Optional temperature chambers
Full CE compliance

Figura 64-Macchina di prova “Instron” e relative specifiche tecniche [68]

La prova è stata eseguita in accordo con le direttive definite nella norma “ASTM D695-15-Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics” nella quale vengono indicate le modalità attraverso cui eseguire i test di compressione necessari a ricavare alcune proprietà meccaniche statiche di strutture polimeriche; in particolare il parametro di interesse è la velocità con cui eseguire la prova. Seguendo quanto indicato dalla norma è stata utilizzata una velocità di deformazione pari ad 1mm/minuto.

I dati ottenuti dalla macchina di prova, ossia l’andamento della Forza in funzione dello spostamento imposto, sono stati elaborati in modo tale da isolarne i tratti di interesse del segnale. In particolare, è stata isolata la forza relativa ai 20mm di spostamento ricercati, iniziando a considerarla in corrispondenza del campione precedente a quello per cui si rileva il primo valore di forza diverso da zero; questo perché, fino a che il “punzone” non inizia a deformare la struttura, la macchina segna un valore nullo di forza e tale porzione di segnale precedente al contatto non risulta di alcun interesse. Per quanto riguarda l’elaborazione dati delle prove eseguite sul Progressive Comfort si è svolto lo stesso procedimento, ma isolando un tratto di segnale pari allo spostamento imposto al sistema che in questo caso risulta di 9,5mm.

3.5.2.2-Set-up di misura

Il set-up di misura utilizzato per eseguire le prove statiche, mostrato in Figura 66, è costituito principalmente da due elementi. Un “punzone” attraverso cui avviene la compressione della struttura, ed un “alloggiamento” all’interno della quale viene inserita la struttura da testare; quest’ultima è stata progettata per far sì che le strutture, durante la prova, si trovino sottoposte alle stesse condizioni cui si troverebbero sottoposte in fase operativa.

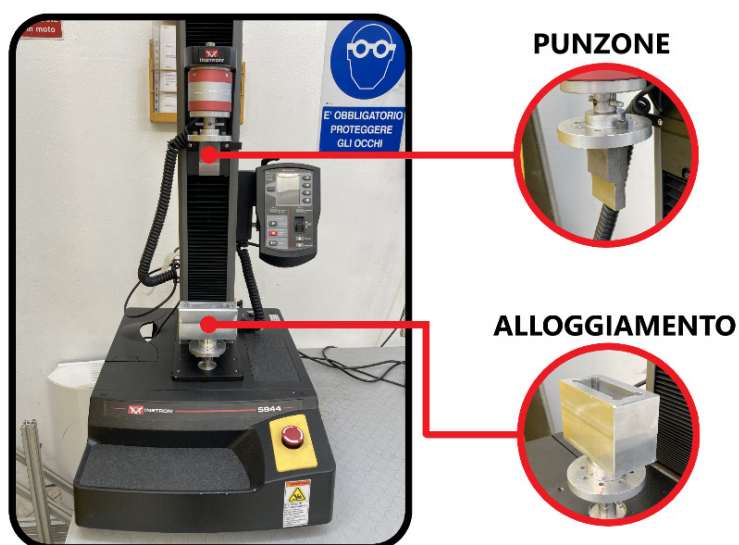


Figura 65-Set-up di misura utilizzato per le prove statiche [2]

Si ricorda che le strutture in questione sono state progettate per essere inserite all’interno del Case attualmente utilizzato nel sistema Progressive Comfort; di conseguenza si è deciso di testare le varie strutture replicando tale situazione. È stata quindi creata un’attrezzatura costituita da un blocco di alluminio, al cui interno è stato scavato un parallelepipedo di dimensioni leggermente maggiori rispetto a quelle della struttura da testare, cosicché quest’ultima potesse essere inserita e testata al suo interno senza interferenze (Figura 67).

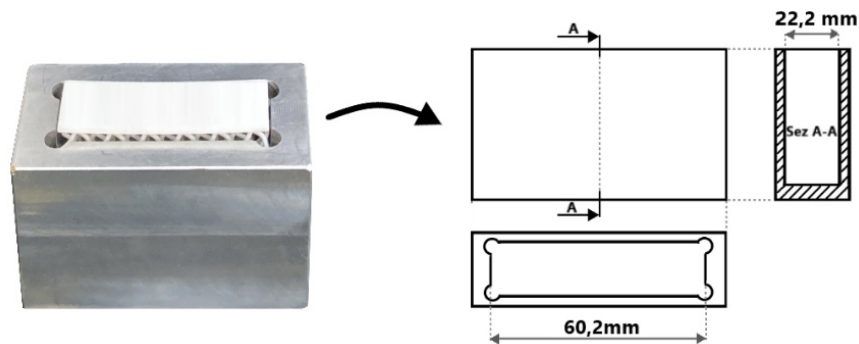


Figura 66-Alloggiamento utilizzato per testare le strutture [2]

Per testare invece il Progressive Comfort si è sviluppata una struttura simile alla precedente, ma avente delle dimensioni interne leggermente superiori a quelle del Case, poiché in questo caso essa doveva contenere quest'ultimo al suo interno (Figura 68); come nel caso precedente è stata ottenuta andando a lavorare un blocco di alluminio utilizzando le macchine a controllo numerico (CNC) del laboratorio balistico interno all'azienda.

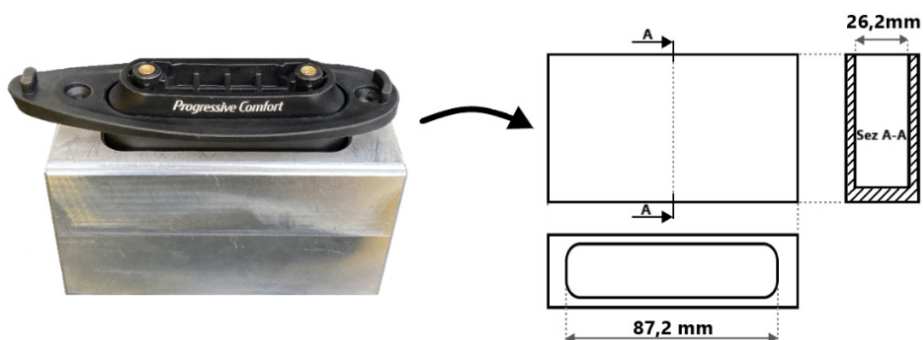


Figura 67-Alloggiamento utilizzata per testare il sistema Progressive Comfort [2]

3.5.3-Prove sperimentali dinamiche

3.5.3.1-Obiettivi e parametri delle prove

Per caratterizzare le strutture da un punto di vista dinamico sono state svolte delle prove di impatto. I test consistono nell'utilizzare un maglio allo scopo di rilasciare manualmente una grave di massa pari a 3,3kg da diverse altezze; quest'ultimo, andando ad impattare le strutture da testare, ne provoca una deformazione nella

direzione lungo cui esse si deformerebbero in condizioni di sparo quando inserite all'interno dell'arma.

Ciascuna struttura è stata sottoposta a tali prove di caduta rilasciando la massa cinque volte consecutive per ogni altezza di prova, effettuando il test per sei altezze differenti; un dato rilascio del grave è stato intervallato dal successivo con 60 secondi di pausa in modo tale da permettere alla struttura di recuperare la sua posizione iniziale. Ogni prova è iniziata rilasciando la massa dall'altezza di prova inferiore per poi incrementarla di 50mm una volta completati i cinque rilasci consecutivi, fino ad arrivare all'altezza massima; si è dunque partiti da un'altezza pari a 50mm fino ad arrivare ad una di 300mm, attraverso diversi step quali: 50,100,150,200,250,300mm. Ovviamente la forza che si genera sulla struttura risulta differente a seconda dell'altezza considerata, così come sarà differente la velocità di deformazione cui essa viene sottoposta; in particolare, la forza che si sviluppa in seguito al rilascio eseguito dalla prima altezza permette di scaricare sulla struttura una forza pari a quella che si genererebbe su di essa, nel caso in cui fosse inserita all'interno dell'arma e fossero utilizzate cartucce a bassa energia; per quanto riguarda invece i rilasci successivi, le altezze pari a 100 e 150mm simulano l'utilizzo di cartucce a media e alta energia; infine, tutte le prove eseguite ad altezze superiori permettono di valutare il comportamento delle strutture quando sottoposte a stress maggiori rispetto a quelli che possono svilupparsi durante l'utilizzo dell'arma, ma di cui è comunque opportuno tenere conto.

Le grandezze acquisite durante l'esecuzione di queste prove sono principalmente tre: lo spostamento della struttura, la forza trasmessa dalla stessa e la decelerazione del grave durante l'impatto. In realtà lo spostamento misurato non è quello relativo alla struttura testata, bensì quello del grave in caduta ed è possibile assumere che essi coincidano per tutta la durata in cui essi rimangono in contatto reciproco, ovvero nell'intervallo temporale in cui la cella di carico misura una forza trasmessa non nulla.

Vengono ora descritti i grafici e gli indici estrapolati dall'elaborazione dei dati ottenuti da tali prove, necessari alla caratterizzazione dinamica delle varie strutture ed alla valutazione della loro capacità di dissipare energia.

Innanzitutto, per ogni struttura è stato analizzato un grafico che riporta l'andamento della forza in funzione dello spostamento della struttura. Mentre per la statica veniva considerata la forza applicata al campione, in questo caso se ne è invece valutata quella trasmessa poiché la cella di carico atta all'acquisizione della forza è posta a valle della struttura. Un'altra differenza rispetto al caso statico è che in questo caso è stata considerata anche la componente del grafico F-S relativa alla fase di scarico della struttura; tale componente coincide con il ritorno di quest'ultima nella sua posizione iniziale in seguito all'impatto e la conoscenza di entrambi i tratti del grafico permetterà di fare importanti considerazioni. È utile osservare che, nonostante la forza considerata sia quella trasmessa dalla struttura, in alternativa si sarebbe potuta utilizzare quella che si genera nella zona di contatto tra il maglio e la struttura stessa, ossia che si sviluppa a monte di quest'ultima; il set-up di misura utilizzato permette infatti di misurare la decelerazione subita dal grave in seguito all'impatto con la struttura e da essa è possibile ricavare l'andamento della forza di contatto tra i due; si è però preferito considerare la misura diretta della forza trasmessa e lasciare la valutazione della forza di impatto ricavata dal segnale dell'accelerometro ad eventuali studi successivi.

Oltre alla valutazione del grafico appena descritto, dato che uno degli obiettivi di queste prove dinamiche è quello di valutare la dispersione energetica delle strutture, sono stati identificati gli indici necessari alla valutazione di tale fenomeno; per identificarli e capire quali fossero le formule necessarie a valutarli si è fatto riferimento alla stessa norma dalla quale si è ricavato il set-up di misura, ossia la "ASTM-F1614-99". Vengono quindi ora mostrati all'interno di grafici Forza-Spostamento e Forza-Tempo tali indici (Figura 69), i quali vengono poi analizzati.

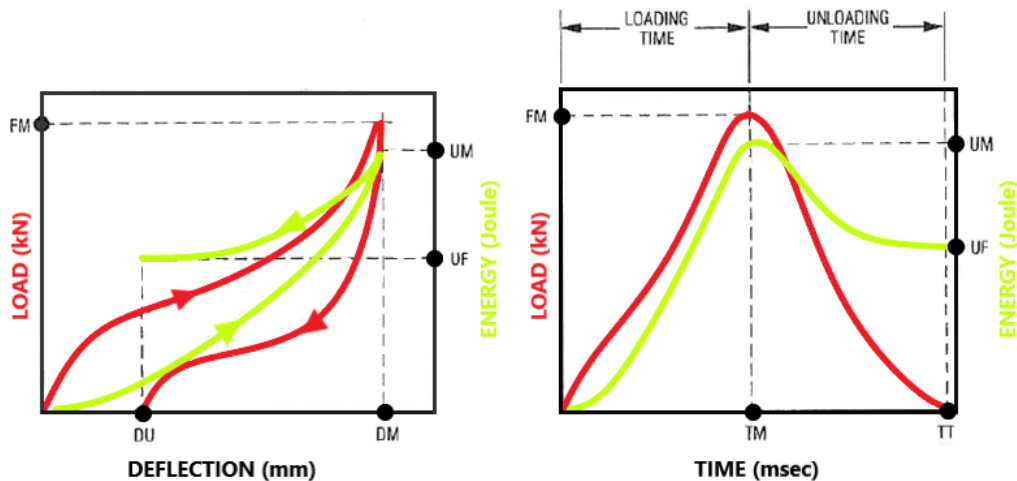


Figura 68-Indici ottenuti dalle prove dinamiche [69]

- **Peak Force (FM):** valore di picco della forza trasmessa dalla struttura che corrisponde al massimo valore assunto da quest'ultima.
- **Maximum Deflection (DM):** spostamento massimo della struttura che si verifica in corrispondenza della conclusione della fase di carico.
- **Residual Deflection (DU):** spostamento residuo che la struttura presenta in corrispondenza di un valore nullo di forza trasmessa, ottenuto successivamente al raggiungimento del suo picco. L'intero ciclo di prova è composto da una fase di carico ed una di scarico; quella di carico inizia in corrispondenza del punto in cui si hanno valori nulli di forza e spostamento e termina in corrispondenza dello spostamento massimo (DM) della struttura; quella di scarico inizia invece in corrispondenza della fine della fase precedente e termina quando la forza misurata assume un valore nullo, che è proprio l'istante in corrispondenza del quale viene calcolato lo spostamento residuo (DU).
- **Maximum Energy Applied (UM):** è il massimo valore di energia sviluppata all'interno della struttura durante l'impatto e corrisponde all'energia generata dal grave in caduta in corrispondenza dello spostamento massimo della struttura (DM); viene espressa in Joule, ed è calcolata come integrale della forza nello spostamento relativamente al tratto di curva F-S della fase di carico

e risulta quindi proporzionale all'area sottesa a tale curva nel tratto considerato.

- **Hysteresis Energy (UF):** definita come energia d'isteresi, corrisponde all'energia dissipata dalla struttura durante l'intero ciclo di compressione; viene calcolato come la sottrazione tra l'integrale della forza nel tempo relativo alla fase di carico e quello relativo alla fase di scarico. Risulta quindi proporzionale all'area racchiusa all'interno della curva F-S dell'intero ciclo e può essere definita anche come l'energia di isteresi in corrispondenza dello spostamento residuo (DU).
- **Hysteresis Energy Ratio (HER):** viene calcolato come il rapporto tra l'energia d'isteresi (UF) e la massima energia sviluppata all'interno della struttura (UM); rappresenta un indice della capacità di attenuazione degli urti e di dispersione energetica della struttura e può assumere valori che vanno da zero, nel caso in cui non si abbia alcuna dispersione energetica, ad uno nel caso in cui la dispersione sia totale.
- **Total Time (TT):** tempo necessario al completamento di un ciclo completo, costituito dalla fase di carico e scarico.
- **Time Peak Force (TM):** tempo necessario al raggiungimento del picco di forza.

Per ottenere questi indici l'elaborazione dei dati acquisiti dalle prove è stata effettuata utilizzando il software MATLAB. Durante l'elaborazione sono stati innanzitutto isolati i tratti di segnale desiderati e solo in seguito implementate le funzioni che hanno permesso di ottenere i grafici e gli indici desiderati. Infatti, ogni singola prova di impatto è costituita da tre fasi principali: una prima fase in cui il grave effettua la sua caduta verticale; una seconda fase in cui esso impatta la struttura per la prima volta, la comprime, ed effettua il suo moto di risalita; una terza fase in cui sono presenti tutti i successivi impatti del grave sulla struttura, la cui durata si estingue quando esso annulla il suo moto. Il tratto di segnale isolato, che risulta appunto quello di interesse, coincide con quello relativo alla seconda fase; lo si è iniziato a considerare in corrispondenza del campione precedente a quello per cui si instaura il primo valore

di forza, ossia un attimo prima dell'impatto, fino ad arrivare al momento in cui si torna a registrare un valore nullo di forza trasmessa.

3.5.3.2-Set-up di misura

In Figura 70 viene mostrato il set-up di misura utilizzato per lo svolgimento delle prove dinamiche ed in seguito ne vengono analizzati i vari componenti.

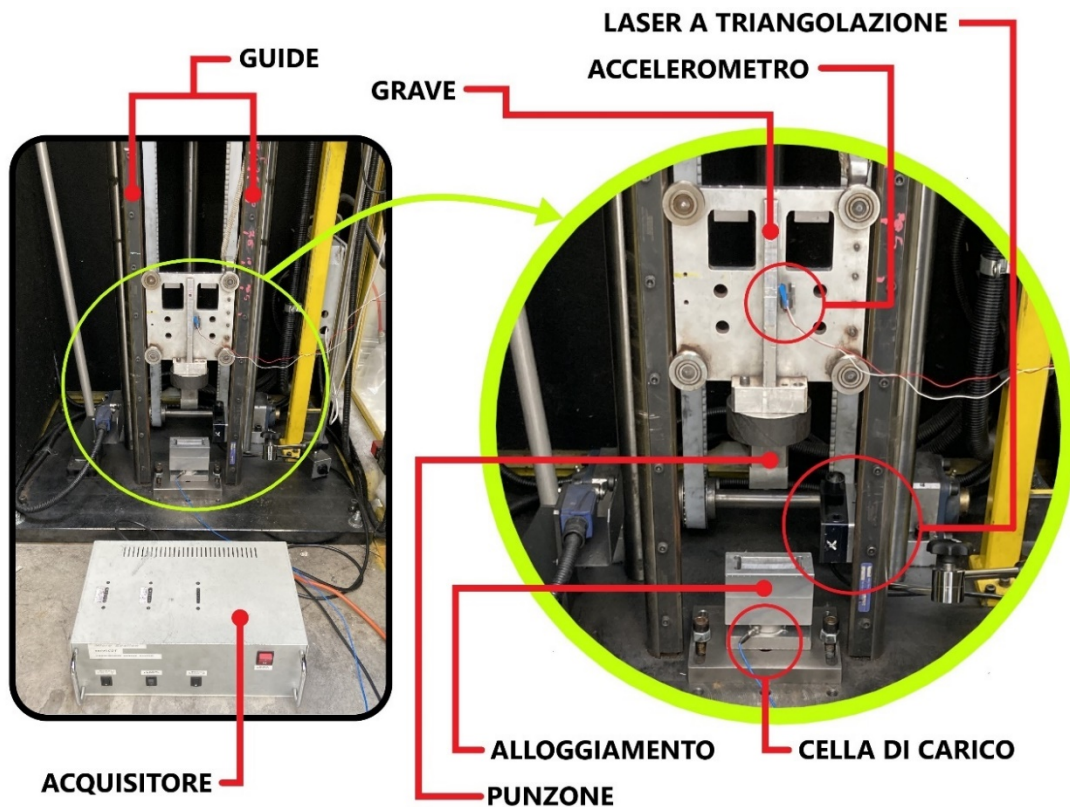


Figura 69-Set-up di misura utilizzato per le prove dinamiche [2]

Nell'immagine si possono notare i seguenti elementi meccanici necessari allo svolgimento della prova:


- **Grave:** componente avente una massa di 3,3Kg che durante la prova viene rilasciato da varie altezze allo scopo di impattare e deformare la struttura da testare; esso entra in contatto con la struttura attraverso il punzone che risulta solidale ad esso.

- **Guide:** svolgono appunto la funzione di “guida” durante la caduta del grave, vincolandolo ad uno scorrimento verticale.
- **Punzone:** elemento solidale all’estremità inferiore della massa in caduta. È il componente che entra in contatto con la struttura da testare, scaricando su di essa l’energia posseduta dal grave in caduta e deformandola; è lo stesso elemento utilizzato per deformare le strutture durante lo svolgimento delle prove statiche.
- **Alloggiamento:** elemento atto al contenimento delle varie strutture che risulta fisso nello spazio durante tutta la durata della prova. Essendo queste attrezzature le stesse utilizzate durante lo svolgimento delle prove statiche, anche in questo caso ne verranno utilizzate due tipologie differenti: una volta a testare le varie strutture, ed una per il Progressive Comfort.

Sempre in Figura 70 si osservano i seguenti strumenti di misura utilizzati per misurare spostamento accelerazione e forza trasmessa:

- **Cella di carico:** posizionata al di sotto dell’alloggiamento in cui è inserita la struttura da testare, ha scopo di misurare la forza trasmessa da quest’ultima; viene fissata sia all’alloggiamento che a terra, in modo tale da impedirne lo spostamento durante lo svolgimento delle prove.

In Figura 71 ne vengono mostrate le specifiche tecniche.



PERFORMANCE		
Sensitivity (±15 %)	0.25 mV/lb	56.2 mV/kN
Measurement Range (Compression)	20000 lb	88.96 kN
Maximum Static Force (Compression)	30000 lb	133.44 kN
Broadband Resolution (1)	0.30 lb-rms	1.3 N-rms
Low Frequency Response (-5 %)	0.0003 Hz	0.0003 Hz
Upper Frequency Limit	40000 Hz	40000 Hz
Non-Linearity	≤1 % FS	≤1 % FS

Figura 70-Cella di carico e relative specifiche tecniche [70]

- **Accelerometro:** solidale al grave in caduta, permette di valutarne sia l'accelerazione in caduta che la decelerazione che esso subisce in seguito all'impatto con la struttura; in Figura 72 ne vengono riportate le specifiche tecniche.

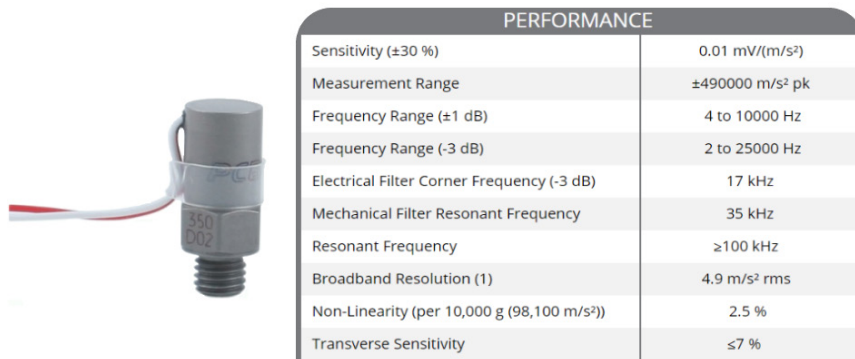


Figura 71-Accelerometro e relative specifiche tecniche [71]

- **Laser a triangolazione:** permette di valutare la posizione del grave in caduta e di conseguenza il suo spostamento; viene posizionato a fianco all'alloggiamento accertandosi che tra i due elementi non vi sia il minimo contatto in modo tale da evitare movimenti indesiderati del laser che potrebbero portare a misurazioni errate. In Figura 73 ne vengono mostrate le specifiche tecniche.

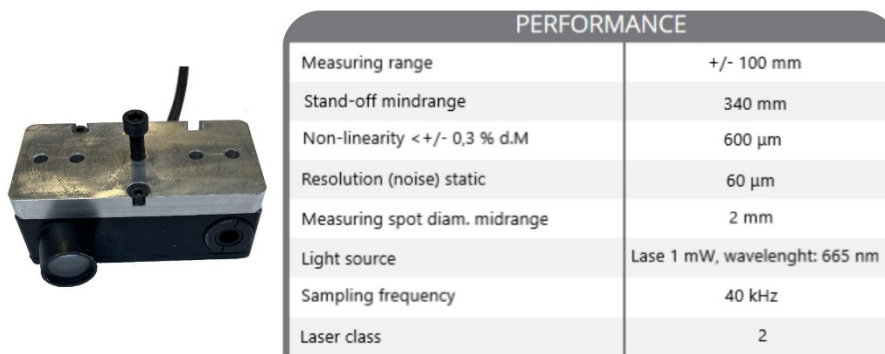



Figura 72-Laser a triangolazione e relative specifiche tecniche [72]

- **Sistema di acquisizione:** questo strumento, le cui specifiche vengono illustrate in Figura 74, registra il segnale di forza misurata dalla cella di carico, il segnale di accelerazione misurato dall'accelerometro e quello di spostamento misurato dal laser a triangolazione.



PERFORMANCE	
Number of channels	8
Inputs	Voltage, full bridge
Sampling rate	Simultaneous 200 kS/sec
Input type	Differential
Dc accuracy	0,05% of value
Noise floor	107 dB +/- V range
Counter timebase	102.4 MHz
Time base accuracy	5 ppm
Input Filter	500 ns
Counter resolution	32 - bit
Input termination, impedance	100 kΩ
Gain drift	10 ppm/k

Figura 73-Acquisitore e relative specifiche tecniche [73]

3.5.4-Analisi agli elementi finiti (FEM)

3.5.4.1-Obbiettivi e parametri dell'analisi

Nelle analisi agli elementi finiti eseguite sono state ricreate le stesse condizioni a cui Progressive Comfort e strutture sono state sottoposte durante l'esecuzione delle prove sperimentali statiche, così da poterne poi confrontare i risultati. A tale scopo le strutture sono state sottoposte a delle compressioni statiche di 20mm, mentre il Progressive Comfort deformato di soli 9,5mm e trattandosi di analisi FEM statiche questi spostamenti sono stati applicati molto lentamente, così come accadeva durante le prove sperimentali statiche.

Queste analisi, al contrario delle prove sperimentali, non sono state eseguite sulla totalità delle strutture poiché, essendo quest'ultime costituite da geometrie complesse, si è reso necessario l'utilizzo di mesh sofisticate che hanno portato ad elevati costi computazionali e lunghi tempi di calcolo; in particolare ne sono state analizzate quattro: le strutture Large, Medium, Small (primo gruppo) e g70 (secondo gruppo).

Uno degli obbiettivi di queste analisi lineari statiche è quello di cercare di cogliere il comportamento della struttura, per lo meno fintanto che essa si trova a lavorare totalmente in campo elastico; per questo motivo risulta necessario estrapolare dalle analisi dei dati che possano essere poi confrontati con quelli derivanti dalle prove sperimentali statiche effettuate sulla stessa struttura, così da verificare che i due comportamenti identificati coincidano. Da queste analisi sono quindi stati ricavati dei

grafici in cui viene rappresentata la forza applicata alla struttura in funzione del suo spostamento, così come avvenuto per le prove sperimentali statiche. Come accennato, ci si limita a studiare le strutture e di conseguenza le loro curve F-S, all'interno del loro tratto elastico poiché per coglierne il comportamento totale sarebbero necessarie delle analisi non-lineari o iperelastiche; trattandosi però di strutture aventi geometrie complesse e soprattutto di strutture realizzate attraverso materiali polimerici, effettuare analisi non-lineari su di esse richiederebbe la conoscenza di svariati parametri, i quali per essere ricavati necessitano a loro volta di prove dedicate e quindi di tempi molto lunghi. Inoltre, per simulare il reale comportamento delle strutture in condizioni di utilizzo, sarebbero necessarie analisi dinamiche che andrebbero ad aggiungere ulteriori difficoltà nell'esecuzione delle simulazioni; per questi motivi ci si è quindi limitati ad eseguire delle analisi lineari statiche.

Su queste strutture si sono innanzitutto effettuate delle simulazioni all'interno delle quali sono stati utilizzati i parametri presenti nei datasheet relativi ai materiali utilizzati; i datasheet considerati, oltre a far riferimento al materiale in questione, sono relativi al particolare processo di stampa utilizzato. Essendo però i materiali considerati abbastanza complessi da analizzare, come si vedrà più approfonditamente nel capitolo 4, simularli utilizzando il modulo di resistenza fornito nel loro datasheet non permette di coglierne il reale comportamento. Per le strutture g70 e Large sono state dunque ripetute più volte le stesse analisi, modificando di volta in volta il modulo di resistenza del materiale, fintanto da arrivare a coglierne il reale comportamento. In particolare del materiale di cui è costituita la struttura g70 ne è stato considerato il modulo di resistenza a flessione poiché gli elementi di cui tale struttura è costituita si trovano a lavorare principalmente a flessione; nonostante anche gli elementi di cui è costituita la struttura Large si trovino a lavorare a flessione, del materiale di cui essa è costituita se ne è considerato il modulo di resistenza a trazione/compressione poiché quello a flessione non è riportato nel datasheet ad esso relativo. Quest'ultima analisi è stata effettuata allo scopo identificare il valore del modulo di resistenza da assegnare al materiale, necessario a simulare correttamente le strutture in questione e di conseguenza coglierne il reale comportamento fintanto che si trovano a lavorare in

campo elastico. Essendo le strutture Small e Medium molto simili alla struttura Large, su di esse sono state poi effettuate delle analisi in cui si è assegnato al materiale un modulo di resistenza pari a quello necessario a cogliere il comportamento della struttura Large identificato precedentemente; questo permetterà di verificare se il modulo di resistenza ricavato per la struttura Large può essere o meno esteso alla globalità delle strutture del primo gruppo. Da queste analisi verranno anche ricavati i valori e gli andamenti delle tensioni che si sviluppano all'interno della struttura, i quali potranno essere presi in considerazione fintanto che non vengono raggiunti valori di tensione pari a quelli di snervamento del materiale; infatti, essendo state eseguite analisi lineari, quando la struttura supera in alcuni suoi punti lo snervamento, le tensioni identificate al suo interno non coincideranno più con quelle reali. Nonostante ciò, valutare l'andamento delle tensioni fino al raggiungimento dello snervamento, permette di identificare le zone della struttura più sollecitate; sulla base di tali considerazioni essa potrà poi essere ottimizzata.

Un altro obiettivo di queste simulazioni è quello di identificare il numero e la tipologia di elementi necessari a discretizzare le strutture considerate che permettano di ottenere dei risultati coerenti con la realtà; ricavare questi parametri risulta di fondamentale importanza poiché permette di iniziare ad approcciarsi alla simulazione di queste particolari strutture e di gettare quindi le basi per eventuali studi futuri più approfonditi. È stata dunque condotta quella che viene detta analisi di sensibilità della mesh, che consiste nel realizzare mesh sempre più sofisticate fino ad arrivare alla convergenza della soluzione; in particolare questa analisi è stata effettuata solamente sulla struttura Large (primo gruppo) e sulla struttura g70 (secondo gruppo). In questo tipo di analisi vengono simulate più volte le strutture in questione, andandole a meshare con un numero sempre crescente di elementi fino ad ottenere una soluzione stabilizzata; gli elementi necessari ad ottenere la soluzione stabilizzata ne rappresentano il numero minimo necessario ad ottenere una soluzione corretta relativamente ad una data struttura. In questo caso specifico, oltre ad incrementare il numero di elementi utilizzati, ne sono state anche utilizzate due differenti tipologie, così da verificare quale delle due sia in grado di portare più velocemente a

convergenza la soluzione; per le due strutture considerate sono quindi state generate in un caso delle mesh costituite da elementi Tet-4 e nell'altro da elementi Tet-10. Per entrambe le tipologie di elementi considerati sono state effettuate varie simulazioni in cui di volta in volta si è incrementato il numero di elementi utilizzati; si è iniziato con 25.000 elementi fino ad arrivare a 1.000.000, raddoppiandone di volta in volta il numero.

Un altro obiettivo di queste analisi è quello di valutare se, nel caso in cui la struttura considerata presenti delle simmetrie, sia possibile simulare solamente una parte di essa ed estenderne solo in seguito i risultati all'intero, riducendo così l'onere computazionale dell'analisi. Dato che la struttura g70 (secondo gruppo) non presenta alcuna simmetria interna, allora queste ultime considerazioni sono state effettuate sulle strutture del primo gruppo; in particolare, essendo quest'ultime molto simili tra loro, si è deciso di effettuare tali considerazioni solamente sulla struttura Large. Essa possiede infatti un elevato numero di simmetrie, motivo per cui ne saranno considerate diverse configurazioni che verranno analizzate nel dettaglio in sezione 3.5.4.2. Ovviamente, dato che questa tipologia di analisi è stata svolta in seguito a quella di sensibilità della mesh, per essa sono stati utilizzati i parametri di mesh necessari ad ottenere risultati stabilizzati precedentemente identificati; non è stata quindi portata avanti un'ulteriore analisi di sensibilità della mesh sulle nuove configurazioni considerate.

Come avvenuto per le prove sperimentali anche queste analisi sono state effettuate, oltre che sulle strutture, anche sul Progressive Comfort; le analisi svolte su tale sistema non hanno però gli stessi obiettivi di quelle svolte sulle strutture. Su questo sistema sono state infatti effettuate in passato diverse simulazioni, ed è quindi già noto sia il numero che la tipologia di elementi necessari ad analizzarlo; dalle analisi passate è stata confermata anche la possibilità simulare 1/4 del sistema, data la doppia simmetria che esso possiede, e di estenderne in seguito i risultati all'intero. Sulla base di queste considerazioni si evince come l'analisi FEM del sistema Progressive Comfort presenti un semplice scopo di verifica; verranno infatti confrontati i risultati delle prove sperimentali statiche effettuate su di esso con i risultati di questa analisi, in

modo tale da verificare che quest'ultime siano realmente in grado di coglierne il reale comportamento. Il motivo per cui tali simulazioni sono state ripetute, e non sono quindi stati utilizzati i risultati ottenuti in passato, è che esse erano state svolte utilizzando un set-up che replicava le reali condizioni di sparo; in questo caso vengono invece replicate le condizioni di cui il sistema si trova sottoposto durante le prove statiche sperimentali cosicché i risultati possano essere confrontati con quelli derivanti da quest'ultime.

Infine, per quanto riguarda i software utilizzati in queste analisi, essi fanno tutti parte della MSC-Software Corporation ed in particolare si è sfruttato il software Patran come Pre-processor per definire set-up e parametri di analisi, ed il software Marc come Solver e Post-processor, ossia per eseguire la simulazione e andarne a visualizzare e graficare i risultati ottenuti.

3.5.4.2-Set-up dell'analisi

In Figura 75 viene mostrato il set-up utilizzato per simulare le varie strutture, il quale cerca di ricreare le stesse condizioni cui esse si trovavano sottoposte durante l'esecuzione delle prove sperimentali statiche, così poterne in seguito confrontarne i risultati; nell'immagine viene mostrato solamente il set-up della struttura Large, poiché quelli utilizzati per le strutture Medium, Small e g70 risultano identici.

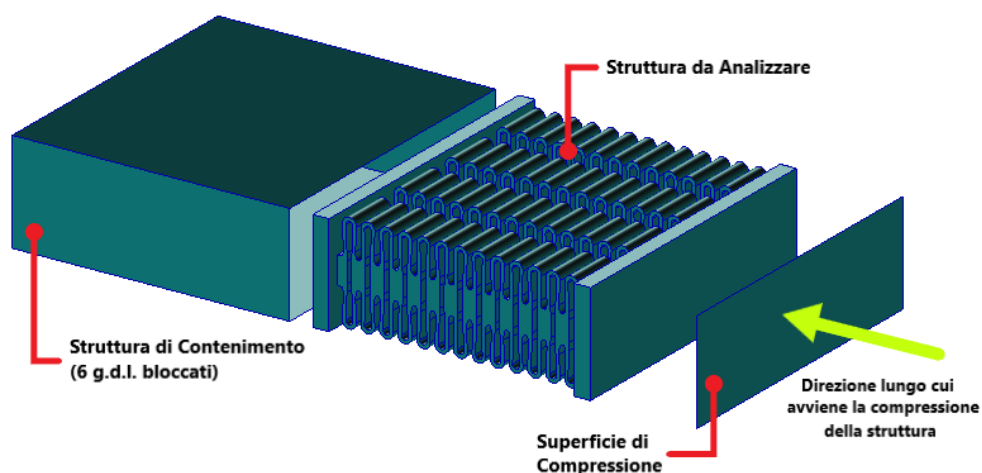


Figura 74-Set-up di analisi utilizzato per testare le strutture intere [2]

Dal set-up mostrato si possono notare i seguenti elementi:

- **Superficie di compressione:** è l'elemento che durante l'esecuzione dell'analisi si sposta gradualmente verso la struttura provocandone una compressione di 20mm; la stessa cosa succedeva durante le prove sperimentali statiche in cui la compressione veniva effettuata attraverso un punzone costituito di materiale metallico. Allo scopo di ricreare la stessa condizione, tale superficie è stata definita all'interno del software come un corpo rigido e questo equivale a conferirgli una rigidità che tende ad infinito e permette quindi di simulare il punzone metallico. Infatti, essendo la struttura costituita di materiale polimerico, possiede una rigidità notevolmente inferiore a quella del metallo di cui è costituito il punzone e di conseguenza quest'ultimo non subisce alcuna deformazione durante le prove sperimentali; è quindi legittimo, per lo svolgimento dell'analisi, approssimare la superficie di compressione ad un corpo rigido.
- **Struttura di contenimento:** è l'elemento all'interno del quale viene alloggiata la struttura durante lo svolgimento delle analisi, il quale è stato modellato utilizzando cinque superfici differenti che insieme vanno a formare un parallelepipedo aperto da un lato. Tale struttura di contenimento è quel corpo che va sostituire ciò che nelle prove sperimentali statiche era l'alloggiamento; dato che quest'ultima era costituita di materiale metallico allora anche la struttura di contenimento, così come la superficie di compressione, è stata definita come un corpo rigido durante lo svolgimento dell'analisi. Inoltre, ad essa sono stati conferiti vincoli di movimento e rotazione lungo le tre direzioni dello spazio così che non subisca alcuno spostamento durante l'analisi, come non ne subiva l'alloggiamento durante le prove statiche.
- **Struttura da testare:** sempre in Figura 75 è presente anche la struttura testata; quest'ultima viene mostrata all'esterno della struttura di contenimento allo scopo di renderla visibile, ma durante l'analisi essa è stata posizionata al suo interno.

Come accennato in sezione 3.5.4.1, sfruttandone le simmetrie, della struttura Large ne verranno simulate varie configurazioni nelle quali vengono considerate solo alcune parti di essa; questa analisi ha lo scopo di comprendere se sia possibile simulare solamente una parte della struttura ed estenderne in seguito i risultati all'intero e ridurre quindi il costo computazionale dell'analisi. I set-up di analisi utilizzati per ciascuna configurazione sono molto simili a quello relativo alla struttura intera (Figura 75), con alcune differenze che vengono illustrate di seguito:

- **Configurazione 1:** nella prima configurazione viene analizzata $\frac{1}{4}$ di struttura, ed in particolare solamente una delle quattro colonne di cui è costituita l'intera struttura; quest'ultima è stata tagliata lungo la sezione di taglio mostrata in Figura 76. Sempre in Figura 76 viene mostrato il set-up di analisi che risulta identico a quello utilizzato per simulare la struttura intera.

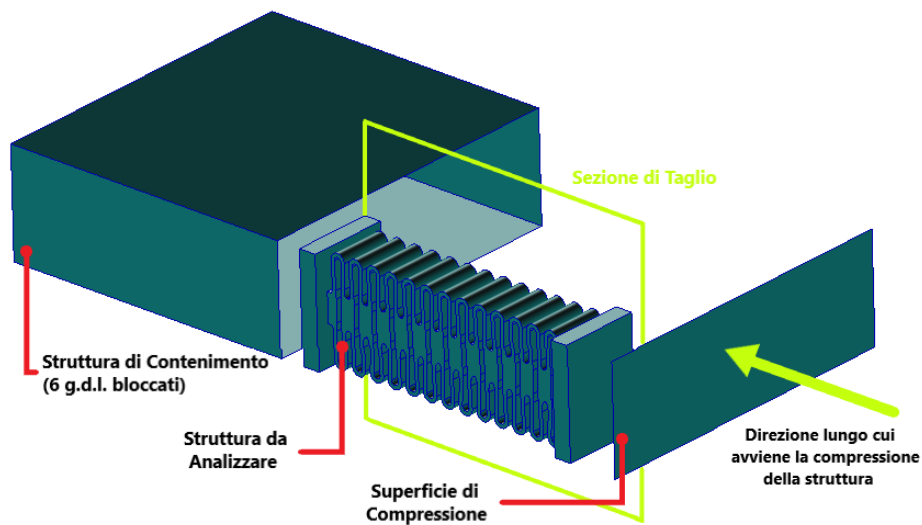


Figura 75-Set-up di analisi relativo alla 1° configurazione semplificata della struttura Large [2]

- **Configurazione 2:** in questa configurazione viene analizzata $\frac{1}{8}$ di struttura, ed in particolare metà di una delle quattro colonne di cui è costituita l'intera struttura; quest'ultima è stata tagliata lungo le sezioni di taglio mostrate in Figura 77. Sempre in Figura 77 viene mostrato il set-up di analisi; esso risulta identico a quello utilizzato per simulare la struttura intera, con la differenza che ai nodi presenti lungo la seconda superficie di taglio sono stati assegnati dei

vincoli di simmetria. Questo significa che ogni nodo appartenente alla struttura, posizionato su quella superficie, è stato vincolato a non potersi spostare lungo la direzione perpendicolare ad essa; questo permette alla parte di colonna considerata, di comportarsi nello stesso modo in cui si comporterebbe nel caso in cui venisse considerata l'intera colonna.

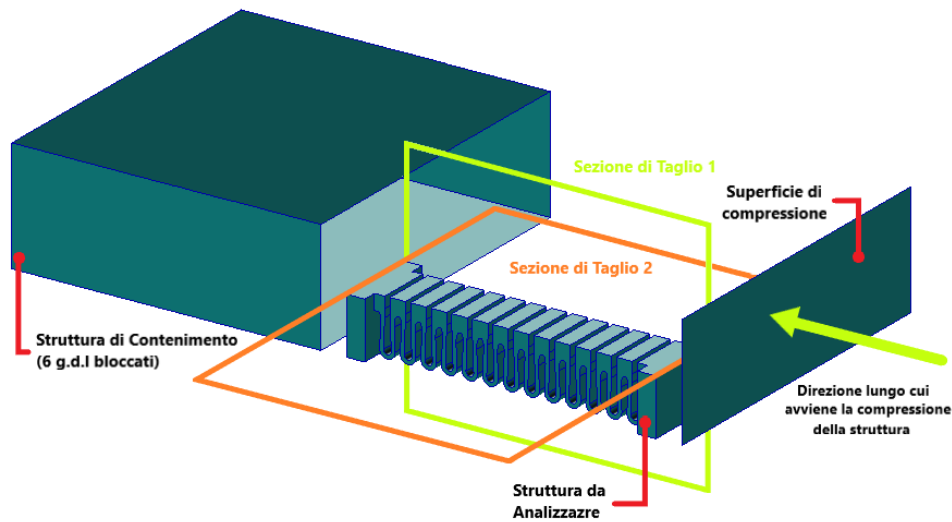


Figura 76-Set-up di analisi relativo alla 2° configurazione semplificata della struttura Large [2]

- **Configurazione 3:** in questa configurazione viene analizzato un singolo elemento dei 13 di cui è costituita ognuna delle quattro colonne della struttura completa; per ricavare tale elemento la struttura è stata tagliata lungo le tre sezioni riportate in Figura 78. Sempre in Figura 78 viene mostrato il set-up di analisi; esso risulta identico a quello utilizzato per simulare la struttura intera con la differenza che ora, per ricreare sull'elemento le reali condizioni operative, è stato introdotto un vincolo supplementare; quest'ultimo impone alle superfici dell'elemento che entrano in contatto con quelle che ne operano la compressione, di potersi muovere solamente lungo il piano identificato da quest'ultime senza mai potersi staccare dallo stesso. Questo vincolo permette alle superfici di compressione, ed a quelle dell'elemento, di rimanere in contatto reciproco durante tutta l'analisi, proprio come avviene durante le reali condizioni operative.

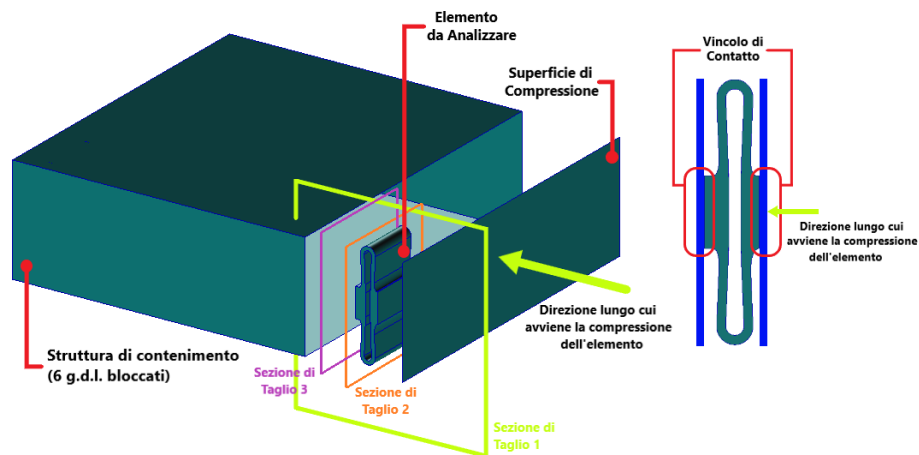


Figura 77-Set-up di analisi relativo alla 3° configurazione semplificata della struttura Large [2]

- **Configurazione 4:** in questa configurazione viene analizzata una parte di un singolo elemento, ed in particolare $\frac{1}{4}$ di esso; per ricavare il componente da analizzare, la struttura completa è stata tagliata lungo le quattro sezioni riportate in Figura 79. Sempre in Figura 79 viene mostrato il set-up di analisi; esso risulta identico a quello utilizzato per simulare la struttura intera con la differenza che ora, per ricreare sull'elemento le reali condizioni operative, è stato introdotto un vincolo supplementare; quest'ultimo impone alle superfici dell'elemento che entrano in contatto con quelle che ne operano la compressione, di potersi muovere solamente lungo il piano identificato da quest'ultime senza mai potersi staccare dallo stesso. Questo vincolo permette alle superfici di compressione, ed a quelle della parte di elemento considerato, di rimanere in contatto reciproco durante tutta l'analisi, proprio come avviene durante le reali condizioni operative. Inoltre, ai nodi del componente presenti sulla superficie di taglio 4, è stato assegnato un vincolo di simmetria; questo significa che ogni nodo appartenente al componente, posizionato su quella superficie, è stato vincolato a non potersi spostare lungo la direzione perpendicolare ad essa e questo permette di ricreare quanto accade nel caso in cui fosse considerato l'intero elemento.

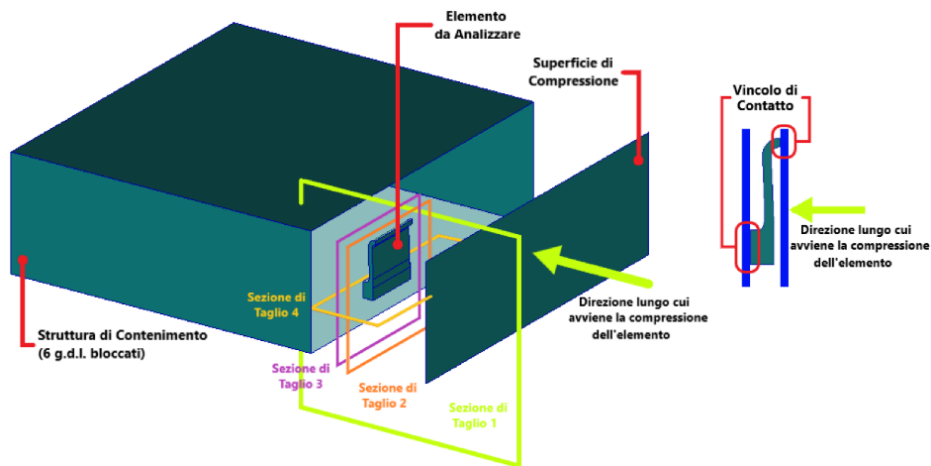


Figura 78-Set-up di analisi relativo alla 4° configurazione semplificata della struttura Large [2]

Infine, viene mostrato in Figura 80 il set-up utilizzato per analizzare il sistema Progressive Comfort, attraverso cui vengono ricreate le stesse condizioni cui il sistema è stato sottoposto durante le prove sperimentali statiche. Si nota come in questo caso sia stata utilizzata come struttura di contenimento del sistema, proprio il Case all'interno del quale esso si trova a lavorare in condizioni reali. In questo caso solamente la superficie di compressione è stata definita come corpo rigido poiché il Case, al contrario della struttura di contenimento utilizzata per testare le strutture, è stato definito come corpo deformabile; a quest'ultimo sono state dunque assegnate le reali caratteristiche del materiale di cui è costituito.

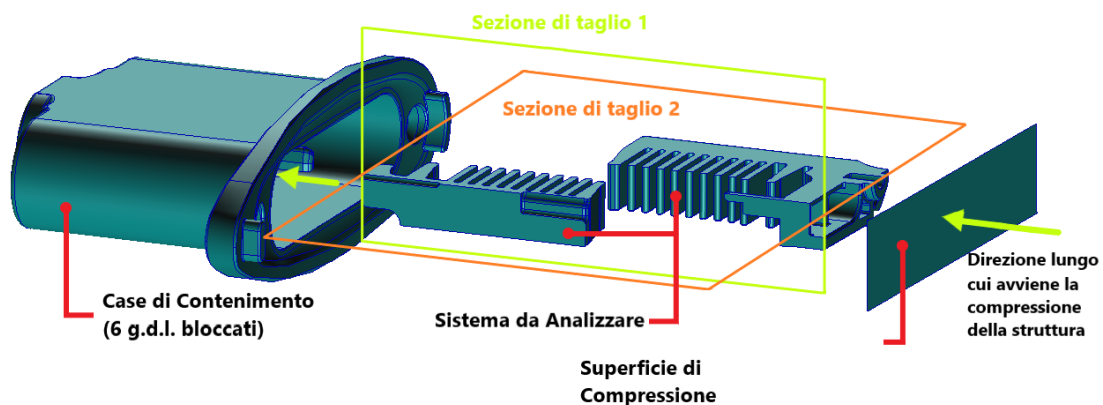


Figura 79-Set-up di analisi relativo al Sistema Progressive Comfort [2]

Si nota come data la doppia simmetria di Inserto Fisso e Mobile, si è considerato solamente $\frac{1}{4}$ di essi andando a tagliare il sistema lungo le sezioni mostrate in Figura 80.

Per poter considerare $\frac{1}{4}$ dell'intero sistema, sono stati assegnati dei vincoli di simmetria ai nodi presenti lungo le superfici di taglio; questo significa che ogni nodo appartenente al sistema, posizionato su tali superfici, è stato vincolato a non potersi spostare lungo la direzione perpendicolare ad esse. Questi vincoli permettono di ricreare, sulla porzione di sistema considerata, le reali condizioni operative cui essa si trova ad operare; essi permettono infatti di simulare la presenza degli altri $\frac{3}{4}$ di sistema. Infine, il Case atto al contenimento del sistema è stato vincolato lungo i sei possibili gradi di libertà dello spazio e, come avveniva nel caso dell'analisi delle strutture, alla superficie di compressione spetta il compito di deformare il sistema; in questo caso tale superficie sottopone il sistema ad uno spostamento di 9,5mm.

Capitolo 4-Risultati e discussione

4.1-Introduzione ai risultati

In questo capitolo verranno presentati i risultati delle prove sperimentali statiche e dinamiche e verrà anche effettuato un confronto tra essi; verrà poi eseguita un'analisi di incertezza valutando la ripetibilità e la riproducibilità delle misure. Infine, saranno analizzati i risultati ottenuti dalle analisi agli elementi finiti, effettuando un confronto tra quest'ultimi e quelli relativi alle prove sperimentali.

4.2-Prove sperimentali

4.2.1-Prove statiche

I risultati delle prove statiche saranno suddivisi in base alla tipologia di strutture testate (strutture del primo gruppo, strutture del secondo gruppo, Progressive Comfort che rappresenta la baseline rispetto alla quale verrà valutato il comportamento delle strutture sviluppate). Verranno innanzitutto mostrate le curve Forza-Spostamento (F-S) derivanti dalle prove effettuate sulle strutture del primo gruppo, poi quelle relative alle strutture del secondo gruppo, ed infine, quelle relative al Progressive Comfort. Siccome di ciascuna tipologia di struttura, allo scopo di ottenere dei risultati che avessero valore statistico, sono stati testati tre campioni differenti, di tali risultati ne verranno analizzati alcuni indici che permettano di valutarne la riproducibilità. Gli indici valutati verranno descritti direttamente durante l'analisi dei risultati poiché, dato che i risultati ottenuti variano da un gruppo di strutture all'altro, ne sono stati valutati diversi; essi permetteranno dunque di valutare l'accordo tra i risultati di misure effettuate su provini differenti della stessa tipologia di struttura [74]. All'interno delle curve F-S che verranno illustrate, per questioni di privacy aziendale, non saranno indicate le reali forze misurate, bensì un loro valore normalizzato. Questa normalizzazione viene effettuata dividendo i valori di forza misurati, per il valore massimo di forza raggiunto durante le prove sperimentali statiche; quest'ultimo coincide con il valore massimo di forza sviluppatosi durante i

test effettuati sul Progressive Comfort, e dunque, il valore massimo della forza normalizzata ad esso associata, assume valore unitario.

4.2.1.1-Strutture del primo gruppo

Le strutture del primo gruppo sono quelle realizzate in PA12 (Nylon) attraverso il processo di stampa Multi Jet Fusion. Per motivi statistici sono stati testati tre provini per ogni configurazione (small, medium, large); in Figura 81 vengono riportate le curve medie dei tre provini; è possibile fare questo poiché, valutando la riproducibilità dei risultati di ciascuna struttura, si è visto che le curve ottenute dalle prove effettuate sui tre differenti provini sono compatibili.

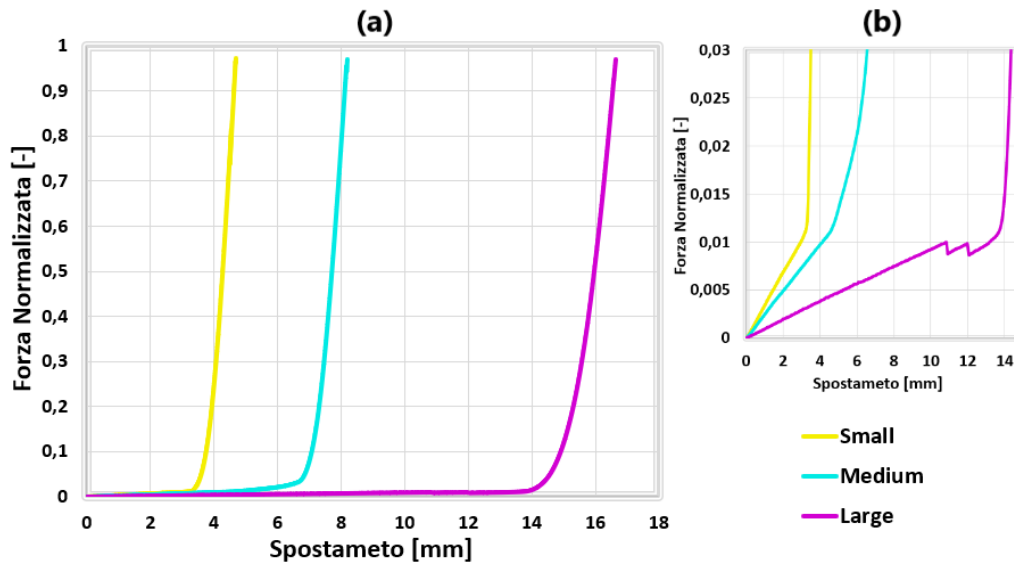


Figura 80-Curve F-S statiche relative alle strutture del primo gruppo (a) (nel grafico b vengono evidenziati i tratti iniziali delle curve) [2]

Considerando la struttura Small si nota come la forza necessaria a farle subire uno spostamento di circa 3,5mm risulti molto bassa; al contrario, arrivati in corrispondenza di tale spostamento, la forza inizia a crescere improvvisamente raggiungendo, in meno di un millimetro, valori confrontabili con quelli massimi utilizzati come riferimento, ed è infatti possibile osservare come il suo valore normalizzato arrivi in prossimità dell'unità. Analizzando quanto ottenuto per le altre due strutture facenti parte di questo gruppo, si nota come l'andamento delle loro curve risulti pressoché identico a quello della struttura Small con la differenza che, in questo caso, i valori di spostamento in corrispondenza dei quali la forza inizia a crescere risultano maggiori; in

particolare, questo avviene in corrispondenza di circa 7mm di spostamento per la struttura Medium ed a 14mm per la Large. Questo fenomeno è legato al fatto che le tre strutture arrivano molto facilmente al loro fine corsa, senza che le alette di cui sono costituite realizzino effetti smorzanti considerevoli (Figura 82).

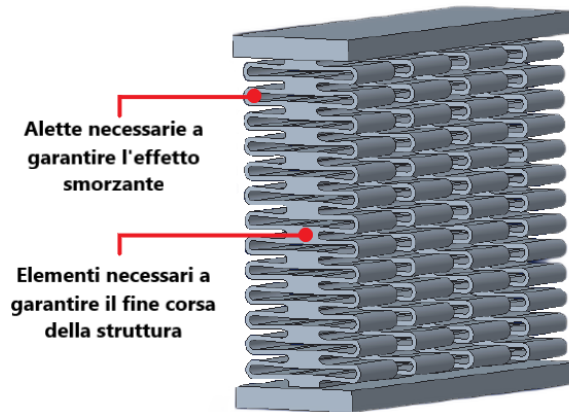


Figura 81-Esempio di una struttura del primo gruppo (Large) di cui ne vengono evidenziate le alette smorzanti e gli elementi atti a garantirne il fine corsa [2]

Tutte e tre le strutture di questo gruppo, come si nota in Figura 83, non hanno presentato alcuna rottura né tantomeno deformazioni residue in seguito all'esecuzione delle prove statiche.

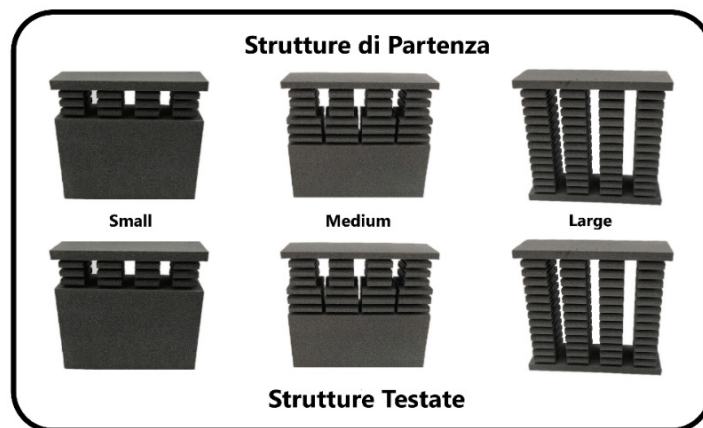


Figura 82-Confronto visivo tra le strutture prima e dopo l'esecuzione delle prove statiche [2]

La riproducibilità dei risultati ottenuti, e di conseguenza delle prove statiche effettuate, è stata valutata considerando, per ogni struttura, le due pendenze caratteristiche delle curve F-S ottenute dai tre provini ad esse relative. È stata

innanzitutto valutata la pendenza relativa al primo tratto delle varie curve, il quale è influenzato sia dalla geometria della struttura testata che dal materiale di cui essa è costituita; questo tratto della curva, infatti, è quello in corrispondenza del quale le alette di cui è costituita la struttura si trovano effettivamente a lavorare. È stata poi valutata anche la pendenza del secondo tratto della curva, ossia quello in corrispondenza del quale le strutture sono arrivate a pacco; l'andamento di questo secondo tratto è dunque influenzato dalle sole caratteristiche del materiale, poiché le alette atte allo smorzamento non lavorano più.

Delle pendenze considerate ne è stato calcolato il valor medio (x_m), la deviazione standard (σ), l'incertezza relativa e l'incertezza percentuale ($I_{\%}$). È utile sottolineare come l'incertezza percentuale (Eq. 9) sia stata ricavata passando attraverso la conoscenza del valore medio delle pendenze (x_m) (Eq. 6), della loro deviazione standard (σ_x) (Eq. 7) e della loro incertezza relativa ($I_{relativa}$) (Eq. 8).

$$x_m = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2}{N}} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$I_{relativa} = \frac{\sigma_x}{x_m} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$I_{\%} = I_{relativa} * 100 \quad (\text{Eq. 9})$$

dove x_i ($i = 1,2,3$) rappresenta la pendenza i -esima, N il numero totale di pendenze considerate ($N = 3$).

In Figura 84 è possibile osservare la pendenza del primo e del secondo tratto delle curve F-S relative ai tre provini testati della struttura Large mentre in Figura 85 vengono riportati i valori di incertezza percentuale relativi alla pendenza del primo e secondo tratto e le altre grandezze necessarie ad ottenerle.

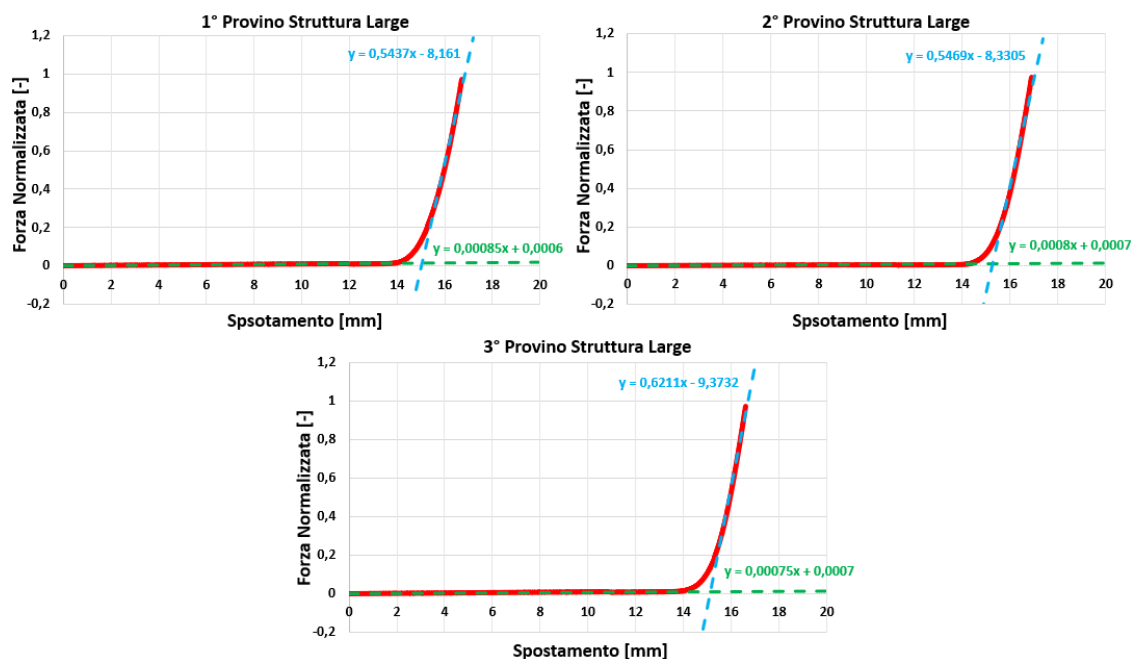


Figura 83-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura Large [2]

	Pendenza [1/mm]				Deviazione Standard (σ_x) [1/mm]	Incertezza Relativa (I_r) [-]	Incertezza % [-]
	1° Provino	2° Provino	3° Provino	Media			
1° tratto	8,5E-04	8,0E-04	7,5E-04	8,0E-04	5,0E-05	6,3E-02	6,25
2° tratto	5,4E-01	5,5E-01	6,2E-01	5,7E-01	4,4E-02	7,7E-02	7,68

Figura 84-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura Large e relativi indici [2]

Da quanto mostrato in Figura 85 si nota che le incertezze percentuali, sia del primo che del secondo tratto della curva, risultano di media entità ed è dunque possibile affermare che le prove effettuate sulle strutture del secondo gruppo risultano moderatamente riproducibili.

4.2.1.2-Strutture del secondo gruppo

Vengono ora analizzate le curve Forza-Spostamento relative alle strutture del secondo gruppo, le quali si ricorda essere realizzate in PA12 (Nylon) attraverso il processo di stampa Selective Laser Sintering. Anche in questo caso, di ciascuna tipologia di struttura, ne sono stati testati tre provini differenti, in modo tale che i risultati potessero avere valenza statistica; in Figura 86 vengono rappresentati

solamente i valori medi dei risultati ottenuti testando i tre differenti provini di ciascuna struttura.

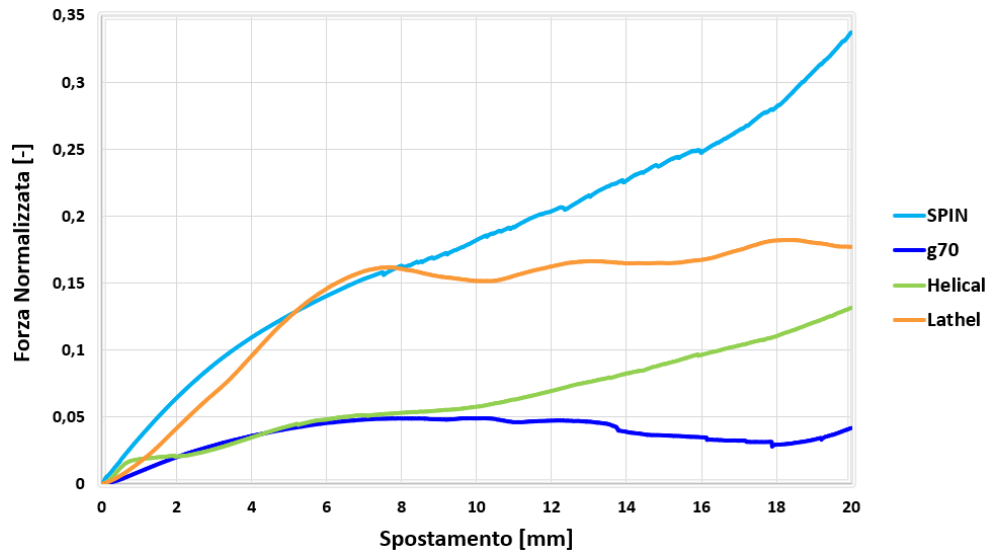


Figura 85-Curve F-S statiche relative alle strutture del primo gruppo [2]

Vengono ora analizzati, struttura per struttura, i risultati ottenuti:

- **Struttura g70:** la curva relativa a questa struttura possiede un andamento simil-lineare e continuo fino ad uno spostamento di circa 10mm, dopodiché essa inizia a presentare delle discontinuità. Quest'ultime si manifestano molto probabilmente in concomitanza dell'inizio del collasso della struttura dovuto al superamento della tensione di snervamento in un'abbondante porzione di essa. Infatti, osservando quanto riportato in Figura 87, in cui viene raffigurata la struttura in seguito all'esecuzione della prova, si nota che essa presenti rotture interne e deformazioni residue importanti. Infine, questa struttura rispetto a tutte le altre, a parità di spostamento, permette di raggiungere valori inferiori di forza.

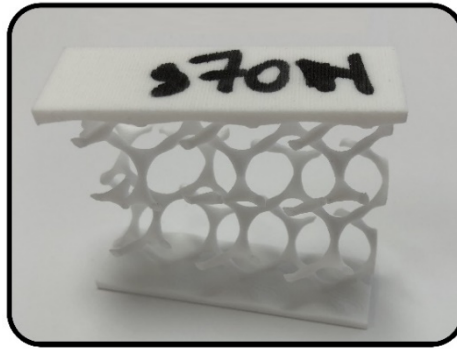


Figura 86-Struttura g70 in seguito all'esecuzione della prova statica [2]

- **Helical:** la curva relativa a questa struttura presenta un andamento continuo per tutta la sua durata e questo potrebbe far pensare ad una buona resistenza; infatti, osservando in Figura 88 la struttura ottenuta in seguito all'esecuzione della prova, si nota che all'interno di essa non sono presenti rotture. Però, sempre osservando quanto riportato in Figura 88 si nota che la struttura testata mostra notevoli deformazioni residue, sintomo di un avvenuta plasticizzazione. Infine, essa permette di raggiungere valori di forza confrontabili con quelli della struttura g70, se non per l'ultimo tratto di curva in cui si ha in questo caso un leggero innalzamento della stessa.

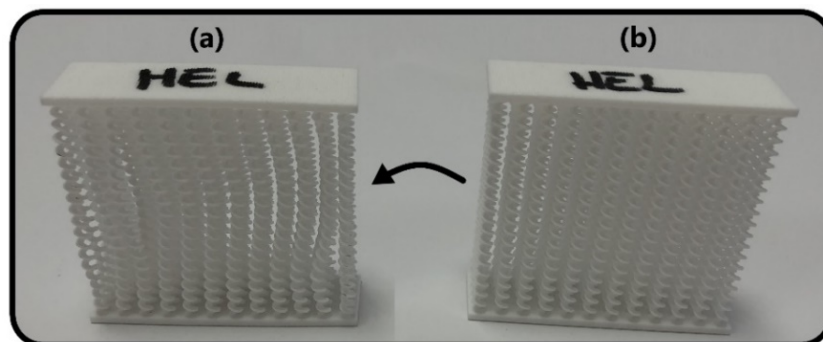


Figura 87-Struttura Helical prima (b) e dopo (a) l'esecuzione della prova statica [2]

- **Lathel:** la curva relativa a questa struttura mostra un andamento simil-lineare e continuo fino ad uno spostamento di circa 7mm, dopodiché perde la sua linearità, mentre la continuità viene mantenuta per tutta la durata dello spostamento. Nonostante la curva risulti continua anche nella seconda zona del grafico, in questo tratto mostra però un andamento altalenante; questo fa

pensare che la struttura, pur non arrivando a rottura, abbia abbondantemente superato al suo interno la tensione di snervamento. Infatti, osservando la struttura ottenuta in seguito all'esecuzione della prova, si nota come essa, pur non presentando rotture, mostri comunque importanti deformazioni residue (Figura 89). Infine, essa permette di raggiungere valori di forza superiori rispetto a quelli relativi alle due strutture precedenti.

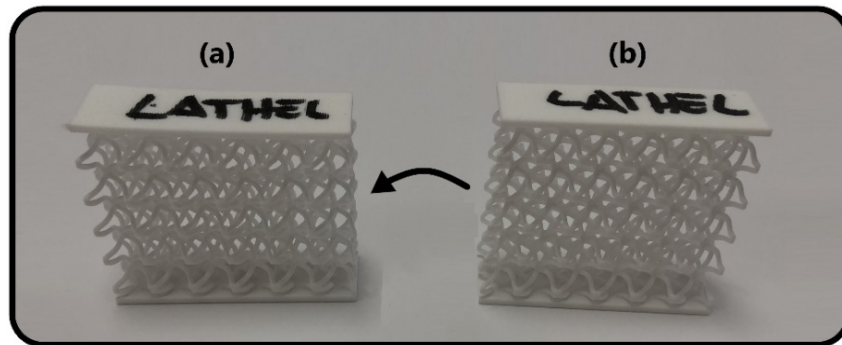


Figura 88-Struttura Lathel prima (b) e dopo (a) l'esecuzione della prova statica [2]

- **SPIN:** la curva relativa a questa struttura mostra un andamento simil-lineare e continuo fino ad uno spostamento di circa 7mm, dopodiché inizia a presentare delle discontinuità; quest'ultime potrebbero essere causate da contatti e strisciamenti tra varie parti della struttura, oppure dal verificarsi di alcune microfratture interne, anche se questa seconda ipotesi sembra meno plausibile; la curva infatti, pur iniziando a manifestare delle piccole discontinuità, mantiene un andamento crescente e ben definito e questo è sintomo che la struttura sia ancora ampiamente in grado di sostenere sollecitazioni cui è sottoposta. Questa ipotesi viene ulteriormente confermata dal fatto che, in seguito all'esecuzione della prova, non si manifestano sulla struttura particolari deformazioni residue, come mostrato in Figura 90. Infine, essa permette di raggiungere valori di forza superiori rispetto a quelli relativi a tutte le strutture facenti parti di questo gruppo.

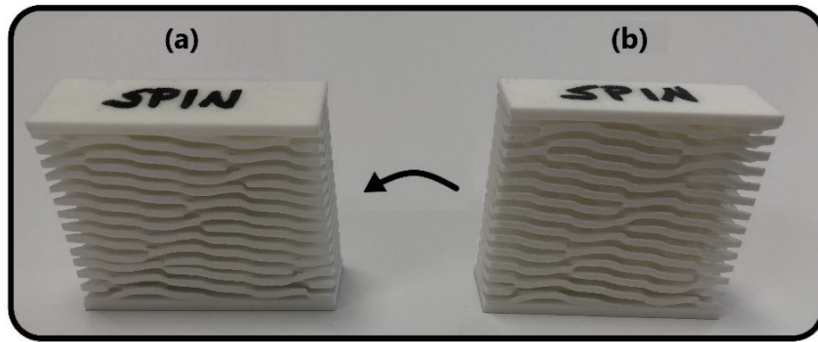


Figura 89-Struttura SPIN prima (b) e dopo (a) l'esecuzione della prova statica [2]

La riproducibilità dei risultati ottenuti, e di conseguenza delle prove statiche effettuate, è stata valutata considerando, per ogni struttura, la pendenza del tratto lineare elastico delle curve F-S ad esse relative, il quale è influenzato sia dalla geometria della struttura testata che dal materiale di cui essa è costituita; in particolare, si è deciso di considerarne la pendenza fino ad uno spostamento imposto pari a 4mm, in modo tale da essere sicuri che nel tratto considerato la struttura si trovi completamente in campo elastico. Occorre sottolineare che, al contrario di quanto avveniva per le strutture del primo gruppo, l'influenza della geometria della struttura sull'andamento della curva non scompare in nessun tratto di essa; infatti, le strutture si trovano a plasticizzare, o addirittura a presentare delle rotture, ancor prima di arrivare a pacco. Questo è anche il motivo per cui, allo scopo di valutare la riproducibilità delle prove, viene considerata solamente la pendenza iniziale delle curve; non avrebbe infatti senso confrontare la pendenza delle curve in corrispondenza dei tratti in cui la struttura risulta fortemente plasticizzata o in cui presenta delle rotture perché, ovviamente, i risultati non sarebbero confrontabili. Dato che di ciascuna struttura sono stati testati tre differenti provini, per valutare la riproducibilità delle prove effettuate su ciascuna di esse è stato eseguito un confronto tra le pendenze associate alle curve dei tre provini. Tale confronto è stato realizzato, come nel caso delle strutture del primo gruppo, calcolando l'incertezza percentuale ($I_{\%}$) (Equazione 9) tra i tre valori di pendenza misurati, passando attraverso la conoscenza delle stesse grandezze mostrate in Sezione 4.2.1.1.

Come accennato, le considerazioni riguardo la riproducibilità delle prove sono state effettuate su tutte e quattro le strutture del secondo gruppo ma, a titolo di esempio, viene mostrato solamente quanto ottenuto relativamente alla struttura SPIN; infatti, i risultati ottenuti per le strutture g70, Lathel ed Helical risultano identici e non vengono dunque mostrati. In Figura 91 è possibile osservare la pendenza del tratto elastico delle curve relative ai tre provini testati della struttura SPIN, mentre in Figura 92 vengono riportati i valori di incertezza percentuale relativi alla pendenza del tratto elastico considerato e le altre grandezze necessarie ad ottenerla.

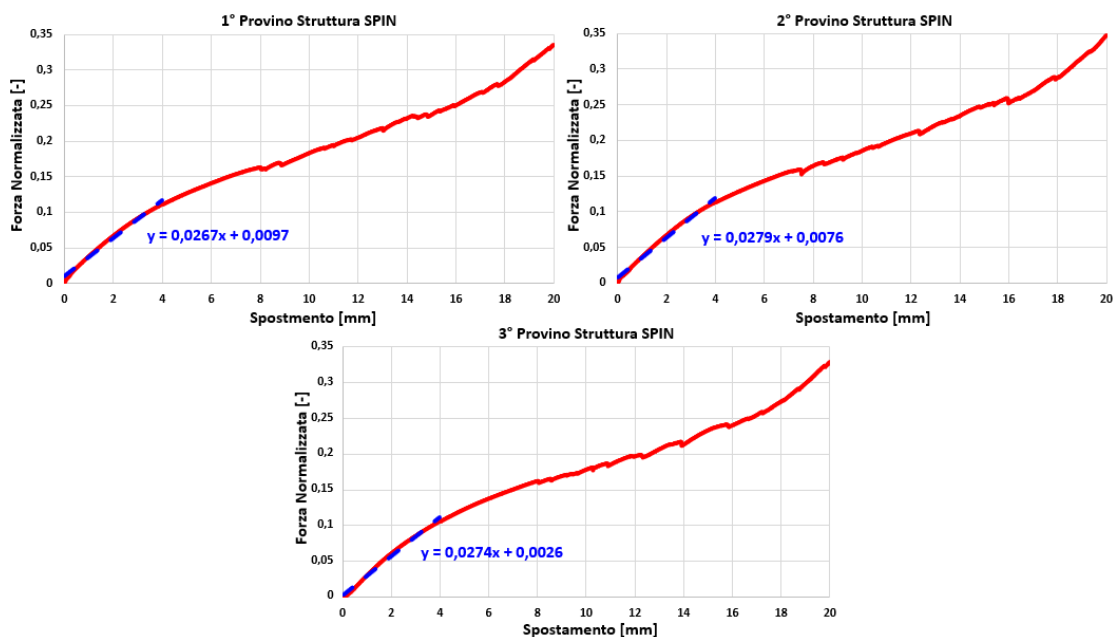


Figura 90-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura SPIN [2]

Pendenza Tratto Elastico [1/mm]				Deviazione Standard (σ_x) [1/mm]	Incertezza Relativa (I_r) [-]	Incertezza % [-]
1° Provino	2° Provino	3° Provino	Media			
2,7E-02	2,8E-02	2,7E-02	2,7E-02	6,0E-04	2,2E-02	2,2

Figura 91-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini della struttura SPIN e relativi indici [2]

Da quanto mostrato in Figura 92 si nota che l'incertezza percentuale del tratto lineare elastico della curva risulta di piccola entità, ed è dunque possibile affermare che le prove effettuate sulle strutture del secondo gruppo risultano riproducibili, per lo meno considerandone il solo tratto elastico.

4.2.1.3-Sistema Progressive Comfort

Anche nel caso di Progressive Comfort sono stati testati tre differenti esemplari; in Figura 93 viene rappresentata la curva media.

Osservando quanto riportato in Figura 93 si nota come la curva del Progressive Comfort ottenuta dalle prove sperimentali, coincida con quella descritta nel paragrafo 3.2 all'interno del quale veniva appunto analizzato tale sistema; si possono infatti osservare le quattro rigidità caratteristiche della curva, il cui valore aumenta progressivamente man mano che i vari set di alette presenti all'interno del sistema entrano in gioco. La forza massima che si sviluppa durante la prova è quella utilizzata per normalizzare i valori di forza relativi a tutte le curve finora considerate, ed assume infatti valore unitario. Infine, anche in questo caso lo spostamento applicato al sistema risulta nettamente inferiore rispetto a quello imposto alle strutture del primo gruppo; infatti, non avrebbe avuto senso assoggettare il sistema a deformazioni di 20mm dato che esso arriva al suo fine corsa già a 9mm.

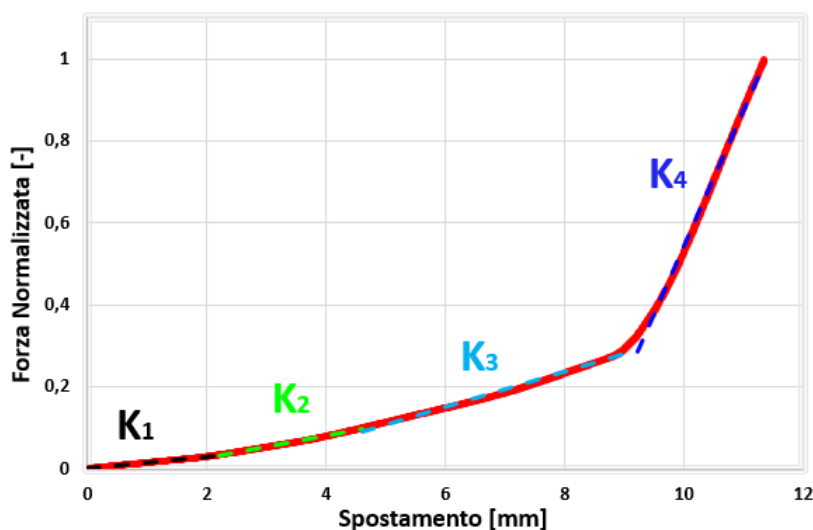


Figura 92-Curva F-S statica relativa al sistema Progressive Comfort [2]

In questo caso la riproducibilità dei risultati ottenuti, e di conseguenza delle prove statiche effettuate, è stata valutata considerando due delle pendenze caratteristiche delle curve F-S relative al sistema considerato. È stata innanzitutto valutata la pendenza relativa al primo tratto di curva, il quale è influenzato sia dalla geometria che dal materiale di cui è costituito il sistema; questo tratto della curva, infatti, è quello in corrispondenza del quale le alette di cui è costituito il sistema si trovano

effettivamente a lavorare. È stata poi valutata anche la pendenza del quarto tratto della curva, ossia quello in corrispondenza del quale il sistema è arrivato a pacco; l'andamento di quest'ultimo tratto è dunque influenzato dalle sole caratteristiche del materiale, poiché le alette atte allo smorzamento non lavorano più in alcun modo. Dato che del sistema ne sono stati testati tre differenti provini, per valutare la riproducibilità delle prove effettuate, è stato eseguito un confronto tra le pendenze associate alle curve dei tre provini. Tale confronto è stato realizzato, come nel caso delle strutture di primo e secondo gruppo, calcolando l'incertezza percentuale ($I_{\%}$) (Equazione 9) che si instaura tra i tre valori di pendenza misurati, passando attraverso la conoscenza delle stesse grandezze mostrate in Sezione 4.2.1.1; questo è stato effettuato sia per quanto riguarda le pendenze del primo che del quarto tratto delle curve. In Figura 94 è possibile osservare la pendenza del primo e del quarto tratto delle curve F-S relative ai tre provini testati della sistema Progressive Comfort, mentre in Figura 95 vengono riportati i valori di incertezza percentuale relativi alla pendenza del primo e del quarto tratto e le altre grandezze necessarie ad ottenerle.

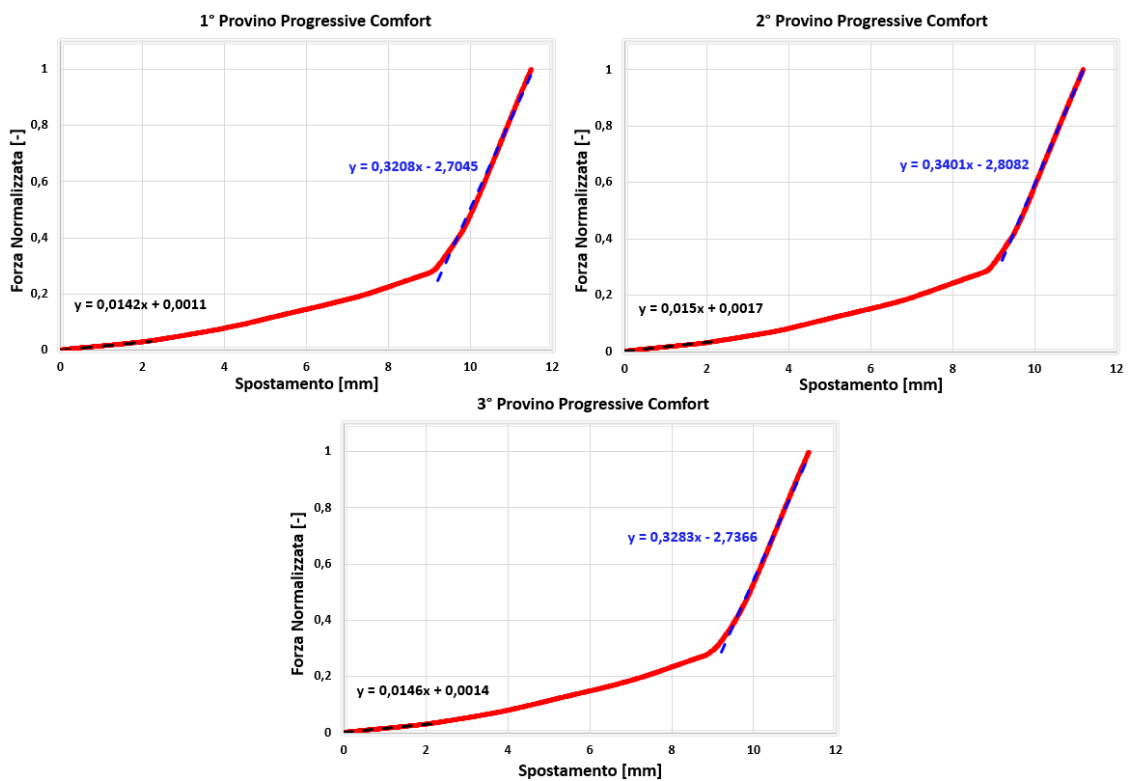


Figura 93-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini del sistema Progressive Comfort [2]

	Pendenza [1/mm]				Deviazione Standard (σ_s) [1/mm]	Incertezza Relativa (I_r) [-]	Incertezza % [-]
	1° Provino	2° Provino	3° Provino	Media			
1° tratto	1,4E-02	1,5E-02	1,5E-02	1,5E-02	4,0E-04	2,7E-02	2,74
4° tratto	3,2E-01	3,4E-01	3,4E-01	3,3E-01	1,1E-02	3,3E-02	3,34

Figura 94-Pendenze delle curve ottenute testando staticamente i tre provini del sistema Progressive Comfort e relativi indici [2]

Da quanto mostrato in Figura 95 si nota che le incertezze percentuali, sia del primo che del quarto tratto della curva, risultano di piccola entità, ed è dunque possibile affermare che le prove effettuate sul sistema Progressive Comfort risultano riproducibili.

Confrontando i valori di incertezza percentuale relativi alle prove effettuate sulle strutture di primo e secondo gruppo con quelle del sistema Progressive Comfort si evince che, nonostante tutte le prove effettuate risultino ripetibili, i risultati relativi a quelle effettuate sulle strutture del primo gruppo presentano una maggior variabilità (Figura 96); in ogni caso le prove effettuate sulle strutture di primo e secondo gruppo risultano nel complesso riproducibili, cosa non scontata data la geometria complessa, il materiale e la tecnica di stampa con cui sono state realizzate.

	Strutture del 1° Gruppo		Strutture del 2° Gruppo	Progressive Comfort	
	1° Tratto	2° Tratto	Tratto Elastico	1° Tratto	4° Tratto
Incertezza % [-]	6,250	7,675	2,205	2,740	3,340

Figura 95-Confronto tra le incertezze percentuali relative alle prove effettuate sulle strutture di primo e secondo gruppo e sul sistema Progressive Comfort [2]

4.2.1.4-Confronti

In Figura 97 vengono confrontate le curve F-S relative alle strutture di primo e secondo gruppo con quella relativa al sistema Progressive Comfort; vengono indicati direttamente i valori mediati della forza misurata durante i test effettuati su ciascuno dei tre provini relativi a ciascuna struttura. È possibile mostrare direttamente i risultati mediati di ciascuna struttura poiché, come si è visto, le prove effettuate risultano fortemente riproducibili.

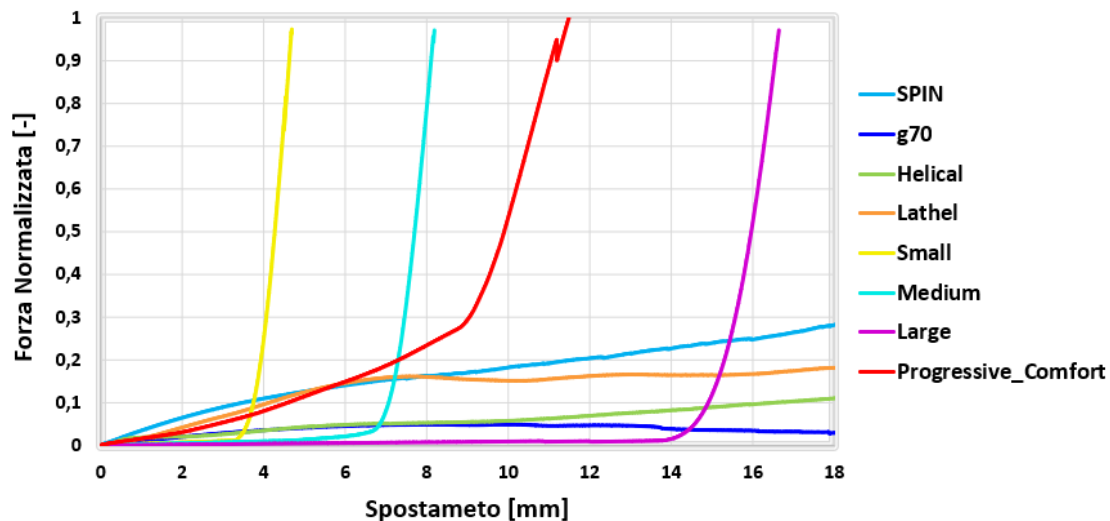


Figura 96-Confronto tra le curve F-S relative alle strutture di primo e secondo gruppo con quella relativa al Progressive Comfort [2]

Osservando le curve relative alle strutture del secondo gruppo si nota come nessuna di esse sia in grado, a parità di spostamento, di raggiungere gli stessi valori di forza del sistema Progressive Comfort; gli unici casi in cui, per un dato spostamento, il valore di forza sviluppato all'interno delle strutture è superiore rispetto a quello del Progressive Comfort, si verifica nel tratto di spostamento che arriva fino a circa 5mm, relativamente alle strutture Lathel e Spin.

Che le nuove strutture non sarebbero state in grado di raggiungere valori di forza confrontabili con quelli del sistema attuale era però prevedibile; infatti, lo scopo di questo studio non è quello di realizzare delle strutture che siano in grado di ottenere da subito i punti caratteristici della curva F-S posti come vincoli (sezione 3.2.1), bensì di caratterizzare le strutture scelte che, in studi futuri, possano essere combinate o modificate per ottenere la curva desiderata.

Inoltre, si nota come le curve relative alle strutture del secondo gruppo risultino continue fino a determinati valori di spostamento, dopodiché, iniziano a presentare un andamento discontinuo; tale fenomeno è con tutta probabilità associato al superamento della tensione di snervamento nella maggior parte del materiale di cui è costituita la struttura, ossia all'inizio del collasso strutturale della stessa. Questo viene confermato dal fatto che la maggior parte di esse, in seguito all'esecuzione delle prove

statiche, presentano rotture o comunque deformazioni residue di entità più o meno rilevanti. In particolare, si è visto come la struttura g70 presenti delle rotture interne e notevoli deformazioni residue, mentre per quanto riguarda invece le strutture Lathel ed Helical, esse pur non mostrando alcuna rottura, presentano deformazioni residue importanti; l'unica struttura che è stata in grado di resistere alle prove, mostrando al contempo deformazioni residue limitate è la struttura SPIN, la quale è anche l'unica struttura TPMS tra quelle testate. Non sorprende il fatto che quest'ultima sia la struttura che presenta la miglior resistenza e le minori deformazioni residue; infatti, essendo le strutture TPMS costituite da superfici, sono in grado di resistere a carichi particolarmente elevati senza arrivare al collasso, al contrario di quanto accade nelle Strutture Lattice in cui i beam superano facilmente lo snervamento.

Dunque, la struttura SPIN risulta essere la più interessante tra quelle del secondo gruppo poiché, per poter implementare le strutture testate all'interno del nuovo sistema di riduzione del rinculo, è indispensabile che esse siano in grado di resistere alle forze cui si trovano sottoposte senza presentare rotture o deformazioni residue; il fatto di non presentare deformazioni residue garantisce infatti la ripetibilità di utilizzo del sistema. Per quanto riguarda invece tutte le altre strutture del secondo gruppo, esse potranno essere utilizzate solamente se sottoposte a spostamenti inferiori rispetto a quelli per cui la loro curva inizia a mostrare un andamento discontinuo; infatti, dalle osservazioni fatte si è dedotto che in corrispondenza degli spostamenti associati al tratto discontinuo della curva, la struttura inizia ad entrare in crisi.

Osservando invece le curve relative alle strutture del primo gruppo si nota che esse permettono di raggiungere valori di forza paragonabili a quelli del sistema Progressive Comfort; l'incremento di forza avviene però in modo improvviso, ed in corrispondenza di un determinato valore di spostamento, mentre prima di quella data deformazione i valori raggiunti risultano molto bassi. Come già accennato tale fenomeno è legato al fatto che le tre strutture arrivano molto facilmente al loro fine corsa e senza che le alette di cui sono costituite effettuino effetti smorzanti considerevoli; questo le rende inadatte ad assolvere alla funzione cui sono dedicate, a meno che su di esse vengano apportate modifiche sostanziali.

In seguito a tutte le osservazioni effettuate è possibile affermare che a livello statico, le strutture maggiormente promettenti sono quelle relative al secondo gruppo ed in particolare la struttura SPIN.

4.2.2-Prove dinamiche

In questa sezione vengono analizzati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali dinamiche, le quali sono state effettuate sia sul sistema Progressive Comfort, sia su tutte le strutture a disposizione ad eccezione della g70.

Saranno innanzitutto mostrate le curve Forza-Spostamento derivanti dalle prove effettuate sulle strutture del primo gruppo, e solo in seguito quelle relative alle strutture del secondo gruppo; in entrambi i casi i risultati relativi alle strutture verranno confrontati con quelli ottenuti dalle prove effettuate sul Progressive Comfort. Di tutte le curve che verranno mostrate, ne verrà considerato anche il tratto di “ritorno”, ossia quello relativo al recupero della forma originale da parte della struttura; questo tratto non è stato considerato durante l’analisi dei risultati delle prove statiche, poiché in tal caso non avrebbe fornito alcun’informazione di rilievo. Le curve che verranno mostrate contengono al loro interno i valori mediati di forza ottenuti dall’analisi dei tre provini testati per ogni struttura; è possibile mostrare direttamente le curve mediate poiché si è visto che i risultati tre provini relativi ad ogni struttura sono tra loro confrontabili e dunque riproducibili. Inoltre, dato che ogni provino è stato testato effettuando cinque rilasci del grave per ogni altezza di caduta considerata, questo implica che nei risultati mostrati non è stato mediato solamente quanto ottenuto dai tre provini relativi ad una data struttura, bensì anche i risultati associati ai cinque rilasci effettuati da una data altezza; è possibile fare questo poiché, valutando la ripetibilità dei risultati di ciascuna struttura, si è visto che le curve ottenute dalle prove effettuate su di un dato provino, ad una data altezza, per i cinque differenti rilasci sono confrontabili. Le valutazioni riguardo ripetibilità e riproducibilità di prove e risultati verranno mostrate solamente dopo aver effettuato tutte le considerazioni necessarie riguardo i risultati ottenuti. Anche in questo caso, così come successo per le prove statiche, i valori presenti all’interno delle curve F-S non

rappresentano le forze realmente misurate durante l'esecuzione dei test, bensì un valore normalizzato delle stesse, ottenuto dividendole per un valore di riferimento; il valore di forza utilizzato come riferimento è lo stesso utilizzato per normalizzare i risultati delle prove statiche, ossia il valore massimo di forza sviluppata durante le prove statiche effettuate sul sistema Progressive Comfort.

Una volta analizzate queste curve si passerà ad illustrare i vari indici necessari alla valutazione dell'assorbimento energetico di ciascuna tipologia di struttura, i quali verranno calcolati per ogni altezza di rilascio del grave; di tali indici non ne verrà mostrato solamente il valore medio bensì tutti i valori relativi ai test effettuati su tutti e tre i provini relativi alla struttura considerata, ed a tutti e cinque i rilasci effettuati da una data altezza. Per fare questo verranno utilizzati dei Box Plot, i quali permetteranno di valutare la dispersione dell'indice considerato rispetto al suo valore medio e di effettuare delle valutazioni riguardo l'assorbimento energetico delle strutture; questi Box Plot verranno inoltre utilizzati per valutare ripetibilità e riproducibilità delle prove. Dato che la ripetibilità viene definita come l'accordo tra i risultati di misure effettuate nelle medesime situazioni sperimentali e sullo stesso soggetto, per valutarla verrà considerata la dispersione di uno degli indici utilizzati per la valutazione dell'assorbimento energetico rispetto al suo valore medio, considerando durante il calcolo degli stessi cinque rilasci effettuati su di un dato provino alle varie altezze di rilascio del grave, il tutto ripetuto per ogni struttura [74]. La riproducibilità è invece definita come l'accordo tra i risultati di misure effettuate in condizioni differenti, e nel caso specifico su provini differenti della stessa tipologia di struttura [74]; per valutarla verrà dunque considerata la dispersione degli stessi indici utilizzati per la valutazione dell'assorbimento energetico rispetto al loro valore medio, considerando durante il calcolo degli stessi i tre provini di ciascuna struttura e tutti e 5 i rilasci effettuati da ogni altezza di rilascio del grave. Dei vari indici non ne verrà indicato il valore effettivo, bensì un valore normalizzato rispetto al valore medio dell'indice considerato, relativo al Progressive Comfort ed all'altezza di rilascio maggiore (300mm).

4.2.2.1-Strutture del primo gruppo e sistema Progressive Comfort

Vengono mostrate in Figura 98 le curve Forza-Spostamento relative alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort; in particolare, si possono notare sei curve differenti, ciascuna delle quali è rappresentativa di una data altezza di rilascio del grave.

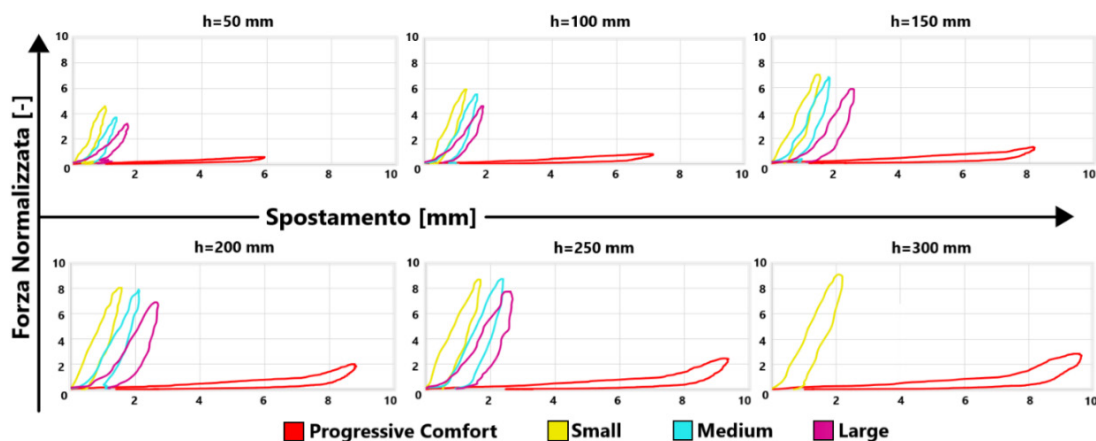


Figura 97-Curve F-S dinamiche ottenute alle varie altezze di rilascio del grave, relative alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Osservando quanto riportato in Figura 98 si evince che solamente la struttura Small ed il Progressive Comfort sono stati in grado di resistere all'intero ciclo di prove cui sono stati sottoposti, mentre le strutture Large e Medium hanno presentato delle rotture durante i rilasci effettuati alla penultima altezza di caduta; si nota infatti come le curve relative a quest'ultime due strutture non siano presenti nel grafico relativo all'ultima altezza di rilascio. Analizzando meglio tali curve si vede, sia che la forza trasmessa dalle tre strutture raggiunge valori notevolmente maggiori rispetto a quella relativa al Progressive Comfort, sia che gli spostamenti subiti da quest'ultimo risultano maggiori. In base a quanto osservato durante l'analisi dei risultati della statica, era prevedibile che queste strutture si comportassero in questo modo; le alette di cui sono costituite, infatti, non forniscono un'azione smorzante sufficiente e questo fa sì che la struttura arrivi con molta facilità a pacco, trasmettendo da lì in poi la totalità della forza in arrivo dal grave in caduta in modo istantaneo.

Vengono ora mostrati i vari indici necessari a valutare l'assorbimento energetico delle strutture del primo gruppo. Per ogni indice verranno mostrati innanzitutto dei

Box Plot globali, all'interno dei quali vengono inseriti tutti i dati disponibili; vengono dunque considerati, per ogni struttura, i risultati relativi ai tre provini, alle sei altezze di caduta e ai cinque rilasci effettuati per ciascuna di esse. Attraverso questi Box Plot verranno effettuate anche delle considerazioni relative alla riproducibilità delle prove.

In seguito, dell'indice FM, verranno analizzati dei Box Plot al cui interno vengono inseriti, di ogni struttura, i dati relativi ad un unico provino testato, considerandone tutti e cinque i rilasci effettuati da ogni altezza di rilascio; attraverso di essi verranno effettuate delle considerazioni relativamente alla ripetibilità delle prove.

Il primo ad essere analizzato è l'indice FM (Peak Force), che rappresenta il valore del picco di forza sviluppatosi a valle della struttura in seguito all'impatto del grave. I valori assunti da tale indice vengono mostrati in Figura 99 e si nota come risultino in linea con quanto emerso dall'analisi delle curve F-S dinamiche; infatti, i valori del picco di forza trasmessa relativi alle tre strutture sono nettamente superiori rispetto a quelli associati al Progressive Comfort.

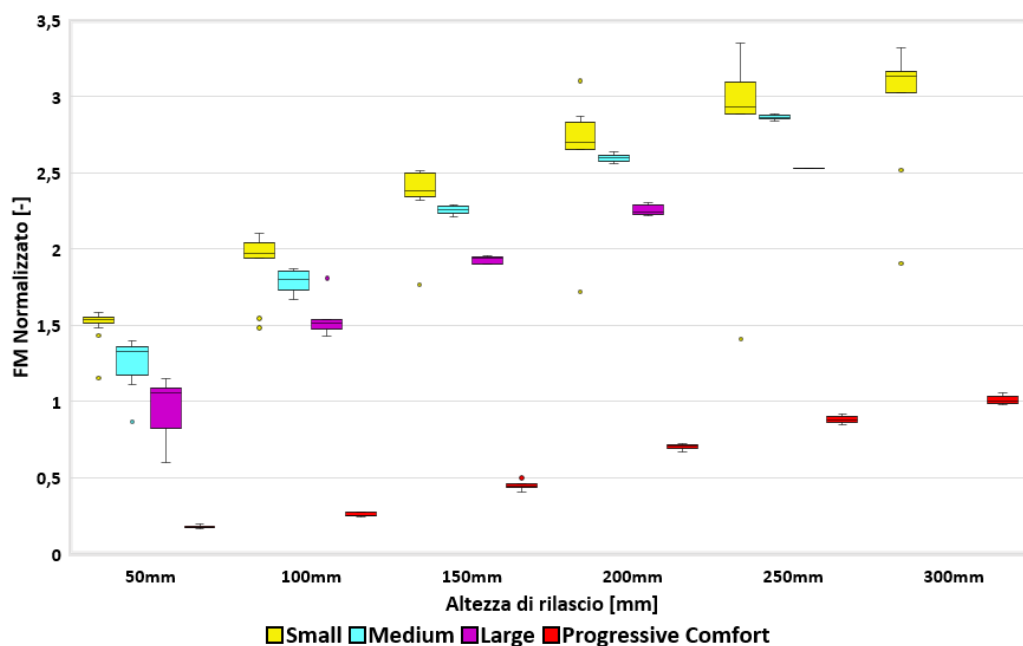


Figura 98-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

In Figura 100 vengono riportati i valori dell'indice DM (Maximum Deflection) che si ricorda essere lo spostamento massimo subito dalla struttura testata. I valori assunti da tale indice risultano anch'essi in linea con quanto osservato precedentemente e si

nota, infatti, come lo spostamento delle strutture sia nettamente inferiore rispetto a quello dell'attuale sistema; ovviamente il fatto di subire piccole deformazioni fa sì che esse possiedano un indice TT (Total Time) molto basso, rappresentando quest'ultimo il tempo necessario al completamento di un ciclo completo, costituito dalla fase di carico e scarico (Figura 101).

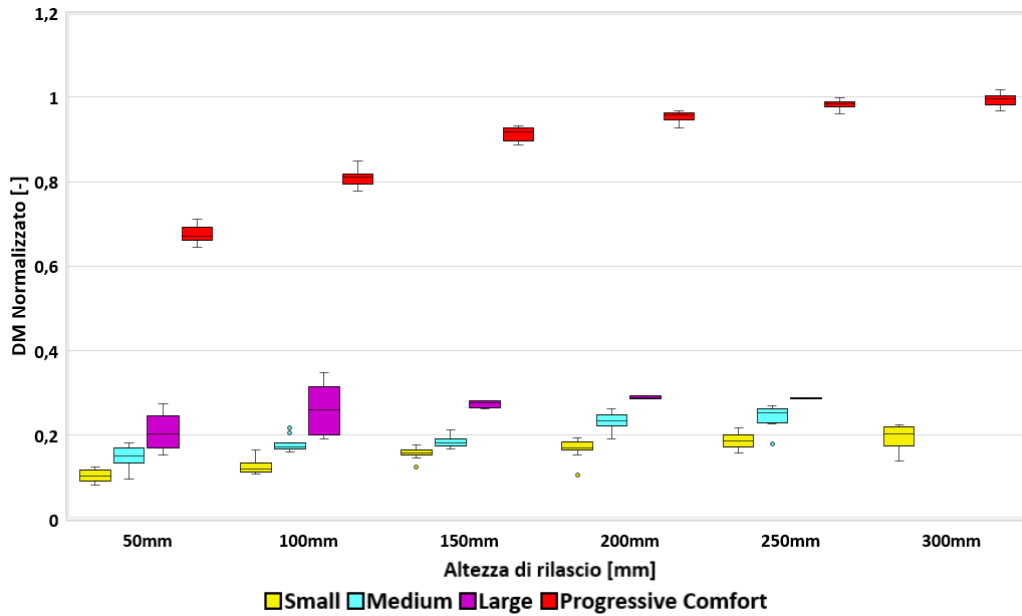


Figura 99-Valori assunti dall'indice DM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

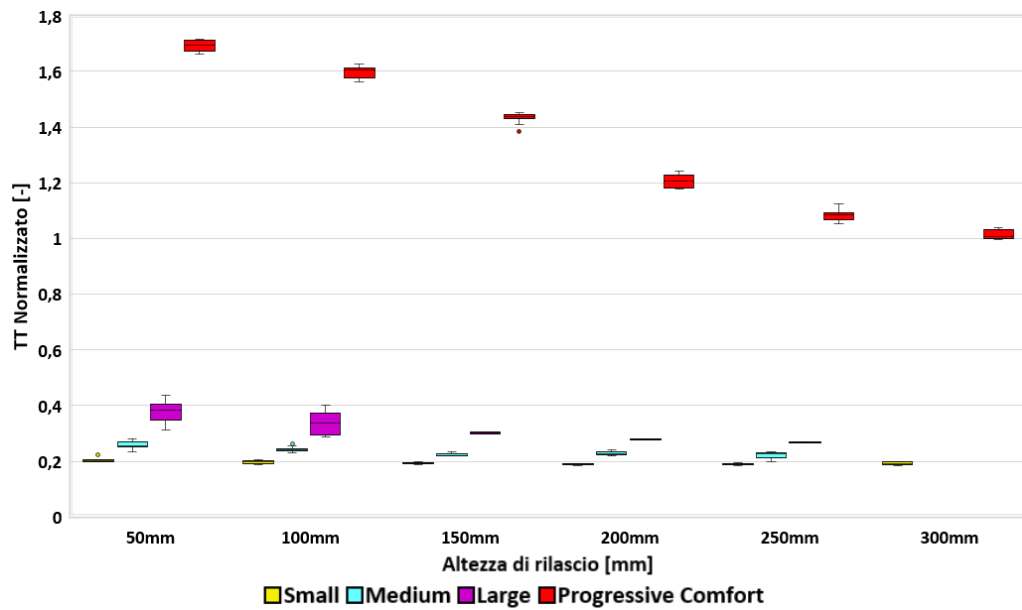


Figura 100-Valori assunti dall'indice TT alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

In Figura 102 vengono mostrati i valori assunti dall'indice UM (Maximum Energy Applied), che rappresenta la massima energia sviluppata all'interno della struttura durante la fase di compressione; osservandone l'andamento, si nota come esso assuma valori maggiori relativamente alle strutture, piuttosto che al sistema attualmente utilizzato.

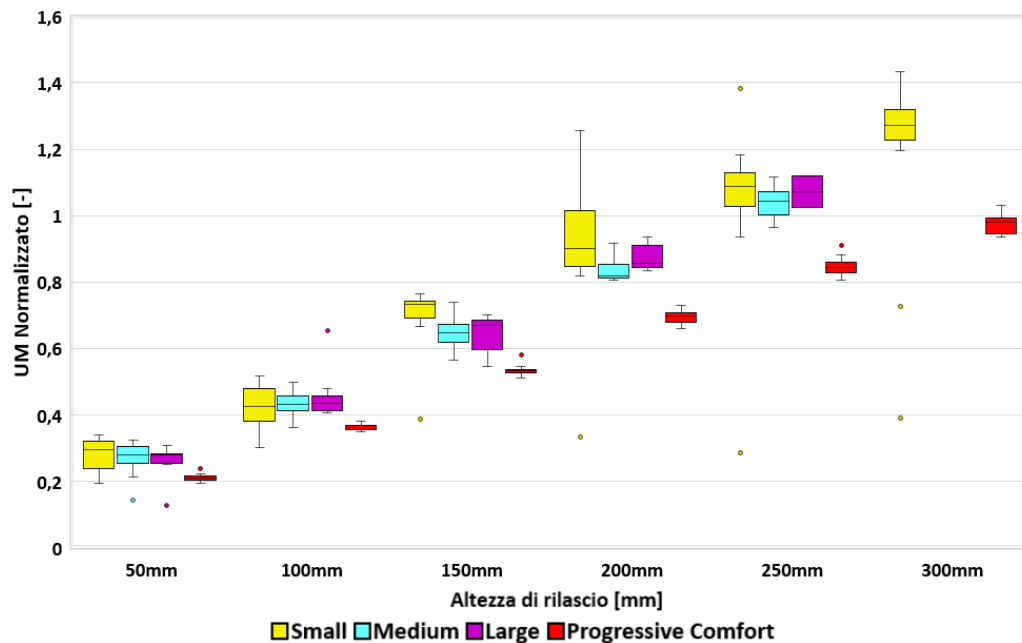


Figura 101-Valori assunti dall'indice UM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Infine, viene riportato in Figura 103 il coefficiente HER (Hysteresis Energy Ratio) che è un indice della capacità della struttura di dissipare energia; si nota come le strutture considerate forniscano un assorbimento energetico inferiore rispetto a quello del Progressive Comfort e questo poteva essere facilmente dedotto anche osservando l'area racchiusa all'interno delle curve F-S precedentemente mostrate.

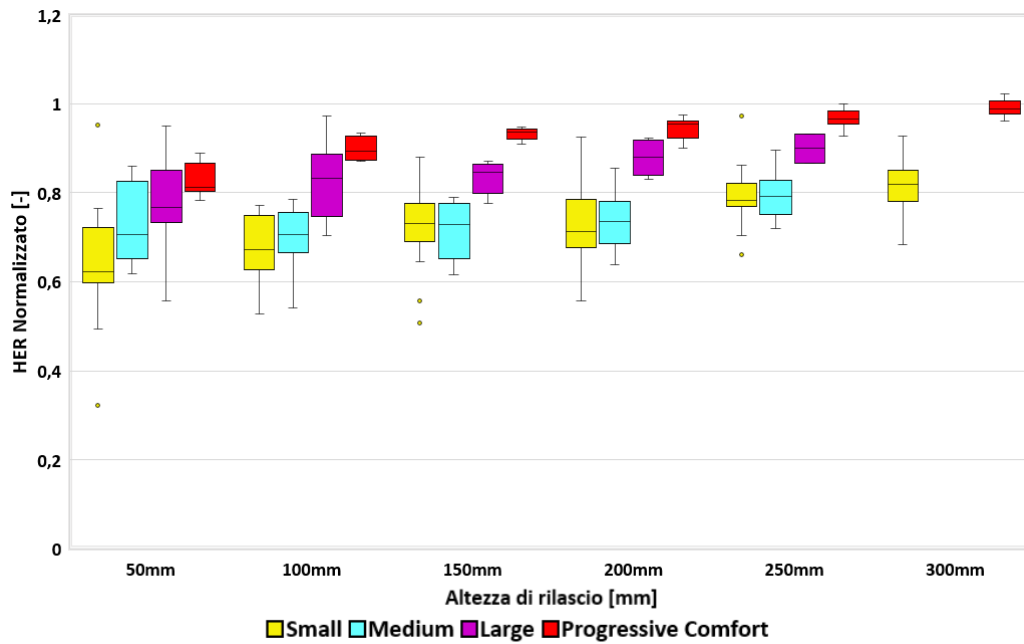


Figura 102-Valori assunti dall'indice HER alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Dall'analisi dei parametri considerati e riportati nelle figure 99, 100, 101, 102 e 103 si nota che la dispersione di tali parametri nel caso delle strutture testate è molto maggiore rispetto alla dispersione presentata dal Progressive Comfort; da ciò si evince che, mentre si può dire che le prove dinamiche effettuate sul Progressive Comfort risultano riproducibili, riguardo quelle effettuate sulle strutture del primo gruppo non è possibile affermare lo stesso.

Viene ora valutata la ripetibilità delle prove attraverso l'analisi del Box Plot riportato in Figura 104, all'interno del quale vengono mostrati i valori assunti dall'indice FM (Peak Force), considerando in questo caso i cinque rilasci effettuati su di un unico provino, alle varie altezze di rilascio del grave.

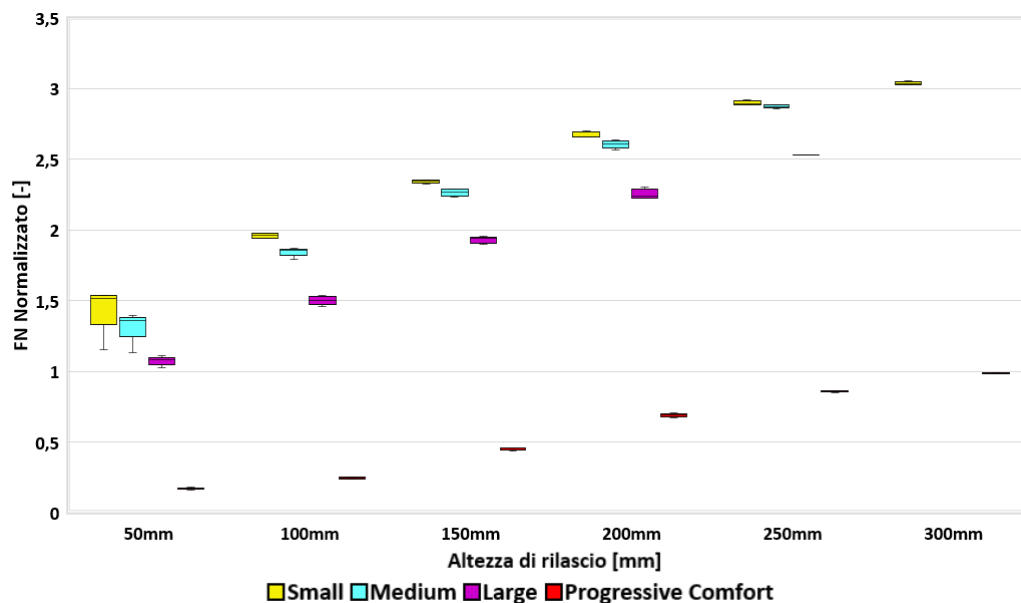


Figura 103-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort (considerandone un unico provino) [2]

Analizzando quanto riportato in Figura 104 è possibile affermare che le prove dinamiche effettuate sulle strutture del primo gruppo e sul sistema Progressive Comfort risultano ripetibili; infatti, la dispersione dell'indice FM rispetto al suo valore medio risulta limitata per tutte le varie altezze di caduta, eccetto la prima. In ogni caso, la dispersione dei valori assunti dall'indice FM relativamente alle strutture del primo gruppo risulta maggiore rispetto a quella del Progressive Comfort; questo sta a significare che le prove effettuate sulle strutture risultano meno ripetibili.

4.2.2.2-Strutture del secondo gruppo e sistema Progressive Comfort

Vengono mostrate in Figura 105 le curve Forza-Spostamento relative alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort; in particolare, si possono notare sei curve differenti, ciascuna delle quali è rappresentativa di una data altezza di rilascio del grave.

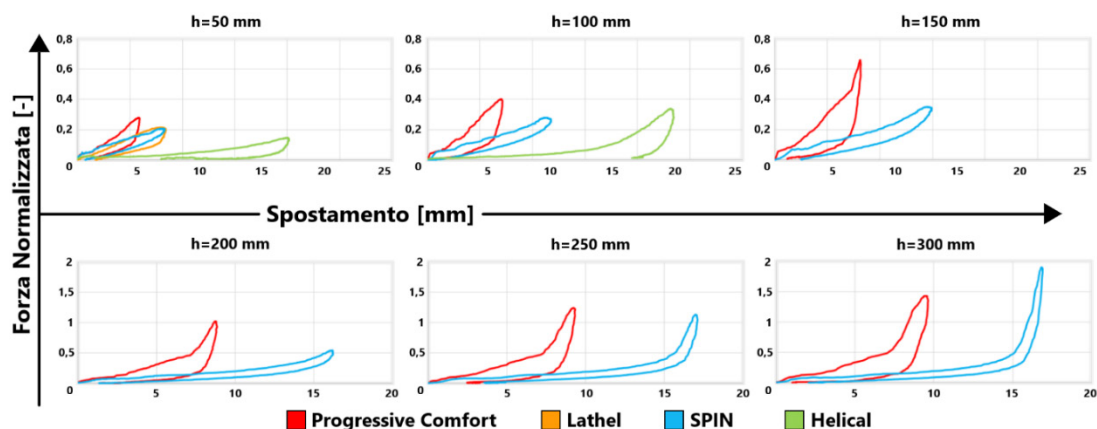


Figura 104-Curve F-S dinamiche ottenute alle varie altezze di rilascio del grave, relative alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Osservando quanto riportato in Figura 105 si nota che nel grafico corrispondente alla prima altezza di rilascio sono presenti sia la curva relativa al Progressive Comfort, che quelle relative alle tre strutture del primo gruppo, mentre man mano che l'altezza di rilascio aumenta il numero di curve presenti diminuisce; infatti, alcune strutture non sono state in grado di resistere ai rilasci effettuati oltre una certa altezza, arrivando a rottura. In particolare, oltre all'attuale sistema, solamente la struttura SPIN è stata in grado di resistere a tutti i rilasci effettuati, mentre la struttura Lathel ed Helical hanno perso la sua funzionalità rispettivamente in corrispondenza della seconda e terza altezza di rilascio.

Una cosa interessante che si nota osservando le curve relative alla globalità delle strutture testate è che, ad eccezione di quella relativa all'ultima altezza di rilascio, tutte le altre presentano un picco di forza trasmessa inferiore rispetto a quella relativa al Progressive. Per quanto riguarda la deformazione subita, invece, si nota come quella relativa alle strutture del secondo gruppo sia sempre maggiore rispetto a quella dell'attuale sistema.

Osservando le aree racchiuse all'interno delle curve, le quali rappresentano l'energia assorbita dalle strutture, si nota già ad occhio che quelle relative alla struttura SPIN sono inferiori a quelle dell'attuale sistema; considerazioni più approfondite riguardo questo aspetto vengono però ora effettuate analizzando i valori assunti dai principali indici necessari a valutare l'assorbimento energetico delle strutture. Si inizia mostrando i valori assunti dall'indice FM, i quali vengono riportati in Figura 106.

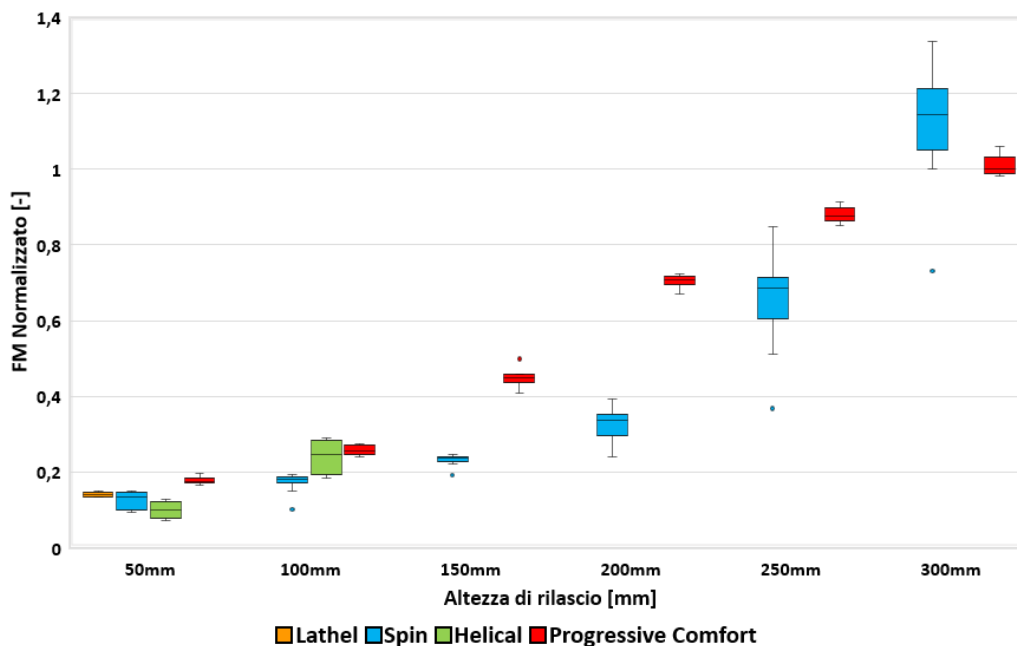


Figura 105-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Osservando il grafico si nota che la forza di picco trasmessa dalle varie strutture risulta inferiore rispetto a quella del Progressive Comfort per tutte le altezze di rilascio considerate, ad eccezione dell'ultima. In Figura 107 vengono invece poi riportati i valori dell'indice DM che risultano anch'essi in linea con quanto già osservato dalle curve F-S delle strutture in questione; si nota infatti come gli spostamenti relativi alle strutture testate risultino notevolmente maggiori rispetto a quelli del Progressive Comfort.

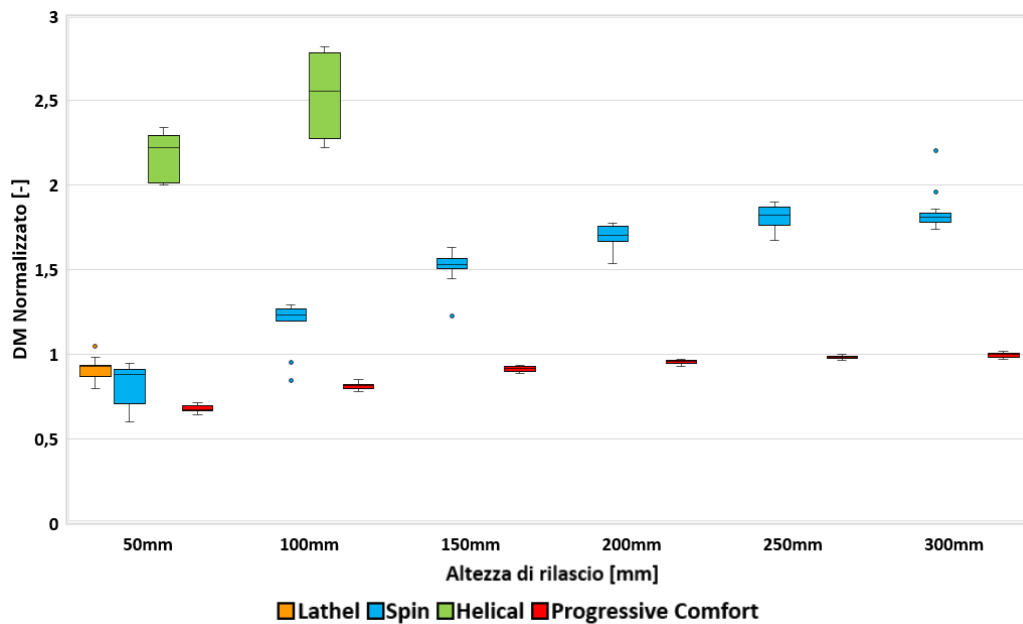


Figura 106-Valori assunti dall'indice DM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

In Figura 108 vengono ora mostrati i valori assunti dall'indice TT; ovviamente, essendo lo spostamento delle strutture, maggiore rispetto a quello del Progressive Comfort, allora lo sarà anche il tempo necessario al completamento di un ciclo completo, costituito dalla fase di carico e scarico.

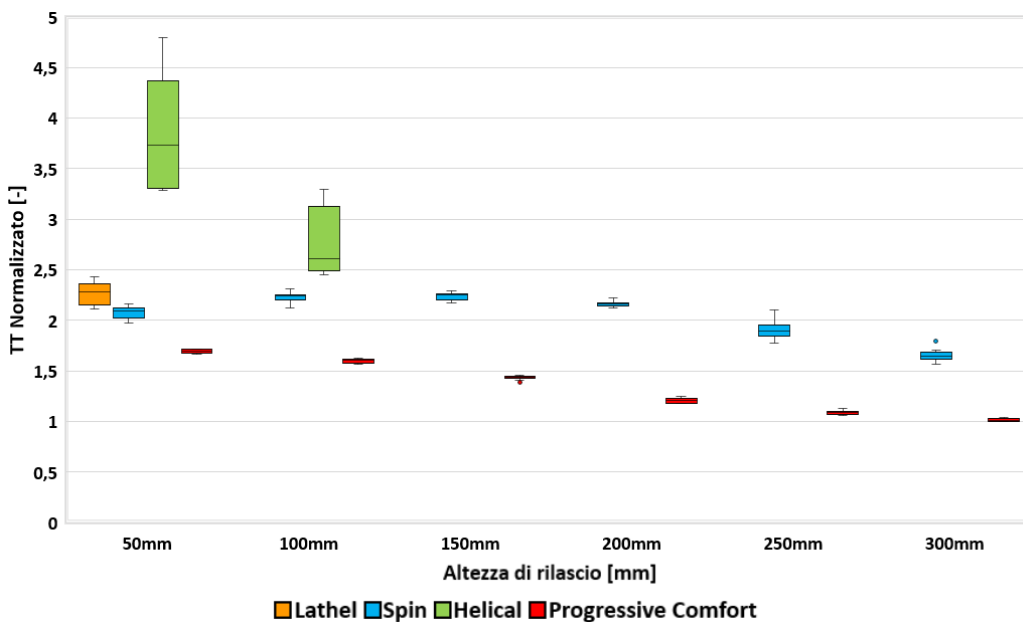


Figura 107-Valori assunti dall'indice TT alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

In Figura 109 viene rappresentato l'andamento dell'indice UM, il quale assume valori maggiori relativamente alle strutture del secondo gruppo rispetto che al sistema Progressive Comfort.

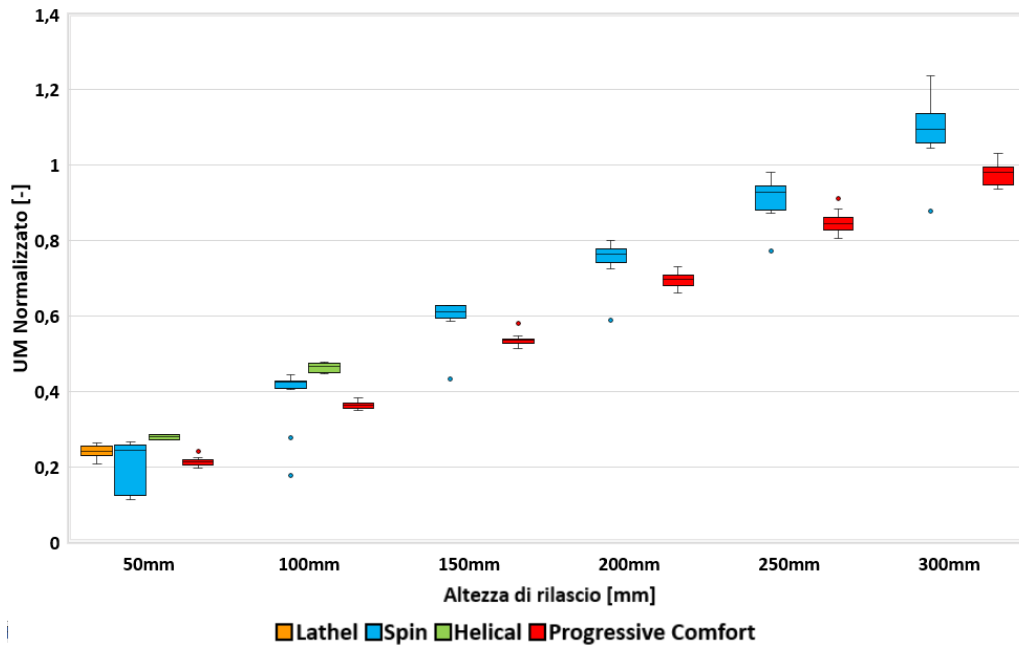


Figura 108-Valori assunti dall'indice UM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Infine, in Figura 110 vengono mostrati i valori assunti dall'indice HER, da cui possono essere ricavate importanti informazioni relative al gruppo di strutture considerato.

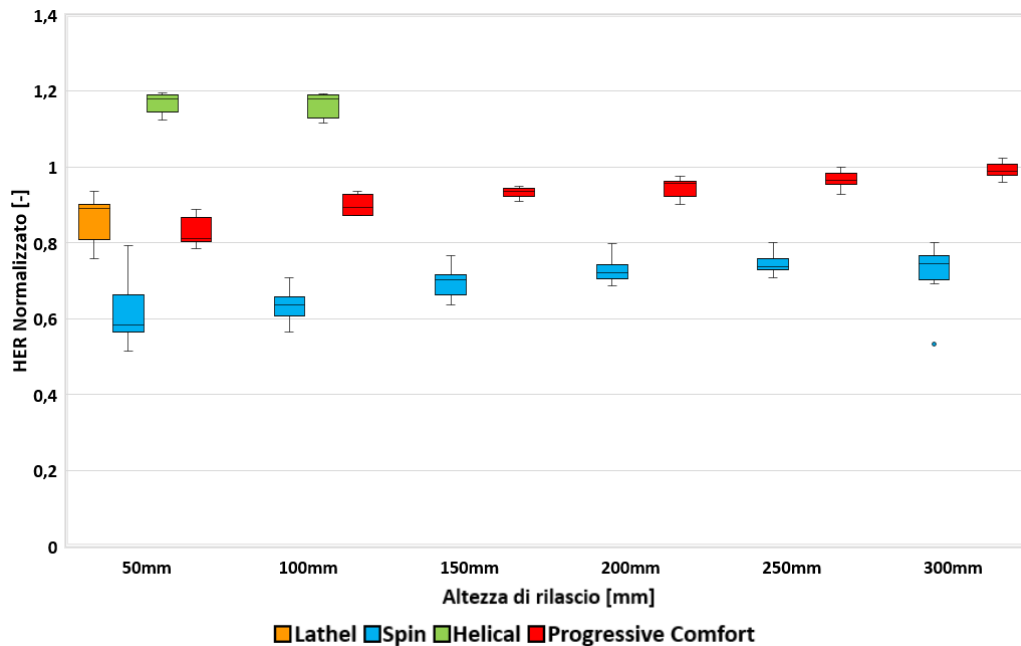


Figura 109-Valori assunti dall'indice HER alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del secondo gruppo ed al sistema Progressive Comfort [2]

Si nota subito che la struttura SPIN, che era stata definita in base ai risultati delle prove statiche come la più promettente, presenta un assorbimento energetico inferiore rispetto a quello del Progressive Comfort. Da ciò si evince che la riduzione del picco di forza trasmessa che tale struttura permette di ottenere è fortemente legato al fatto che essa presenta uno spostamento massimo maggiore rispetto a quello del Progressive Comfort; essa, deformandosi di più, riesce a distribuire la forza in un intervallo di tempo maggiore e di conseguenza a ridurre il picco massimo. Tale riduzione di forza potrebbe però essere vista come un lato positivo solamente nel caso in cui fosse ammissibile far assumere al nuovo sistema tale spostamento, ma dato che quest'ultimo dovrà presentare una deformazione massima confrontabile con quella dell'attuale sistema (9mm), allora tale risultato risulta incompatibile con lo sviluppo dello stesso. Questo anche perché se tale struttura venisse modificata in modo da ridurre lo spostamento, con tutta probabilità, il valore del picco di forza trasmessa tenderebbe ad aumentare, annullandone i vantaggi.

Ha quindi più senso effettuare delle considerazioni sul valore assunto dall'indice HER, il quale, basandosi sull'energia dissipata dalla struttura, risulta svincolato dallo

spostamento subito da quest'ultima e fornisce dunque un'indicazione più generale delle sue potenzialità. Dalle considerazioni appena effettuate si evince che la struttura SPIN, nonostante permetta di ridurre il picco di forza trasmessa, realizza una dissipazione energetica inferiore rispetto a quella del Progressive Comfort; infatti, il fatto che quest'ultimo possieda al suo interno delle parti in moto relativo tra loro, che vanno dunque a dissipare energia per attrito, rende difficile eguagliarne le prestazioni. Invece, sempre osservando il valore di HER riportato in Figura 110, si evince che le altre due strutture del secondo gruppo permettono di realizzare una dispersione energetica maggiore rispetto a quella dell'attuale sistema; di contro però presentano rotture già in corrispondenza delle prime altezze di rilascio, motivo per cui difficilmente potranno essere implementate all'interno del nuovo sistema.

Sulla base di quanto riportato in nei Box Plot precedenti è possibile affermare che, come nel caso precedente, i risultati relativi al sistema Progressive Comfort risultano riproducibili. Non è però possibile dire lo stesso delle prove effettuate sulle strutture del secondo gruppo in quanto, oltre ad essere presente una notevole dispersione dei valori assunti dai vari indici rispetto al valore medio, vi è anche una notevole differenza tra gli andamenti dei vari parametri; per questo motivo non è possibile trarre conclusioni coerenti sulla riproducibilità di tali prove.

Viene ora valutata la ripetibilità delle prove attraverso l'analisi del Box Plot riportato in Figura 111, all'interno del quale vengono mostrati i valori assunti dall'indice FM (Peak Force), considerando in questo caso i cinque rilasci effettuati su di un unico provino, alle varie altezze di rilascio del grave.

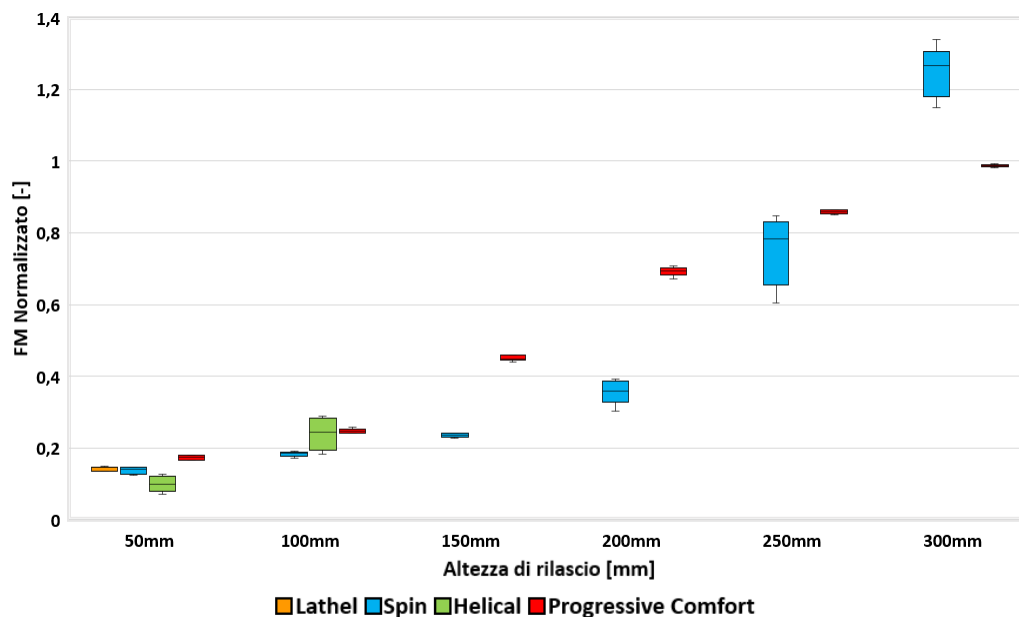


Figura 110-Valori assunti dall'indice FM alle varie altezze di rilascio, relativamente alle strutture del primo gruppo ed al sistema Progressive Comfort (considerandone un unico provino) [2]

Analizzando quanto riportato in Figura 111 è possibile affermare che le prove dinamiche effettuate sulle strutture del secondo gruppo e sul sistema Progressive Comfort risultano ripetibili. Infatti, la dispersione dell'indice FM rispetto al suo valore medio risulta limitata, eccetto per le ultime due altezze di rilascio associate alla strutture SPIN; il fatto che la struttura SPIN, in corrispondenza delle ultime due altezze di rilascio, presenti una dispersione elevata dell'indice FM è molto probabilmente legata all'inizio della generazione di microfratture all'interno della struttura.

In particolare, la dispersione dei valori assunti dall'indice FM relativamente alle strutture del secondo gruppo risulta maggiore rispetto a quella del Progressive Comfort; questo sta a significare che le prove effettuate sulle strutture risultano meno ripetibili.

4.2.2.3-Confronto

Analizzando i risultati relativi alle prove dinamiche è emerso che quelle del secondo gruppo sono le strutture più promettenti e su cui può risultare conveniente lavorare allo scopo di migliorarne le caratteristiche. Le potenzialità di tali strutture erano state identificate anche durante l'analisi dei risultati relativi alle prove statiche; in particolare

la struttura SPIN è stata l'unica in grado di resistere a tutte le prove, statiche e dinamiche, cui è stata sottoposta. Infatti, si è visto come le strutture del secondo gruppo permettano di ridurre il picco di forza trasmessa rispetto al Progressive Comfort, relativamente a tutte le varie altezze di rilascio del grave, ad eccezione dell'ultima, ossia quella di 300mm; esse però, per effettuare tale riduzione del picco di forza trasmessa, necessitano di spostamenti molto maggiori rispetto a quelli dell'attuale sistema. Quest'ultimo è un fattore che le penalizza in quanto la deformazione del sistema che vuole essere sviluppato non può assumere valori eccessivi e deve rimanere circa pari, o al massimo leggermente superiore, a quella che si verifica attualmente nel Progressive Comfort. Questo implica che tali strutture, per poter essere utilizzate all'interno del sistema, dovranno necessariamente essere modificate in modo tale da limitarne lo spostamento massimo; tale modifica potrebbe però causare un aumento del picco di forza trasmessa in quanto esse, subendo uno spostamento inferiore, ed avendo quindi a disposizione un intervallo di tempo più breve su cui distribuire la forza, tenderanno a perdere i vantaggi mostrati.

Risulta dunque interessante valutare il coefficiente HER di tali strutture, poiché risulta svincolato, per lo meno in parte, dalla deformazione subita dalla struttura e fornisce quindi un'indicazione più generale delle potenzialità della stessa. Riguardo la dispersione energetica, tutte le strutture del secondo gruppo hanno mostrato delle difficoltà nel raggiungere le prestazioni del Progressive Comfort e questo è sicuramente un fattore di cui tenere conto, poiché è la principale caratteristica ricercata. Infatti, analizzando i valori di HER relativi a tali strutture si è visto come non risultino confrontabili con quelli associati al Progressive Comfort, ma questo dato non deve scoraggiare riguardo le loro potenzialità; si era consapevoli fin dall'inizio che raggiungere gli stessi valori di HER dell'attuale sistema sarebbe stato difficile, in quanto esso presenta al suo interno delle parti in moto relativo che strisciando dissipando energia.

Per quanto riguarda invece le strutture del primo gruppo si è visto che, così come succedeva in statica, anche in dinamica esse permettono di raggiungere valori di forza molto alti con spostamenti molto piccoli. Questo è però dovuto al fatto che le tre

strutture arrivano molto facilmente al loro fine corsa senza che le alette di cui sono costituite realizzino effetti smorzanti considerevoli; ciò le rende inadatte ad assolvere alla funzione cui sono dedicate, a meno che su di esse vengano apportate modifiche sostanziali. Infatti, valutandone i valori dell'indice HER si è osservato che, come per le strutture del primo gruppo, essi risultano notevolmente inferiori rispetto a quelli associati al Progressive Comfort e questo era facilmente prevedibile anche a fronte delle osservazioni precedentemente effettuate riguardo il loro comportamento.

4.2.3-Correlazione tra dati statici e dinamici

In questa sezione si andranno confrontate le curve Forza-Spostamento ottenute dalle prove statiche, con quelle derivanti dalle dinamiche e verrà ricavata la relazione che le lega. Questo confronto verrà effettuato solamente per le strutture del secondo gruppo, poiché quelle del secondo non possiedono delle curve tali da rendere interessante un loro approfondimento. In particolare, di ogni struttura considerata ne verrà sovrapposta la curva F-S statica con quelle dinamiche, in modo tale da identificare quello che è stato definito come il "coefficiente moltiplicativo" (Paragrafo 3.2) che intercorre tra statica e dinamica; la conoscenza di tale coefficiente risulta particolarmente interessante, in quanto il comportamento statico di un polimero non coincide con quello dinamico e risulta quindi importante identificare la relazione che li lega. Come noto tale relazione non dipende solamente dal materiale di cui è costituita la struttura, bensì anche da altri fattori, tra cui i più importanti sono la velocità di deformazione a cui si trova sottoposta e la particolare geometria che la caratterizza. Questo è il motivo per cui tali coefficienti dovranno essere ricavati per ogni tipologia di struttura considerata e per ogni velocità di deformazione cui esse si trovano sottoposte e di conseguenza verranno effettuati i seguenti confronti: di ogni struttura testata ne verrà confrontata la curva F-S statica con quelle dinamiche relative a quattro diverse altezze di rilascio, che corrispondono anche a quattro differenti velocità di deformazione della struttura; le prime tre altezze di cui ne verrà valutata la curva F-S (50, 100, 150 mm) sono quelle che permettono al grave di imprimere alla struttura da testare una forza ed una velocità di deformazione pari a quelle che si genererebbero

nel caso in cui vengano utilizzate cartucce a bassa, media, ed alta energia, mentre l'ultima altezza (200mm) è quella che permette di testare le strutture ad una condizione di leggero sovraccarico rispetto alla condizione più gravosa che può verificarsi in fase di sparo.

Le varie strutture verranno analizzate separatamente e mentre per la SPIN tali confronti verranno effettuati per tutte le varie altezze di rilascio indicate, per le altre due strutture questo non potrà essere fatto. In particolare, per la struttura Helical verranno considerate solamente le curve F-S dinamiche relative alle altezze di rilascio pari a 50 e 100mm, mentre della struttura Lathel verrà considerata solamente quella relativa all'altezza di rilascio pari a 50mm; questo perché in corrispondenza delle altezze successive, tali strutture sono arrivate a rottura.

È utile ricordare che i valori di forza indicati nei grafici sono stati, anche in questo caso, normalizzati rispetto al valore massimo di forza sviluppatasi durante le prove statiche effettuate sul Progressive Comfort.

4.2.3.1-Struttura Lathel

La prima struttura considerata è la Lathel, di cui in Figura 112 ne viene rappresentato il confronto tra la curva F-S statica e quella dinamica relativa all'altezza di rilascio di 50mm.

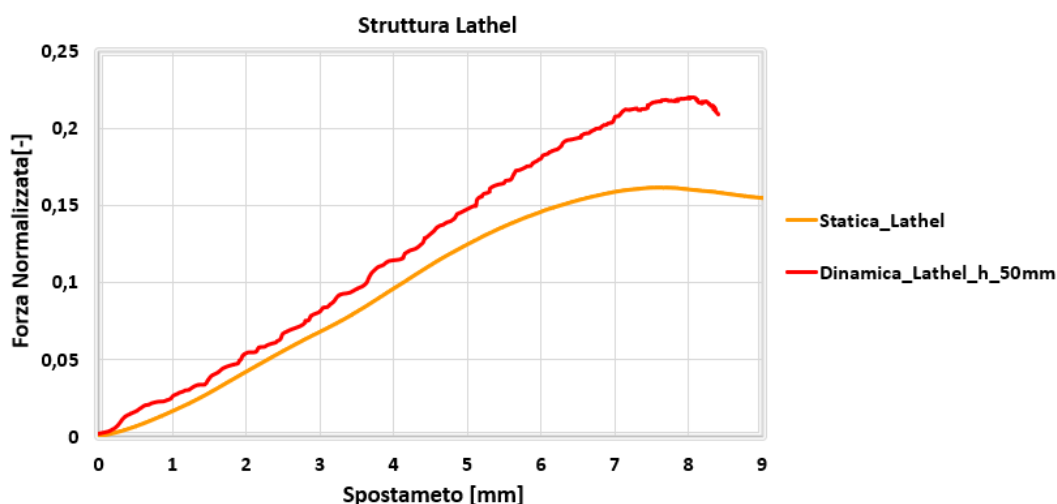


Figura 111-Confronto tra curva dinamica e curva statica della struttura Lathel [2]

Confrontando le due curve si osserva che per la struttura Lathel si verifica il comportamento previsto; essa, quando deformata dinamicamente, presenta un irrigidimento rispetto al caso statico. In particolare, di tale struttura è stata confrontata la curva statica con la sola curva dinamica relativa all'altezza di rilascio pari a 50mm, la quale permette di riprodurre la velocità di deformazione relativa all'utilizzo di cartucce a bassa energia; da tale confronto è stato ricavato un coefficiente moltiplicativo che lega la curva F-S statica con quella dinamica pari ad 1,3.

4.2.3.2-Struttura Helical

Viene ora considerata la struttura Helical, le cui curve vengono confrontate in Figura 113.

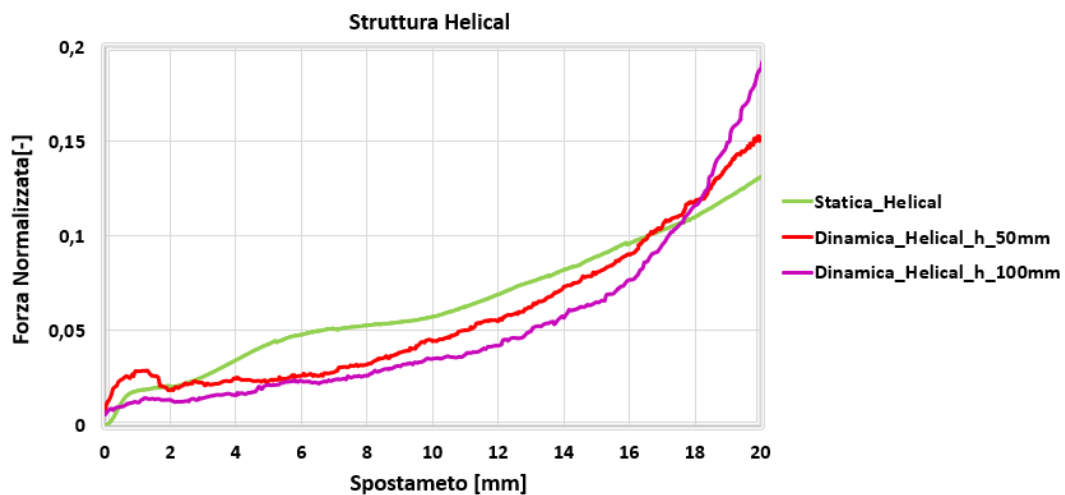


Figura 112-Confronto tra curve dinamiche e curva statica della struttura Helical [2]

Per questa struttura non si è ottenuto l'andamento sperato, poiché la struttura non presenta alcun irrigidimento associato ad un aumento della velocità di deformazione. Questo era però prevedibile in quanto tale struttura risulta labile, ed è dunque difficile incrementarne la rigidità con un semplice aumento della velocità di deformazione; questo è il motivo per cui essa non presenta un aumento della forza sviluppata, bensì una riduzione della stessa all'aumentare della velocità di deformazione.

4.2.3.3-Struttura SPIN

Vengono infine considerate le curve relative alla struttura SPIN che è l'unica ad aver resistito a tutte le altezze di rilascio del grave; in questo caso i confronti tra la curva statica e quelle dinamiche non sono mostrati all'interno di un unico grafico, ma vengono divisi in modo tale da visualizzare meglio i risultati.

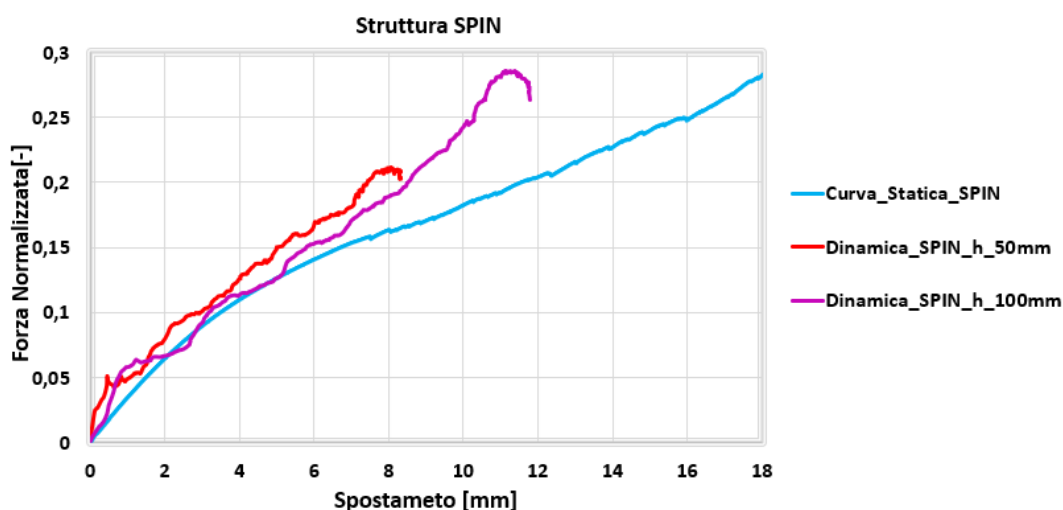


Figura 113-Confronto tra curve dinamiche e curva statica della struttura SPIN [2]

In Figura 114 viene confrontata la curva statica con quelle dinamiche relative alle prime due altezze di rilascio. Si nota come tale struttura, relativamente all'altezza di rilascio pari a 50mm, presenti un irrigidimento che si mantiene costante per tutti i valori di spostamento cui la struttura si trova sottoposta, ed infatti, è stato possibile identificare un coefficiente moltiplicativo pari 1,2; per l'altezza di rilascio pari a 100mm, invece, si nota come per il primo tratto di spostamento della struttura che arriva fino a 5mm, le curve statica e dinamica coincidano, mentre per tutti i valori di deformazione superiori, la curva dinamica presenta un irrigidimento che può essere quantificato attraverso l'utilizzo di un coefficiente pari ad 1,5.

Si passa poi in Figura 115 a considerare le curve relative alle due altezze di rilascio successive, ossia quelle di 150 e 200mm.

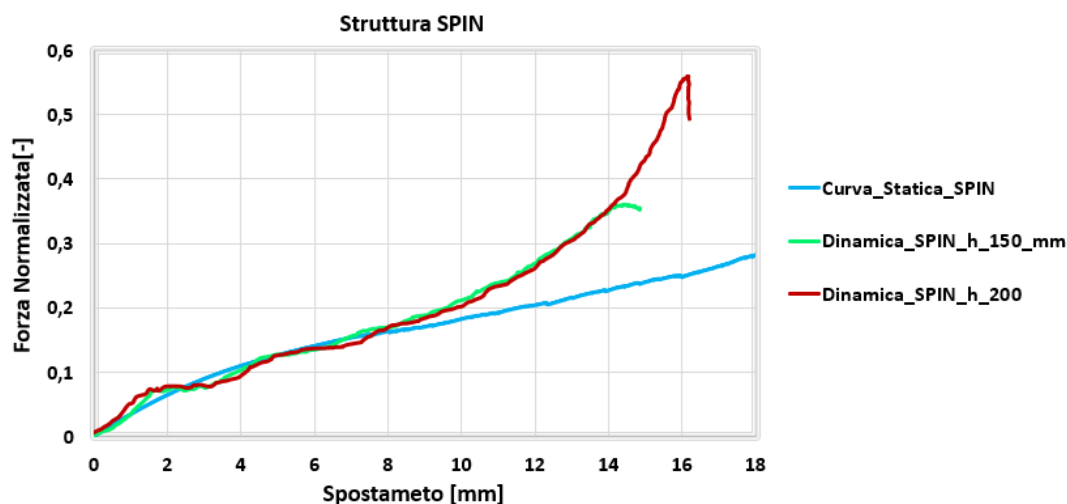


Figura 114-Confronto tra curve dinamiche e curva statica della struttura SPIN [2]

Anche in questo caso, per entrambe le altezze di rilascio del grave, la curva dinamica della struttura segue fino ad uno spostamento di circa 9mm la curva statica, mentre da lì in poi si nota un certo irrigidimento della struttura. In particolare, considerando solamente i tratti delle curve relativi a deformazioni superiori a 9mm e confrontando le pendenze della curva statica con quella delle curve dinamiche, si è visto come quest'ultime possano essere ottenute moltiplicando la curva F-S statica per un coefficiente pari ad 1,5.

In definitiva è possibile affermare che la struttura SPIN tende ad irrigidirsi nel caso dinamico rispetto a quello statico; in particolare, per un certo tratto iniziale di spostamento la sua curva dinamica mantiene un andamento identico a quella statica, per poi aumentare la sua pendenza di un fattore pari a 1,5; il valore di spostamento in corrispondenza del quale la struttura inizia ad irrigidirsi è però variabile e tende ad aumentare all'aumentare dell'altezza di rilascio del grave, ossia della velocità di deformazione.

4.2.3.4-Confronti

Sulla base dei confronti effettuati si può affermare che sia la struttura SPIN che la Lathel mostrano il comportamento previsto, ossia, quando sottoposte a deformazioni dinamiche, si irrigidiscono rispetto al caso statico. In particolare, relativamente all'altezza di rilascio di 50mm la struttura Lathel presenta un coefficiente moltiplicativo pari ad 1,3; questo significa che moltiplicandone la curva statica per tale valore è possibile ottenere, relativamente a quella velocità di deformazione, la curva dinamica. Per quanto riguarda invece la struttura SPIN si è visto come in dinamica essa mostri una rigidezza 1,5 volte superiore rispetto al caso statico, ma solo a partire da un certo valore di deformazione in poi. In particolare, per il primo tratto di spostamento la curva dinamica segue quella statica, mentre arrivati ad un dato valore di deformazione la curva dinamica inizia a manifestare un aumento di rigidezza; lo spostamento in corrispondenza del quale essa inizia ad irrigidirsi è tanto maggiore, quanto più alta è l'altezza di rilascio del grave e quindi quanto maggiore è la velocità di deformazione della struttura.

Infine, per quanto riguarda la struttura Helical, essa non presenta alcun irrigidimento in seguito all'applicazione delle deformazioni in maniera dinamica rispetto al caso statico e questo è dovuto alla geometria di cui è costituita.

4.3-Analisi agli elementi finiti

In questo paragrafo vengono valutati i risultati ottenuti dalle analisi agli elementi finiti, i quali saranno suddivisi in base alla struttura considerata; la prima struttura ad essere trattata sarà la g70 (secondo gruppo), dopodiché si passerà alle strutture Large, Medium e Small (primo gruppo), ed infine verranno analizzati i risultati ottenuti dalle analisi effettuate sul sistema Progressive Comfort. Delle strutture g70 e Large ne verranno innanzitutto mostrati i risultati dell'analisi di sensibilità della mesh, dopodiché ne verranno confrontate le curve Forza-Spostamento (F-S) ricavate dalle analisi agli elementi finiti, con le curve sperimentali ottenute dalle prove sperimentali statiche; le curve F-S in questione sono state ricavate graficando la reazione vincolare che si genera sulla superficie di compressione, nel momento in cui quest'ultima, a causa del suo spostamento imposto, va a deformare la struttura considerata.

In seguito, saranno mostrati i risultati delle stesse strutture ottenuti dalle simulazioni effettuate modificando il modulo di resistenza del materiale e di quest'ultimo ne verrà mostrato il valore necessario a cogliere il reale comportamento delle strutture.

Delle stesse strutture verrà anche valutato l'andamento delle tensioni interne, considerando quanto ottenuto dalle simulazioni; le tensioni che si sviluppano all'interno delle strutture verranno considerate fintanto che non viene superata la tensione di snervamento poiché, essendo state effettuate simulazioni lineari, non si è in grado di valutare il comportamento quando si trovano a lavorare in campo plastico o elastico non lineare.

Della struttura Large verranno mostrati anche i risultati ottenuti dall'analisi delle simmetrie e verranno dunque tratte delle conclusioni riguardo la possibilità di simulare solo alcune parti di struttura ed estenderne i risultati all'intero, in modo tale da ridurre l'onere computazionale delle analisi.

Le strutture Small e Medium, come spiegato in sezione 3.5.4.1, non sono state sottoposte alle stesse analisi effettuate sulle strutture Large e g70; essendo tali strutture molto simili alla Large ci si è limitati ad effettuare su di esse delle simulazioni in cui sono stati utilizzati gli stessi parametri identificati durante lo studio di

quest'ultima. Di tali strutture ne verranno dunque mostrati i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate utilizzando un modulo di resistenza del materiale pari a quello necessario a cogliere il reale comportamento della struttura Large; questo permetterà di capire se ci sia accordo tra i risultati delle prove effettuate sulle strutture del primo gruppo e se possano essere analizzate utilizzando gli stessi parametri.

Infine, una volta mostrati tutti i risultati relativi alle analisi realizzate sulle varie strutture, si passerà a considerare quelli ottenuti dalle simulazioni effettuate sul sistema Progressive Comfort, verificando che esse siano in grado di coglierne il reale comportamento; a tale scopo verrà confrontata la curva F-S ottenuta da tali analisi, con quella relativa alle prove sperimentali statiche effettuate sul sistema.

All'interno delle curve F-S che verranno illustrate, per questioni di privacy aziendale, non saranno indicate le reali forze misurate, bensì un loro valore normalizzato. Questa normalizzazione viene effettuata dividendo i valori di forza reali, per il valore massimo di forza raggiunto durante le prove sperimentali statiche; quest'ultimo coincide con il valore massimo di forza sviluppatosi durante i test effettuati sul Progressive Comfort.

4.3.1-Struttura g70

4.3.1.1-Risultati dell'analisi di sensibilità della mesh

In Figura 116 vengono mostrate le curve F-S ottenute simulando la struttura g70 attraverso un numero crescente di elementi Tet-4.

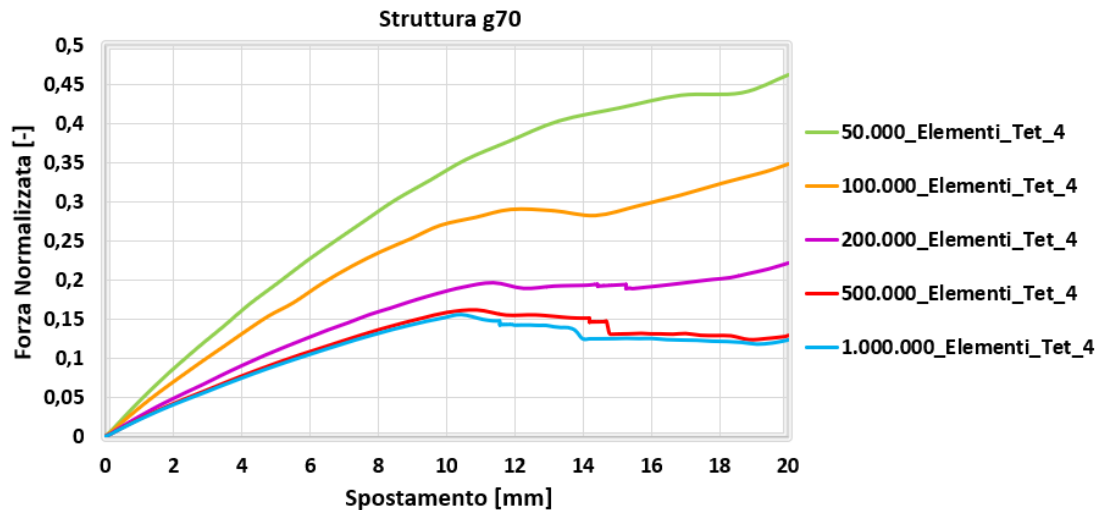


Figura 115-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-4 [2]

Si nota come, utilizzando elementi Tet-4, per arrivare a stabilizzare la curva ottenuta dall'analisi siano necessarie mesh molto dense; in particolare arrivando ad utilizzare 1.000.000 di elementi la curva sembra non essere ancora completamente stabilizzata.

In Figura 117 vengono invece mostrate le curve F-S ottenute simulando la struttura attraverso un numero crescente di elementi Tet-10; in questo caso, attraverso l'utilizzo di una mesh costituita da soli 50.000 elementi, la curva ottenuta risulta completamente stabilizzata, per lo meno nel tratto di interesse.

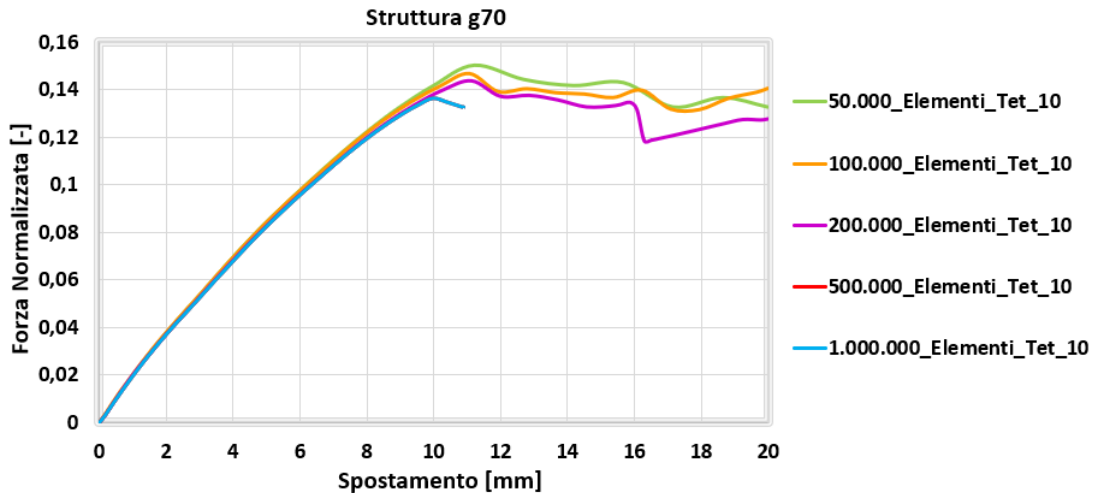


Figura 116-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-10 [2]

In Figura 118 vengono confrontate la curva stabilizzata ottenuta attraverso l'utilizzo di elementi Tet-10 con quella ottenuta utilizzando elementi Tet-4; da tale confronto emerge quanto ipotizzato precedentemente, ossia che la curva ottenuta utilizzando 1.000.000 elementi Tet-4 non risulta ancora completamente stabilizzata, al contrario di quanto accade a quella ottenuta attraverso 50.000 elementi Tet-10.

È dunque possibile affermare che per discretizzare la struttura g70 è conveniente utilizzare degli elementi Tet-10, poiché questi conferiscono alla simulazione un costo computazionale inferiore rispetto al caso in cui vengano utilizzati elementi Tet-4. Nello specifico, per l'analisi in cui sono stati utilizzati 1.000.000 elementi Tet-4 il tempo di calcolo necessario a completare la simulazione è risultato pari circa 86 ore, mentre per quella in cui sono stati utilizzati 50.000 elementi Tet-10 sono state sufficienti circa 6 ore; oltre ad ottenere curve maggiormente stabilizzate, l'utilizzo di elementi Tet-10 ha dunque permesso di ridurre il costo computazionale della simulazione del 93% rispetto al caso in cui sono stati utilizzati elementi Tet-4.

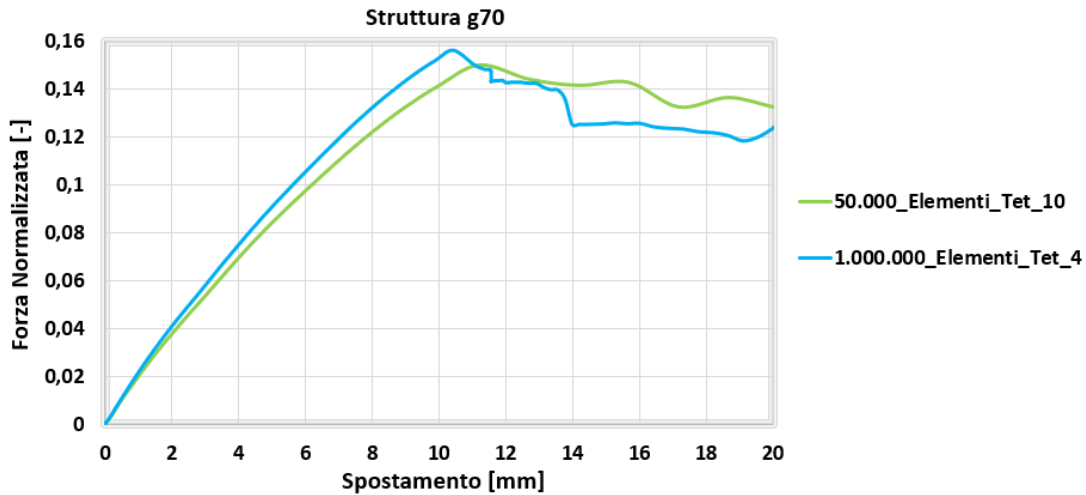


Figura 117-Confronto tra le curve F-S stabilizzate ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di elementi Tet-4 e Tet-10 [2]

4.3.1.2-Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e delle analisi FEM

Viene ora confrontata la curva F-S ottenuta dalle analisi FEM effettuate sulla struttura g70, con quella ottenuta dalle prove sperimentali statiche effettuate sulla stessa struttura (Figura 119). Per effettuare tale confronto vengono considerati i risultati delle analisi FEM relativi all'utilizzo di una mesh costituita da 50.000 elementi Tet-10, poiché si è visto come l'utilizzo di tale quantità e tipologia di elementi abbia permesso di ottenere delle curve stabilizzate; per quanto riguarda invece i risultati delle prove statiche vengono utilizzati gli stessi considerati in sezione 4.2.1.2.

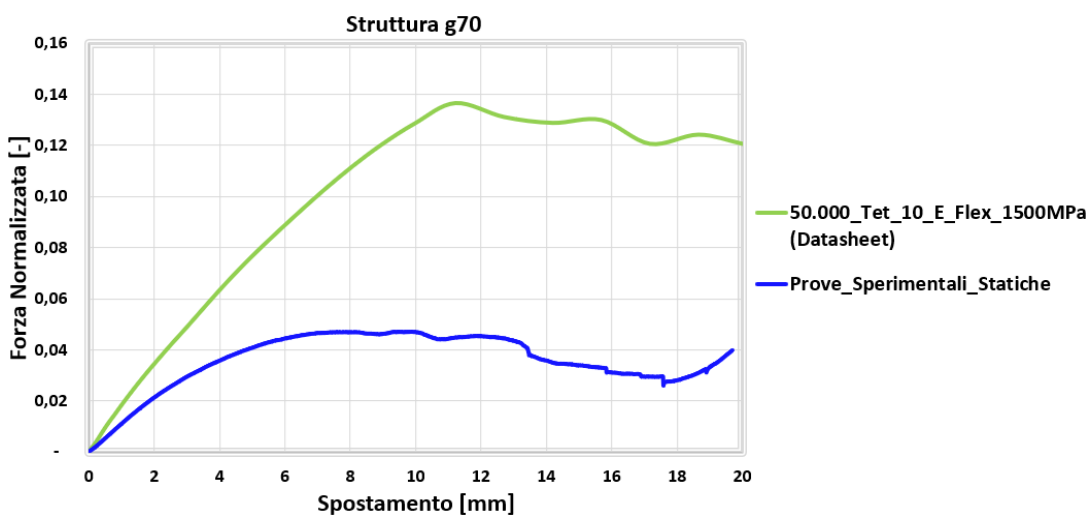


Figura 118-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali con quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza pari a quello riportato nel datasheet [2]

Si nota che i risultati ottenuti dalle prove sperimentali non risultano affatto congruenti con la realtà, ma questo era prevedibile data la complessità di analisi del materiale e della struttura considerata.

Allo scopo di cogliere il reale comportamento della struttura, come descritto in sezione 3.5.4.1, sono state effettuate più analisi, modificando di volta in volta il valore del modulo di resistenza del materiale rispetto a quello riportato all'interno del suo datasheet; queste analisi sono state ripetute fintanto da ottenere una curva F-S coincidente con quella derivante dalle prove sperimentali effettuate sulla struttura in questione.

In Figura 120 vengono mostrate le curve ottenute attraverso l'utilizzo dei vari valori del modulo di resistenza del materiale considerati; è utile ricordare che per la struttura g70 non si è partiti considerando il modulo di resistenza a compressione del materiale di cui è costituita, bensì quello a flessione, dato che gli elementi di cui è costituita si trovano sottoposti principalmente a tale sollecitazione.

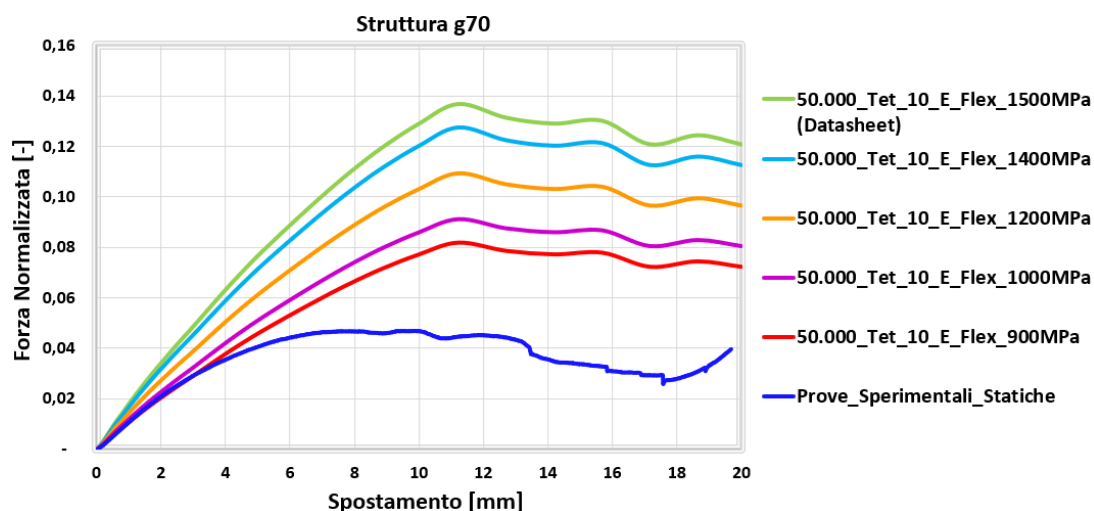


Figura 119-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali con quelle relative alle analisi FEM effettuate utilizzando differenti valori del modulo di resistenza del materiale [2]

Si nota come per poter cogliere il comportamento reale della struttura sia necessario assegnare al materiale un modulo di resistenza pari a 900MPa, che si discosta notevolmente dal valore riportato all'interno del suo datasheet; assegnando tale valore al modulo di resistenza del materiale si riesce però a cogliere in maniera precisa

il reale comportamento della struttura. In particolare, la curva ottenuta dall'analisi permette di cogliere ciò che succede nella realtà fino ad uno spostamento di circa 3,5mm. Questo può essere meglio osservato in Figura 121 dove vengono isolate la curva derivante dalle prove sperimentali statiche e quella relativa alle analisi FEM effettuate assegnando al materiale un modulo di resistenza pari a 900MPa; vengono considerati solamente i primi 10mm di spostamento in modo tale da osservare meglio il tratto in cui le due curve si sovrappongono.

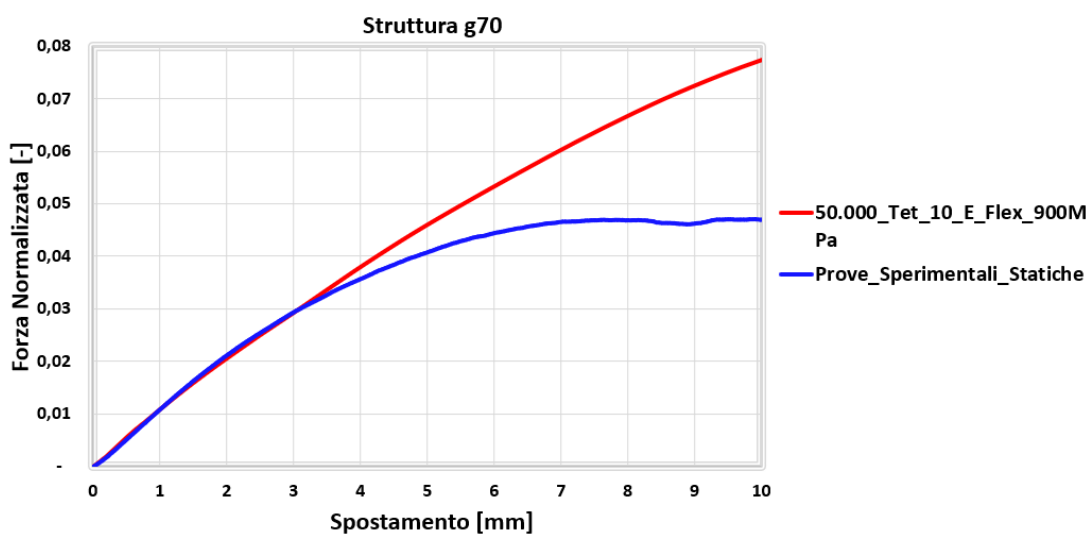


Figura 120-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali con quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 900MPa [2]

Il valore di spostamento in corrispondenza del quale le due curve iniziano a discostarsi, come verrà mostrato nella sezione successiva, coincide con l'inizio del superamento della tensione di snervamento all'interno di alcune zone della struttura; infatti, come abbondantemente descritto, sono state effettuate delle analisi lineari, che non permettono di cogliere il comportamento della struttura una volta che il materiale di cui è costituita non si trova più a lavorare in campo lineare elastico.

In ogni caso nella sezione successiva verranno effettuate osservazioni più dettagliate riguardo il superamento della tensione di snervamento all'interno della struttura.

4.3.1.3-Valutazione delle tensioni sviluppate

Viene ora valutato l'andamento ed il valore delle tensioni che si sviluppano all'interno della struttura quando sottoposta a deformazioni più o meno elevate; dato che sono state effettuate delle simulazioni lineari elastiche, queste valutazioni verranno effettuate fintanto che i valori di tensione misurati all'interno della struttura rimangono al di sotto della tensione di snervamento del materiale.

Il materiale di cui è costituita la struttura g70 se sollecitato lungo gli assi X e Y, ossia quelli posizionati sul piano di stampa, presenta una tensione di snervamento pari a 48MPa mentre se sollecitato lungo l'asse Z, ossia lungo la direzione di stampa, presenta uno snervamento pari a 42MPa; come valore della tensione di snervamento è stato dunque considerato quello inferiore tra i due ($\sigma_s = 42 \text{ Mpa}$).

In Figura 122 vengono mostrati i valori e gli andamenti delle tensioni che si sviluppano all'interno della struttura per diversi valori di deformazione imposta.

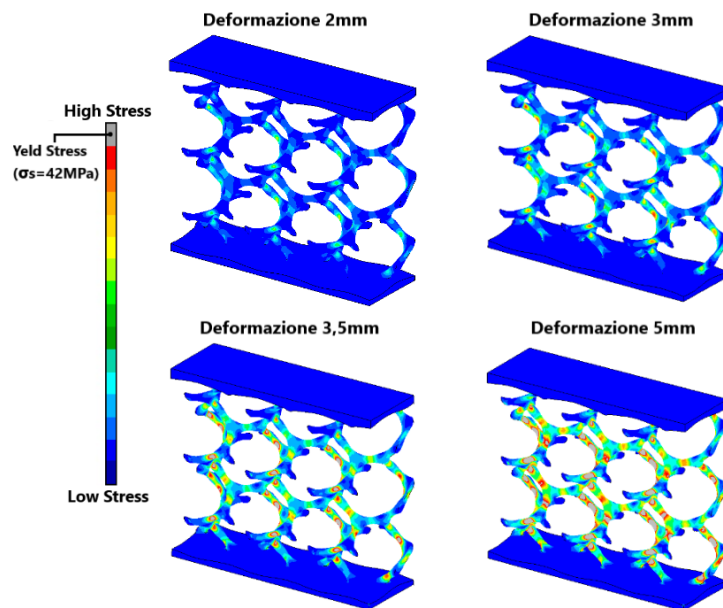


Figura 121-Andamento delle tensioni all'interno della struttura g70 per diversi valori di deformazione imposta [2]

Si nota come man mano che la deformazione imposta aumenta, aumentano anche i valori delle tensioni che si sviluppano all'interno della struttura. In particolare, in corrispondenza delle deformazioni pari a 2 e 3mm, le tensioni che si sviluppano

all'interno della struttura risultano inferiori a quella di snervamento del materiale, mentre arrivati in corrispondenza di uno spostamento pari a 3,5mm in alcune zone della struttura si inizia a superare tale valore di tensione; infine, in corrispondenza di una deformazione di 4mm la struttura ha superato la tensione di snervamento nella maggior parte del materiale di cui è costituita.

Il fatto che le prime zone della struttura a superare la tensione di snervamento si presentino in corrispondenza di una deformazione pari a 3,5mm conferma quanto osservato nella sezione precedente, ossia che le curve relative alla simulazione si discostano da quelle ricavate dalle prove sperimentali, in corrispondenza dell'inizio del superamento della tensione di snervamento all'interno della struttura.

In Figura 123 viene isolata una zona della struttura g70 e ne vengono rappresentate le tensioni che si sviluppano al suo interno in corrispondenza di una deformazione imposta pari a 5mm, in modo tale da effettuare delle considerazioni riguardo la distribuzione delle tensioni.

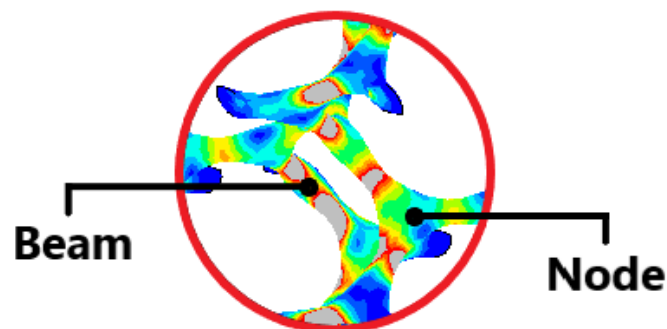


Figura 122-Andamento delle tensioni all'interno di una zona della struttura g70 [2]

Si nota come le zone maggiormente sollecitate siano quelle intermedie ai beam di cui è costituita la struttura; queste zone sono dunque le prime a superare la tensione di snervamento e questa informazione può risultare molto utile nel caso in cui si decida di ottimizzare la geometria della struttura.

4.3.2-Struttura Large

4.3.2.1-Risultati dell'analisi di sensibilità della mesh

Vengono ora valutati i risultati ottenuti dall'analisi di sensibilità della mesh effettuata sulla struttura Large; in Figura 124 vengono mostrate le curve F-S ottenute simulando la struttura attraverso un numero crescente di elementi Tet-4.

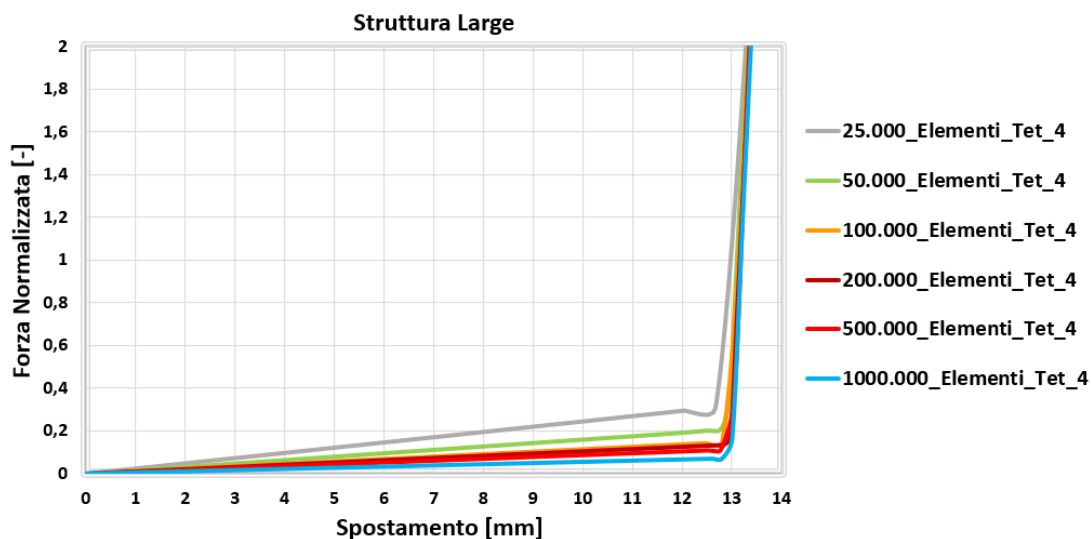


Figura 123-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-4 [2]

Si nota che le curve F-S ottenute simulando tale struttura, esattamente come mostrato dai risultati delle prove statiche, sono caratterizzate da due tratti caratteristici. Il primo tratto delle curve è quello in corrispondenza del quale le alette di cui è costituita la struttura si trovano effettivamente a lavorare, mentre il secondo tratto corrisponde all'arrivo a pacco del sistema, che provoca dunque un aumento improvviso della forza misurata.

Nonostante durante l'analisi la struttura Large sia stata sottoposta a delle deformazioni pari a 20mm, in Figura 124 vengono rappresentate le curve ottenute fino ad uno spostamento pari 14mm, al quale corrisponde una forza normalizzata pari a 2; infatti, dato che la struttura arriva a pacco in corrispondenza di circa 12,8mm di spostamento, valutare l'andamento della curva da tale valore di deformazione in poi non risulta di alcun interesse.

Di maggior interesse risulta invece valutare l'andamento del tratto iniziale delle varie curve; a tale scopo, in Figura 125, sono mostrate le stesse curve di cui ne vengono però isolati i tratti iniziali di ciascuna, in modo tale da notare meglio quanto ottenuto dall'analisi di sensibilità della mesh.

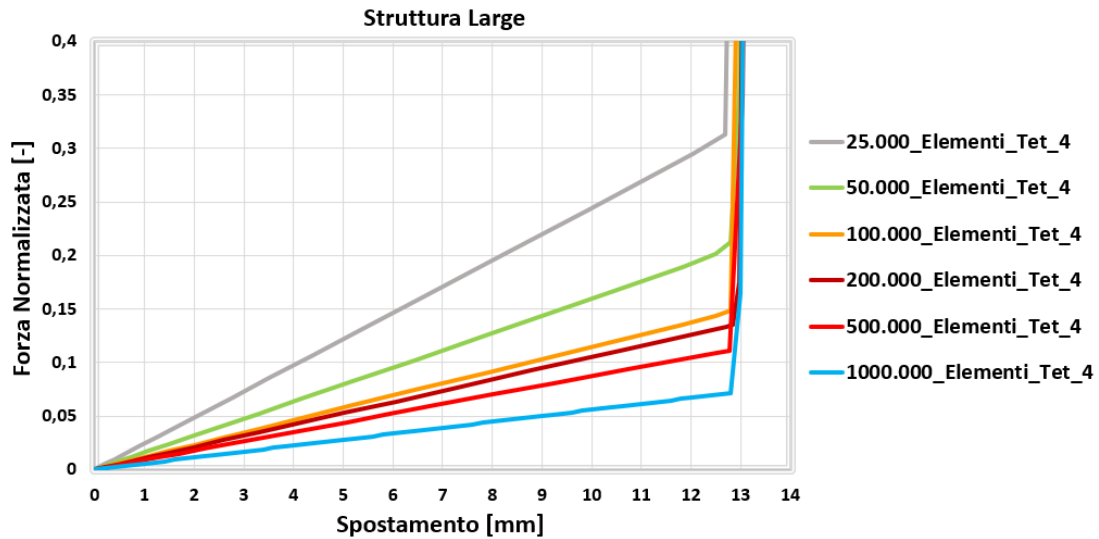


Figura 124-Primo tratto delle curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-4 [2]

Si nota come, utilizzando elementi Tet-4, per arrivare a stabilizzare la curva ottenuta dall'analisi siano necessarie mesh molto dense; in particolare arrivando ad utilizzare 1.000.000 di elementi la curva sembra non essere ancora completamente stabilizzata.

In Figura 126 vengono invece mostrate le curve F-S ottenute simulando la struttura attraverso un numero crescente di elementi Tet-10; anche in questo caso ci si limita a mostrare quanto ottenuto fino ad un valore di spostamento pari a 14mm.

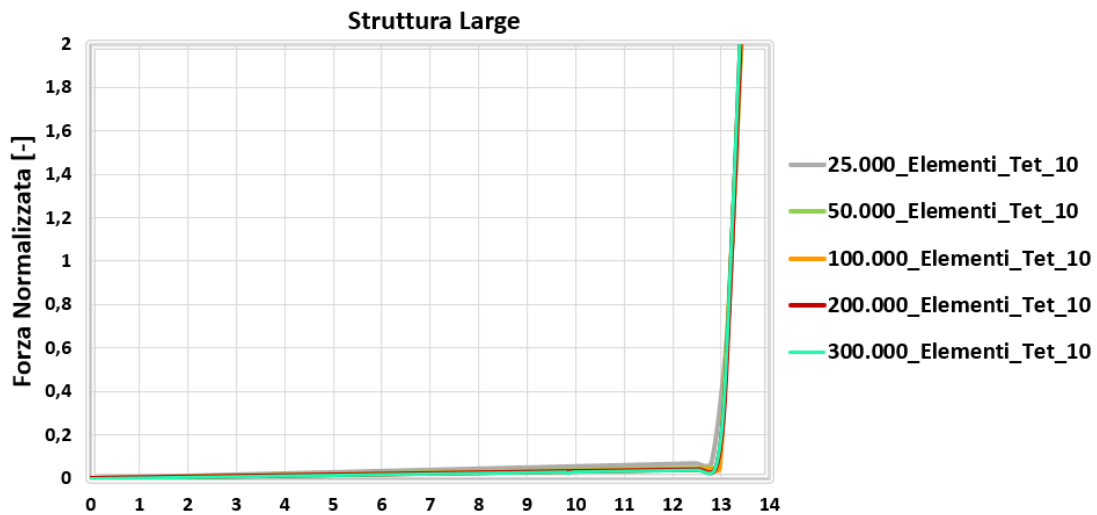


Figura 125-Curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-10 [2]

In Figura 127 vengono riportate le curve appena mostrate, di cui ne vengono però isolati i tratti iniziali di ciascuna, in modo tale da notare meglio quanto ottenuto dall'analisi di sensibilità della mesh; si osserva che attraverso l'utilizzo di una mesh costituita da 200.000 elementi Tet-10, la curva ottenuta risulta completamente stabilizzata.

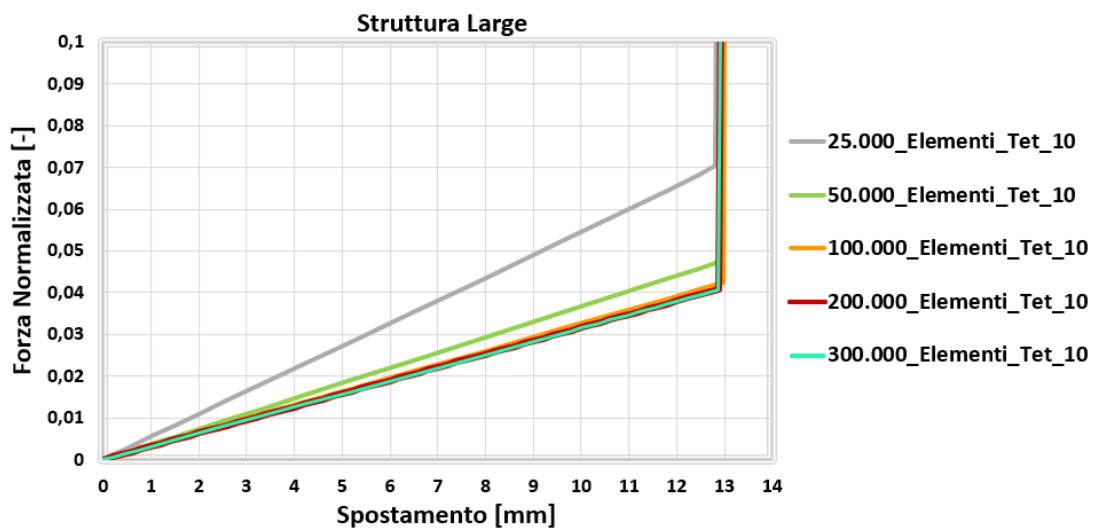


Figura 126-Primo tratto delle curve F-S ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di un numero crescente di elementi Tet-10 [2]

In Figura 128 vengono ora confrontate la curva stabilizzata ottenuta attraverso l'utilizzo di elementi Tet-10 con quella ottenuta utilizzando elementi Tet-4; da tale

confronto emerge quanto ipotizzato precedentemente, ossia che la curva ottenuta utilizzando 1.000.000 elementi Tet-4 non risulta ancora completamente stabilizzata, al contrario di quanto accade a quella ottenuta attraverso 200.000 elementi Tet-10.

È dunque possibile affermare che per discretizzare la struttura Large è conveniente utilizzare degli elementi Tet-10, poiché questi conferiscono alla simulazione un costo computazionale inferiore rispetto al caso in cui vengano utilizzati elementi Tet-4. Nello specifico, per l'analisi in cui sono stati utilizzati 1.000.000 elementi Tet-4 il tempo di calcolo necessario a completare la simulazione è risultato pari circa 70 ore, mentre per quella in cui sono stati utilizzati 200.000 elementi Tet-10 sono state sufficienti 10 ore; oltre ad ottenere curve maggiormente stabilizzate, l'utilizzo di elementi Tet-10 ha dunque permesso di ridurre il costo computazionale della simulazione di circa il 86% rispetto al caso in cui sono stati utilizzati elementi Tet-4.

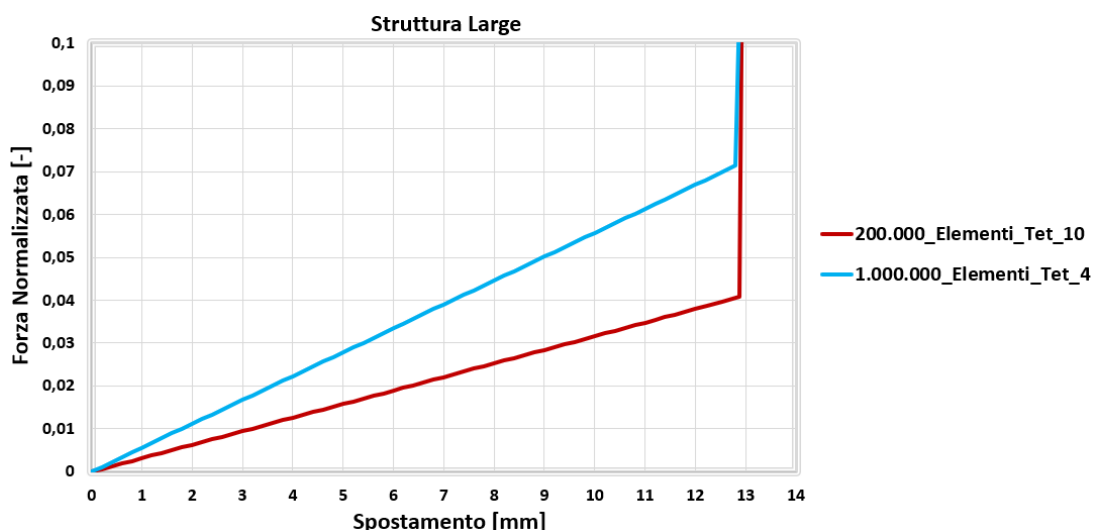


Figura 127-Confronto tra le curve F-S stabilizzate ottenute dalle analisi effettuate attraverso l'utilizzo di elementi Tet-4 e Tet-10 [2]

4.3.2.2-Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e delle analisi FEM

Viene ora confrontata la curva F-S ottenuta dalle analisi FEM effettuate sulla struttura Large, con quella ottenuta dalle prove sperimentali statiche effettuate sulla stessa struttura (Figura 129). Per effettuare tale confronto vengono considerati i risultati delle analisi FEM relativi all'utilizzo di una mesh costituita da 200.000 elementi Tet-10, poiché si è visto come l'utilizzo di tale quantità e tipologia di elementi abbia

permesso di ottenere delle curve stabilizzate; per quanto riguarda invece i risultati delle prove statiche vengono utilizzati gli stessi considerati in sezione 4.2.1.1.

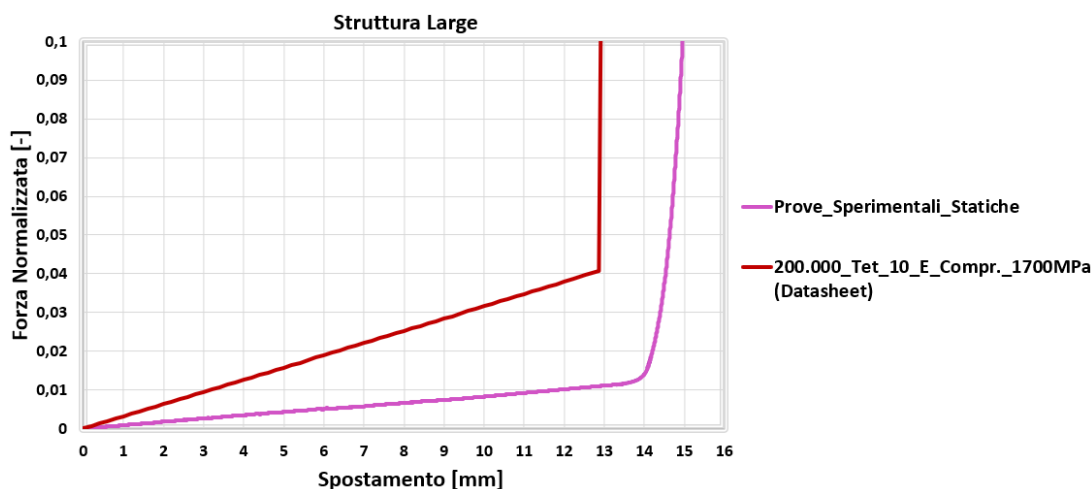


Figura 128-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza pari a quello riportato nel datasheet [2]

Si nota che i risultati ottenuti dalle prove sperimentali non risultano affatto congruenti con la realtà, ma questo era prevedibile data la complessità di analisi del materiale e della struttura considerata.

Allo scopo di cogliere il reale comportamento della struttura, come descritto in sezione 3.5.4.1, sono state effettuate più analisi, modificando di volta in volta il valore del modulo di resistenza del materiale rispetto a quello riportato all'interno del suo datasheet; queste analisi sono state ripetute fintanto da ottenere una curva F-S coincidente con quella derivante dalle prove sperimentali effettuate sulla struttura in questione. In Figura 130 vengono mostrate le curve ottenute attraverso l'utilizzo dei vari valori del modulo di resistenza del materiale considerati; è utile ricordare che per la struttura Large si è partiti considerando il modulo di resistenza a compressione poiché all'interno del datasheet non ne viene indicato quello a flessione.

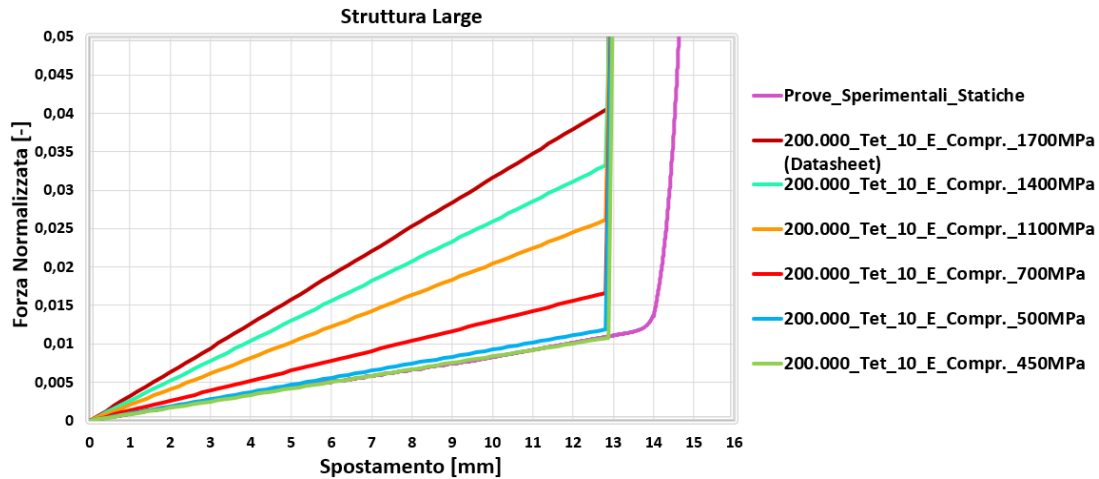


Figura 129-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quelle relative alle analisi FEM effettuate utilizzando differenti valori del modulo di resistenza del materiale [2]

Si nota come per poter cogliere il comportamento reale della struttura sia necessario assegnare al materiale un modulo di resistenza pari a 450MPa che si discosta notevolmente dal valore riportato all'interno del suo datasheet; questo può essere osservato meglio in Figura 131 dove vengono isolate la curva derivante dalle prove sperimentali statiche e quella relativa all'analisi FEM attraverso cui né è stato colto il comportamento.

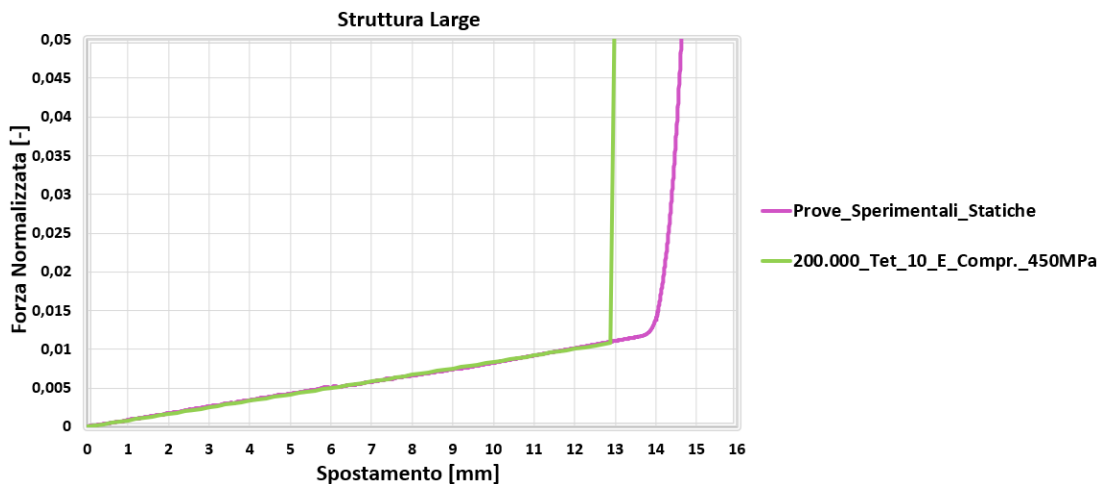


Figura 130-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 450MPa [2]

Nonostante differisca notevolmente da quanto riportato nel suo datasheet, assegnando un valore di 450MPa al modulo di resistenza del materiale si riesce a

cogliere in maniera precisa il reale comportamento della struttura; infatti, i risultati delle prove sperimentali si discostano da quelli delle simulazioni solamente in corrispondenza del tratto di curva in cui viene rappresentato un valore di spostamento prossimo a quello che coincide con l'arrivo a pacco della struttura. Questo non è un errore di analisi ma un'incongruenza dovuta al processo di stampa utilizzato; infatti, considerando i provini stampati relativi alla struttura Large e misurandone le dimensioni degli elementi atti a garantirne il fine corsa, si nota come essi presentino delle dimensioni leggermente inferiori rispetto a quanto riportato all'interno del loro modello tridimensionale. In Figura 132 viene mostrata la differenza che intercorre tra l'altezza di tali elementi nel caso in cui essi risultino stampati rispetto a quello in cui se ne consideri il modello tridimensionale.

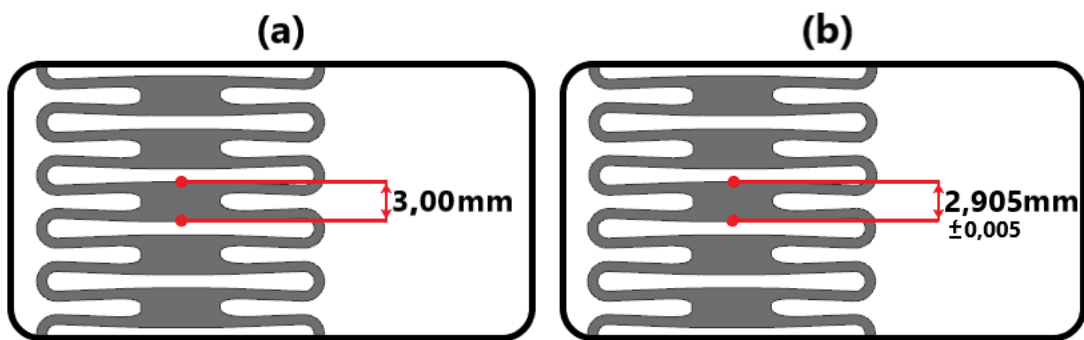


Figura 131-Confronto tra le altezze degli elementi atti a garantire il fine corsa della struttura relativi al modello tridimensionale (a) ed al provino stampato (b) [2]

Si nota come la differenza di altezza tra un elemento reale ed uno stampato sia compresa tra gli 0,09 e gli 0,10mm e questo, considerando che la struttura è costituita da 13 elementi, porta un ad una variazione del fine corsa pari a circa 1,2mm. Ecco spiegato il motivo per cui durante l'analisi FEM il fine corsa della struttura si verifichi in corrispondenza di spostamenti inferiori; infatti, sottraendo al valore di spostamento reale in corrispondenza del quale la struttura arriva a pacco (circa 14mm), la differenza totale di altezza degli elementi tra modello e struttura reale (circa 1,2mm), si ottiene il valore di spostamento in corrispondenza del quale il modello tridimensionale della struttura arriva al suo fine corsa (circa 12,8mm).

Da queste considerazioni si evince che il processo di stampa utilizzato per realizzare tali strutture (Multi Jet Fusion- HP-4200) non permette di realizzare tolleranze particolarmente strette proprio come indicato in sezione 2.2.3.2.

Infine, il fatto che la curva ottenuta dall'analisi permetta di cogliere il reale comportamento della struttura per tutta la durata del primo tratto della curva, significa che le alette di cui è costituita non superano mai al loro interno la tensione di snervamento; in ogni caso considerazioni più approfondite riguardo le tensioni sviluppate all'interno della struttura verranno effettuate nella sezione successiva.

4.3.2.3-Valutazione delle tensioni sviluppate

Viene ora valutato l'andamento ed il valore delle tensioni che si sviluppano all'interno della struttura quando sottoposta a deformazioni più o meno elevate; dato che sono state effettuate delle simulazioni lineari elastiche, queste valutazioni verranno effettuate fintanto che i valori di tensione misurati all'interno della struttura rimangono al di sotto della tensione di snervamento. Il materiale di cui è costituita la struttura Large, indipendentemente dall'asse lungo cui viene sollecitato, presenta una tensione di snervamento pari a 48MPa. In Figura 133 vengono mostrati i valori e gli andamenti delle tensioni che si sviluppano all'interno della struttura per una deformazione imposta pari a 14mm; si ricorda che in corrispondenza di tale spostamento il modello tridimensionale di tale struttura risulta completamente a pacco.

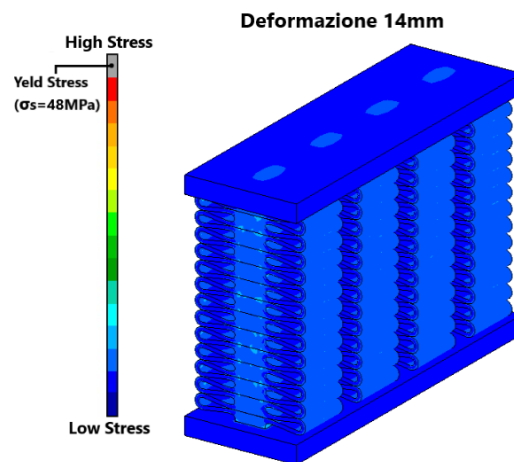


Figura 132-Andamento delle tensioni all'interno della struttura Large [2]

Nell'immagine appena mostrata è stato posto come fondo scala il valore della tensione di snervamento del materiale di cui è costituita la struttura; si evince dunque che la struttura, anche per valori di spostamento in corrispondenza dei quali risulta più sollecitata, non sviluppa al suo interno delle tensioni considerevoli. Questo conferma quanto dedotto dall'analisi dei risultati delle prove statiche e dinamiche, ossia che tale struttura arriva molto facilmente al suo fine corsa, senza che le alette di cui è costituita effettuino effetti smorzanti considerevoli; ciò le rende inadatte ad assolvere alla funzione cui sono dedicate, a meno che su di esse vengano apportate modifiche sostanziali.

Allo scopo di osservare meglio quello che è l'andamento delle tensioni all'interno della struttura ne vengono rappresentate, in Figura 134, le tensioni relative a varie deformazioni imposte; in questo caso viene assegnato al fondo scala una tensione pari a 7MPa, in modo tale da evidenziare meglio le zone più sollecitate.

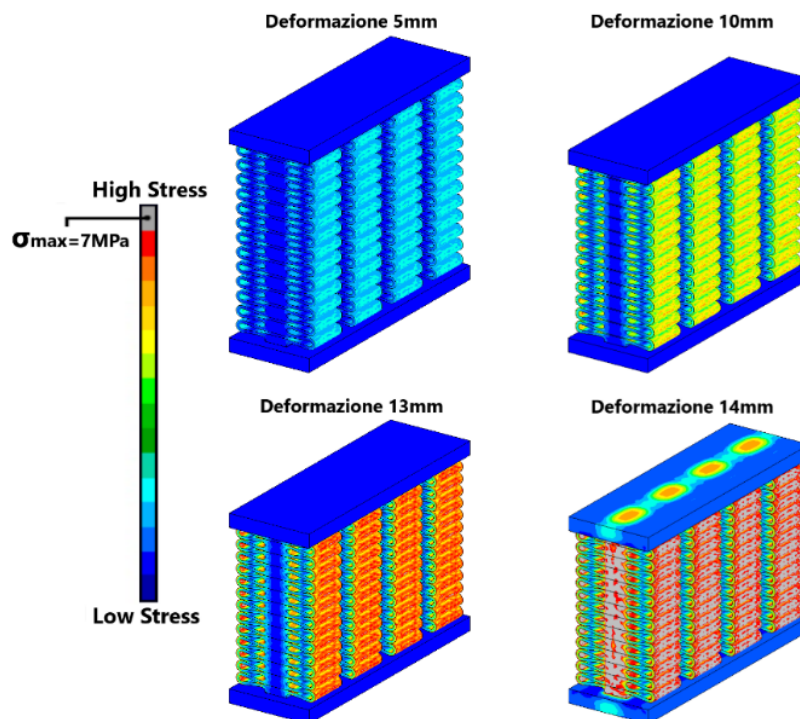


Figura 133-Andamento delle tensioni all'interno della struttura Large per diversi valori di deformazione imposta [2]

Si nota come man mano che la deformazione imposta cresce, crescono anche i valori delle tensioni interne alla struttura. In particolare, fino ad una deformazione pari a

13mm le tensioni maggiori si generano in corrispondenza delle alette di cui è costituita la struttura; invece, arrivati ad uno spostamento pari a 14mm, in corrispondenza del quale la struttura risulta ormai completamente a pacco, si manifestano tensioni considerevoli anche in corrispondenza degli elementi atti a garantire il fine corsa della struttura. In Figura 135 viene isolato un singolo elemento della struttura Large in modo tale da effettuare delle considerazioni più dettagliate riguardo la distribuzione delle tensioni all'interno di essi; ne vengono rappresentate le tensioni che si sviluppano al suo interno in corrispondenza di una deformazione imposta pari a 13mm, utilizzando un fondo scala pari a 7MPa.

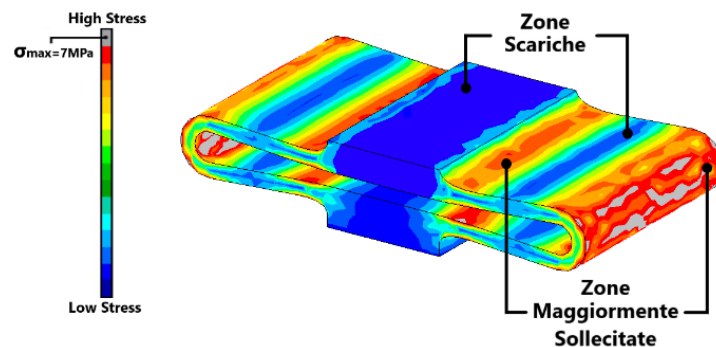


Figura 134-Andamento delle tensioni all'interno di un elemento della struttura Large [2]

Si nota come le zone dell'elemento maggiormente sollecitate sono quelle poste alle estremità delle alette di cui è costituito e quelle in cui avviene la giunzione tra quest'ultime e l'elemento atto a garantire il fine corsa della struttura; le zone intermedie delle alette risultano invece scariche. Queste informazioni possono risultare utili nel caso in cui si decida di ottimizzare la geometria della struttura, anche perché, come si è visto, allo stato attuale non fornisce una performance all'altezza.

4.3.2.4-Analisi delle simmetrie

Viene ora analizzato quanto ottenuto dalle analisi effettuate sulle quattro configurazioni simmetriche relative alla struttura Large. A tale scopo in Figura 136 vengono rappresentate le curve F-S ottenute simulando le varie configurazioni che vengono mostrate in Figura 137; tali curve vengono confrontate con i risultati ottenuti dall'analisi effettuata sulla struttura Large intera, ed è opportuno sottolineare che per

simulare quest'ultima, così come per le varie configurazioni simmetriche, è stato assegnato al materiale il modulo di resistenza riportato nel suo datasheet.

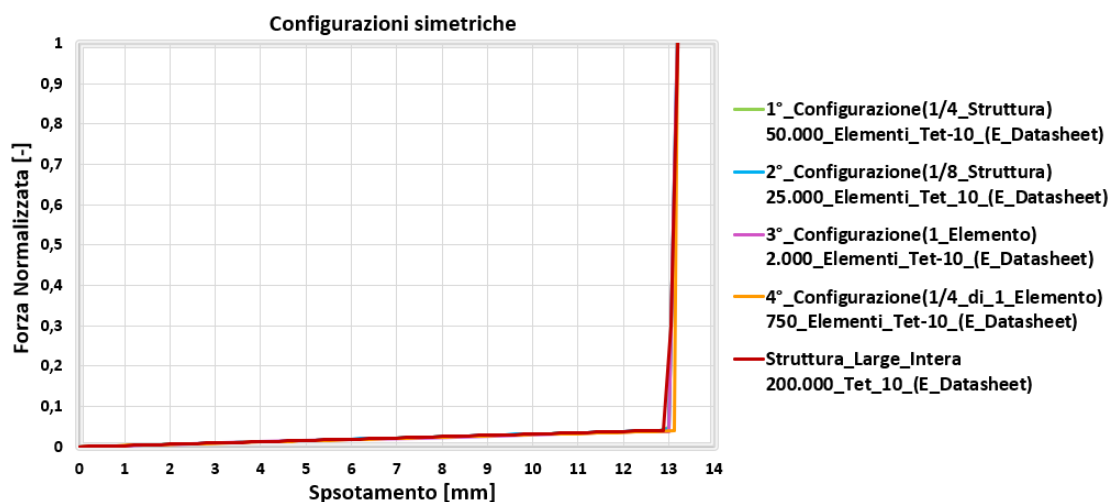


Figura 135-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle analisi effettuate sulla struttura Large intera e quelle ottenute dall'analisi delle sue configurazioni simmetriche [2]

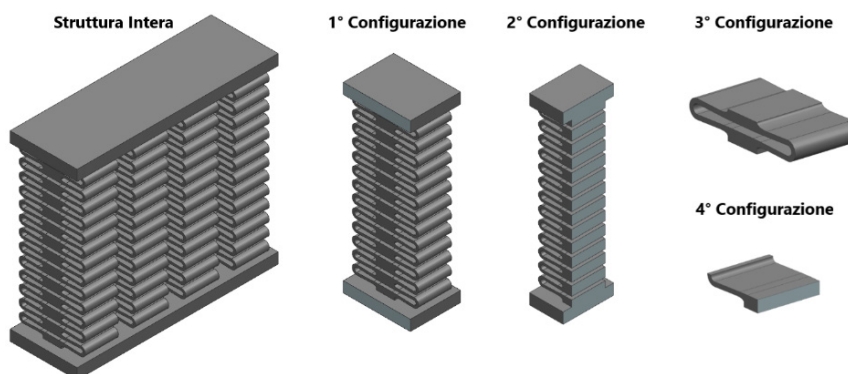


Figura 136-Struttura Large e sue configurazioni simmetriche [2]

Ovviamente, per poter confrontare i risultati ottenuti dall'analisi della struttura intera con quelli derivanti dalle analisi effettuate sulle varie configurazioni simmetriche, è stato necessario riportare all'intera struttura i valori di forza e spostamento ottenuti dall'analisi di quest'ultime; per fare questo la struttura Large è stata considerata come costituita da tante molle, quanti sono gli elementi di cui è costituita. Di conseguenza gli elementi disposti lungo una delle quattro colonne di cui è composta la struttura si comportano come 13 molle in serie, mentre le quattro

colonne come fossero delle molle in parallelo. Per riportare dunque all'intero i risultati ottenuti dall'analisi di ciascuna configurazione sono stati effettuati i seguenti calcoli:

- **1° configurazione (1 colonna):** essendo l'intera struttura costituita da quattro colonne poste in parallelo, per riportare all'intero i risultati ottenuti dall'analisi effettuata su tale configurazione è stato sufficiente moltiplicare i valori di forza ottenuti, per il numero di colonne presenti all'interno della struttura (4).

$$F_{struttura} = F_{colonna} * 4 \quad (Eq. 10)$$

$$S_{struttura} = S_{colonna} \quad (Eq. 11)$$

- **2° configurazione (1/2 colonna):** essendo l'intera struttura costituita da otto "mezze colonne" poste in parallelo, per riportare all'intero i risultati ottenuti dall'analisi effettuata su tale configurazione è stato sufficiente moltiplicare i valori di forza ottenuti, per il numero di "mezze colonne" presenti all'interno della struttura (8).

$$F_{struttura} = F_{colonna} * 8 \quad (Eq. 12)$$

$$S_{struttura} = S_{colonna} \quad (Eq. 13)$$

- **3° configurazione (1 elemento):** essendo ogni colonna composta da 13 elementi posti in serie e l'intera struttura da quattro colonne poste in parallelo, per riportare i risultati all'intero è stato sufficiente moltiplicare i valori di forza ottenuti, per il numero di colonne presenti (4), ed i valori dello spostamento per il numero di elementi di cui è costituita ciascuna colonna (13).

$$F_{struttura} = F_{colonna} * 4 = F_{elemento} * 4 \quad (Eq. 14)$$

$$S_{struttura} = S_{colonna} = S_{elemento} * 13 \quad (Eq. 15)$$

- **4° configurazione (1/4 di 1 elemento):** per riportare i risultati di tale configurazione all'intero è stato sufficiente moltiplicare i valori di forza

ottenuti, per il numero totale di colonne, ed i valori dello spostamento per il numero di “mezzi elementi” presenti all’interno di ciascuna colonna (26).

$$F_{struttura} = F_{colonna} * 4 = F_{elemento} * 4 = F_{1/4_{elemento}} * 8 \quad (Eq. 16)$$

$$S_{struttura} = S_{colonna} = S_{elemento} * 13 = S_{1/4_{elemento}} * 26 \quad (Eq. 17)$$

Allo scopo di analizzare meglio le curve ottenute dall’analisi delle varie configurazioni, in Figura 138 ne vengono isolati i tratti iniziali di ciascuna.

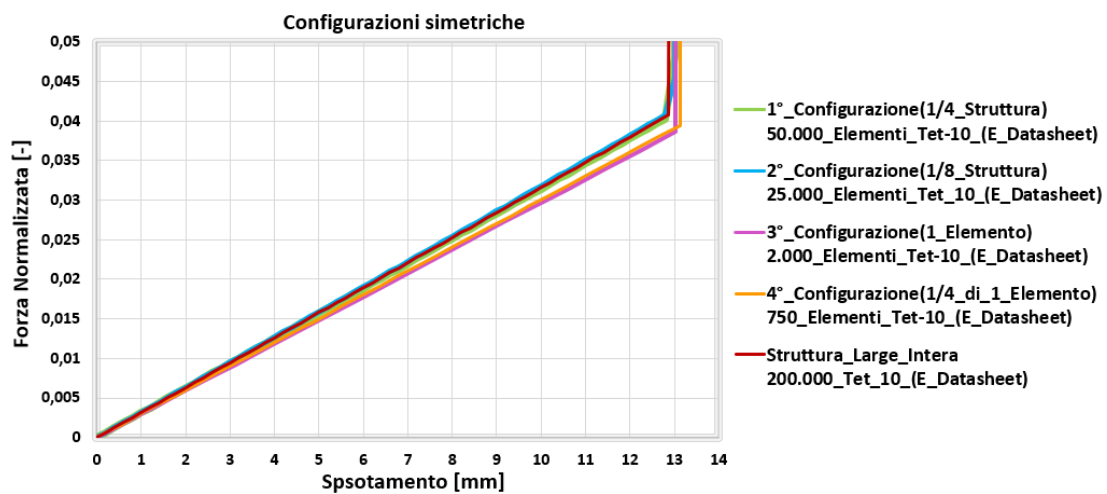


Figura 137-Confronto tra il primo tratto della curva F-S ottenuta dalle analisi effettuate sulla struttura Large intera e quello relativo alle curve ottenute dall’analisi delle sue configurazioni simmetriche [2]

Si nota una certa congruenza tra i risultati ottenuti dall’analisi delle varie configurazioni e quelli relativi alla struttura intera; è dunque possibile affermare che, allo scopo di simulare la struttura Large, è possibile analizzarne una delle configurazioni simmetriche, ed estenderne solo in seguito i risultati ottenuti all’intero, con conseguente riduzione del costo computazionale dell’analisi. Per simulare la struttura intera sono stati utilizzati il numero e la tipologia di elementi identificati nella precedente analisi di sensibilità della mesh, mentre per le configurazioni simmetriche si è utilizzato un numero di elementi inferiore in base alla riduzione strutturale effettuata. Dato che per analizzare la struttura intera sono stati utilizzati 200.000 elementi tet-10, di conseguenza per simulare la prima (1/4 struttura) e la seconda (1/8 di struttura) configurazione, ne sono stati utilizzati rispettivamente 50.000 e 25.000.

Essendo ciascuna colonna (1/4 struttura) composta da 13 elementi, per simulare un singolo elemento sono stati utilizzati 3.000 elementi (25.000/13), mentre per analizzare 1/4 di esso solamente 750 elementi. Ovviamente, la riduzione del numero di elementi utilizzati tra una configurazione e l'altra, ha portato anche ad una riduzione dei tempi di calcolo necessari a svolgere le analisi; in particolare, la differenza maggiore la si riscontra tra l'analisi della struttura intera, in cui sono state necessarie 10 ore e quella effettuata su di 1/4 di un elemento in cui sono stati necessari 5 minuti portando ad una riduzione del costo computazionale superiore al 99%. In Figura 139 vengono riportati il numero di elementi ed i tempi di calcolo relativi all'analisi effettuata su ciascuna configurazione; ovviamente, tanto più la struttura intera viene ridotta, tanto più i tempi di analisi si riducono.

	Numero di Elementi (Tet-10)	Tempo di Calcolo
Struttura Intera	200.000	10 Ore
1° Configurazione (1/4 di Struttura)	50.000	3 Ore
2° Configurazione (1/8 di Struttura)	25.000	1 Ora
3° Configurazione (1 Elemento)	3.000	10 Minuti
4° Configurazione (1/4 di 1 Elemento)	750	5 Minuti

Figura 138-Numero di elementi e tempi di calcolo relativi alle analisi effettuate sulle varie configurazioni [2]

4.3.3-Strutture Medium e Small

Vengono ora valutati i risultati ottenuti dalle analisi effettuate sulle strutture Small e Medium. Quest'ultime non sono state sottoposte alle stesse simulazioni effettuate sulle altre strutture poiché, essendo molto simili alla Large, ci si è limitati a sottoporle a delle analisi in cui sono stati utilizzati gli stessi parametri identificati durante lo studio di quest'ultima. In particolare, per analizzarle è stato considerato un valore del modulo di resistenza del materiale pari a quello necessario a cogliere il reale comportamento della struttura Large identificato in precedenza, ossia di 450MPa.

In Figura 140 viene mostrata la curva F-S ottenuta dall'analisi agli elementi finiti effettuata sulla struttura Medium, la quale viene confrontata con quella derivante

dalle prove sperimentali statiche effettuate sulla stessa; in Figura 141 viene invece mostrato quanto ottenuto relativamente alla struttura Small. In entrambi i grafici viene considerato solamente il primo tratto della curva ottenuta, ossia quello in corrispondenza del quale le alette di cui sono costituite le strutture si trovano effettivamente a lavorare; infatti, il tratto di curva che coincide con l'arrivo a pacco delle strutture non risulta di alcun interesse.

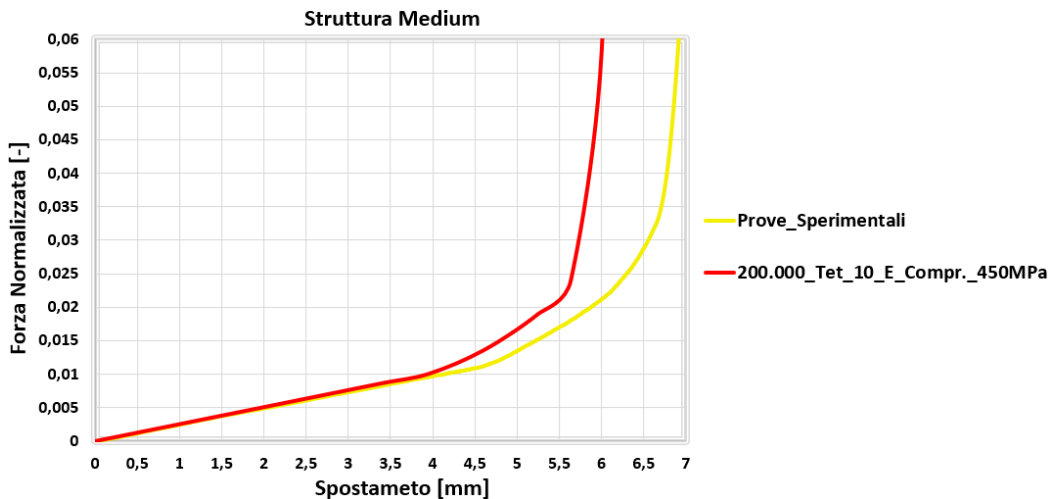


Figura 139-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 450MPa [2]

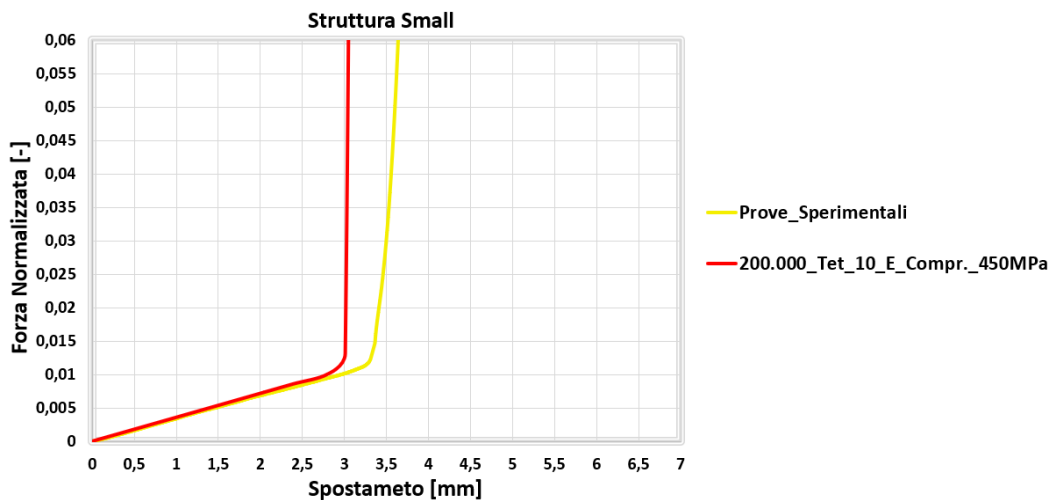


Figura 140-Confronto tra la curva F-S ottenuta dalle prove sperimentali e quella relativa all'analisi FEM effettuata utilizzando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 450MPa [2]

Si nota come per le due strutture considerate, così come avveniva per la Large, utilizzando un modulo di resistenza pari a 450MPa si riesce a coglierne il

comportamento reale. L'unica incongruenza tra le curve ottenute dalle analisi FEM e quelle derivanti dalle prove sperimentali, si verifica in corrispondenza del tratto di curva per cui si ha uno spostamento prossimo a quello che coincide con l'arrivo a pacco della struttura; il valore assunto da tale spostamento differisce per ciascuna delle tre strutture considerate (Small, Medium, Large), poiché possiedono un numero di elementi smorzanti differente. Così come avveniva per la struttura Large, anche in questo caso l'incongruenza tra i risultati delle analisi e quelli delle prove sperimentali non rappresenta un errore di analisi, ma è dovuta al processo di stampa utilizzato; infatti, anche per le strutture Small e Medium si è notato come gli elementi atti a garantire il fine corsa dei provini stampati, presentino delle dimensioni leggermente inferiori rispetto a quanto riportato all'interno del loro modello tridimensionale. I valori di tale differenza sono gli stessi riscontrati per la struttura Large, i quali sono stati mostrati in Figura 132. Il fatto che la struttura Small possieda solamente tre elementi smorzanti e dunque tre elementi atti a garantirne il fine corsa, fa sì che lo spostamento per cui il modello tridimensionale arriva a pacco differisca di circa 0,3mm rispetto a quello del provino stampato (0,01mmx3) proprio come si osserva in Figura 141; al contrario, la struttura Medium possiede sei elementi smorzanti e dunque sei elementi atti a garantirne il fine corsa, ed infatti, la differenza tra gli spostamenti per cui il modello tridimensionale ed il provino arrivano a pacco risulta pari a circa 0,6mm (0,01mmx6).

In definitiva è possibile affermare che per simulare le strutture Small e Medium e coglierne il reale comportamento, è possibile assegnare al materiale lo stesso valore di rigidità identificato durante lo studio della struttura Large (450MPa), ed utilizzare lo stesso numero e tipologia di elementi per discretizzarla (200.000 Elementi Tet-10).

4.3.4-Sistema Progressive Comfort

Vengono ora analizzati i risultati ottenuti dall'analisi del sistema Progressive Comfort. È utile ricordare che, essendo tale sistema doppiamente simmetrico, se ne è considerato solamente un 1/4; in seguito, per riportare i risultati ottenuti all'intero sistema è stato sufficiente moltiplicare i valori di forza ottenuti per 4.

$$F_{sistema} = F_{1/4_sistema} * 4 \quad (Eq. 18)$$

$$S_{sistema} = S_{1/4_sistema} \quad (Eq. 19)$$

In Figura 142 vengono mostrate le curve F-S ottenute da tale analisi, le quali vengono confrontate con i risultati ottenuti dalle prove sperimentali statiche effettuate sullo stesso sistema.

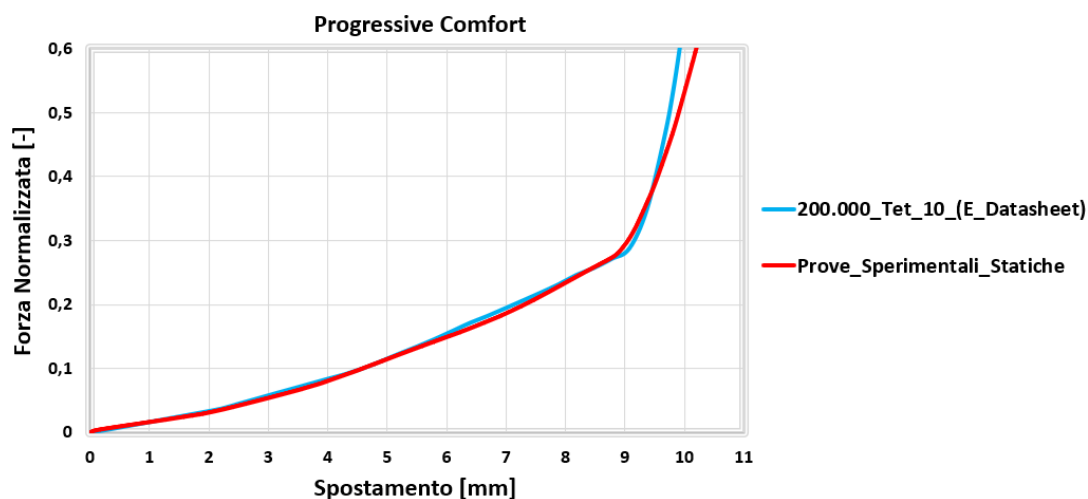


Figura 141-Confronto tra le curve F-S ottenute dalle prove sperimentali statiche e dall'analisi FEM [2]

Si nota come i risultati ottenuti dall'analisi siano perfettamente congruenti con quanto ricavato dalle prove sperimentali. Questo conferma come, per analizzare tale sistema, sia sufficiente considerarne una sua parte simmetrica e come esso si trovi a lavorare completamente in campo elastico indipendentemente dallo spostamento cui si trova sottoposto; infatti, se così non fosse, i risultati della simulazione lineare effettuata non avrebbero portato ad identificarne il reale comportamento. Per effettuare questa analisi sono stati utilizzati, allo scopo di discretizzare il sistema, 200.000 elementi Tet-10; è dunque possibile affermare come tale numero e tipologia di elementi sia sufficiente a simulare correttamente il sistema Progressive Comfort.

4.3.5-Confronti

Dai risultati ottenuti dall'analisi di sensibilità della mesh è emerso come, allo scopo di discretizzare tutte le strutture considerate, sia conveniente utilizzare degli elementi Tet-10 rispetto ad elementi Tet-4, poiché permettono di ottenere dei risultati

stabilizzati attraverso un numero molto inferiore di elementi; in particolare, sia nel caso delle strutture Small, Medium e Large (primo gruppo) che per la struttura g70 (secondo gruppo), l'utilizzo di elementi Tet-10 ha permesso di ridurre il tempo di analisi circa del 90% rispetto all'utilizzo di elementi Tet-4 e di ottenere addirittura dei risultati maggiormente stabilizzati. In particolare, per quanto riguarda la struttura g70, attraverso l'utilizzo di 1.000.000 di elementi Tet-4, sono state ottenute delle curve F-S non completamente stabilizzate, cosa che invece si è riusciti ad ottenere attraverso l'utilizzo di 50.000 elementi Tet-10, i quali hanno anche permesso di ridurre il tempo di calcolo dell'analisi del 93% ; anche per quanto riguarda le strutture del primo gruppo (Small, Medium, Large), attraverso l'utilizzo di 1.000.000 di elementi Tet-4, sono state ottenute delle curve non completamente stabilizzate, cosa che invece si è riusciti ad ottenere attraverso l'utilizzo di 200.000 elementi Tet-10, i quali hanno anche permesso di ridurre il tempo di calcolo dell'analisi del 86%.

Dalle analisi effettuate si è visto che, assegnando al materiale utilizzato il modulo di resistenza che appare nel suo datasheet, non si riesce a cogliere il reale comportamento delle strutture, neppure considerandone solamente valori di deformazione per cui esse si trovano a lavorare in campo elastico. Quello che si nota per tutte le strutture testate è che per arrivare a cogliere in maniera precisa il loro comportamento, per lo meno fintanto che esse si trovano a lavorare in campo elastico, è necessario assegnare al materiale un valore del modulo di resistenza inferiore rispetto a quello riportato nel suo datasheet. In particolare, per la struttura g70 si è partiti utilizzando un modulo di resistenza pari 1500MPa, che coincide con quello di resistenza a flessione riportato nel datasheet del materiale di cui essa è costituita, e per arrivare a coglierne il reale comportamento è stato necessario modificarlo fino a fargli assumere un valore pari 900MPa. Stessa cosa per quanto riguarda la struttura Large, dove si è partiti considerando un valore del modulo di resistenza del materiale pari a 1700MPa, che coincide con quello di resistenza a compressione, e per arrivare a coglierne il reale comportamento è stato necessario modificarlo fino a farli assumere un valore pari a 450MPa. Molto probabilmente nel caso di quest'ultima struttura è stato necessario modificare il valore del modulo di resistenza di una quantità

maggiore, poiché si è partiti considerandone il modulo di resistenza a compressione, in quanto quello a flessione non viene riportato all'interno del datasheet del materiale di cui sono costituite; infatti, il modulo di resistenza a flessione di questi materiali è generalmente inferiore rispetto a quello a compressione. Attraverso l'utilizzo dei moduli di resistenza identificati si è dunque riusciti a cogliere il reale comportamento delle strutture g70 e Large. In particolare, della struttura g70 se ne è colto il comportamento fino ad un certo valore di deformazione imposta, poiché dal momento in cui all'interno di essa viene superata la tensione di snervamento, le analisi non permettono più di seguirne il comportamento, dato che sono state eseguite delle analisi lineari elastiche; della struttura Large, invece, se ne è riusciti a cogliere il comportamento per tutti i valori di deformazione cui essa è stata sottoposta, poiché all'interno di essa non è mai stata superata la tensione di snervamento.

Si è visto inoltre come anche per le analisi effettuate sulle strutture Small e Medium, utilizzando il modulo di resistenza identificato per la corretta simulazione della struttura Large, se ne sia colto il reale comportamento. Nonostante quest'ultima considerazione, non è possibile affermare che utilizzando i moduli di resistenza identificati, possa essere simulata correttamente una qualsivoglia struttura costituita degli stessi materiali considerati; questo è dovuto al fatto che i processi di stampa utilizzati non permettono di ottenere tolleranze dimensionali abbastanza strette. Infatti, si è visto come all'interno delle curve F-S relative alle strutture del primo gruppo (Small, Medium; Large) ci sia un'incongruenza tra i valori di spostamento per cui i modelli tridimensionali arrivano a pacco, rispetto a quelli per cui ci arrivano i provini stampati della stessa struttura; ciò è dovuto al fatto che il processo di stampa utilizzato per generare tali strutture, non permette di ottenere tolleranze strette e porta a delle incongruenze geometriche tra i modelli 3D e le strutture stampate. Questo potrebbe essere uno dei motivi per cui è stato necessario, allo scopo di cogliere il reale comportamento delle strutture, ridurre così tanto il valore del modulo di resistenza del materiale rispetto a quello riportato nel suo datasheet; infatti, il fatto che le strutture stampate presentino delle dimensioni minorate rispetto ai loro modelli 3D, le conferisce una rigidità reale inferiore rispetto a quella considerata durante

l'analisi FEM, poiché quest'ultime utilizzano le quote riportate nel modello tridimensionale. Dunque, il fatto che utilizzando il valore del modulo di resistenza riportato all'interno del datasheet del materiale non si riesca a cogliere il reale comportamento della struttura, non è dovuto al fatto che tale valore non sia corretto, ma piuttosto al fatto che modello 3D e struttura stampata non possiedono le stesse dimensioni o ad una ad una combinazione dei due fattori. In ogni caso è possibile affermare che attraverso l'utilizzo del modulo di resistenza identificato per le strutture del primo gruppo è possibile coglierne il comportamento e valutarne le tensioni che si sviluppano al loro interno. Non è stato possibile effettuare delle considerazioni simili riguardo la struttura g70, poiché non si è in grado di valutarne la differenza tra gli spessori del modello tridimensionale e quelli dei provini stampati, ma probabilmente anche in questo caso la notevole riduzione del valore del modulo di resistenza da assegnare al materiale per poterne cogliere il comportamento è imputabile, almeno in parte, alla realizzazione di provini di dimensioni inferiori rispetto a quelle riportate nel loro modello tridimensionale. Tutte queste motivazioni stanno alla base dell'assunzione che i valori di rigidità individuati, necessari a cogliere il reale comportamento delle strutture testate, non possono essere utilizzati per analizzare qualsivoglia struttura realizzata attraverso tali materiali; infatti, il fatto che la riduzione del modulo di resistenza è legata a delle incongruenze tra le dimensioni del modello 3D e della struttura stampata, fa sì che il valore di rigidità da assegnare al materiale per simulare la struttura sia fortemente legato alla geometria della stessa. Dunque, analisi effettuate su strutture la cui geometria risente meno della differenza tra che si instaura tra le dimensioni del modello tridimensionale e della struttura stampata, potrebbero richiedere di assegnare al materiale un modulo di resistenza più simile, se non uguale, a quello riportato all'interno del suo datasheet.

Riguardo la possibilità di analizzare delle configurazioni simmetriche della struttura Large si è visto come questo sia effettivamente possibile e come permetta di ridurre notevolmente il numero di elementi necessari a discretizzare la struttura e di conseguenza il tempo di calcolo necessario a completare l'analisi. In particolare, i vantaggi maggiori vengono riscontrati nel caso in cui, in sostituzione alla struttura

Large intera, ne viene considerata una configurazione simmetrica che coincide con un quarto di un elemento di cui la è costituita; attraverso tale semplificazione si passa dall'utilizzo di 200.000 elementi ed un tempo di analisi pari a 10 ore, all'utilizzo di 750 elementi ed un tempo di calcolo pari a 5 minuti. In definitiva è possibile affermare che i risultati ottenuti riguardo la possibilità di simulare configurazioni simmetriche, oltre a poter essere estesi anche alle strutture Small e Medium che risultano molto simili alla Large, possono essere estese a qualsivoglia struttura che presenti delle simmetrie lungo cui poter essere tagliata.

Per quanto riguarda l'andamento delle tensioni all'interno delle varie strutture analizzate si è visto come all'interno della struttura g70, superato un certo valore di deformazione, le tensioni raggiungono un valore superiore rispetto a quella di snervamento del materiale; all'interno di tutte le strutture del primo gruppo (Small, Medium, Large), invece, la tensione di snervamento non viene raggiunta per nessun valore di deformazione imposta. In ogni caso per tutte le strutture considerate si è notato come la geometria dalla quale sono caratterizzate presenta notevoli margini di ottimizzazione poiché sono presenti delle zone in cui si verifica una concentrazione delle tensioni.

Infine, dai risultati dell'analisi del sistema Progressive Comfort si è visto come, allo scopo di simulare quest'ultimo, possa essere utilizzato il valore del modulo di resistenza riportato all'interno del datasheet del materiale di cui è costituito. I risultati hanno inoltre dimostrato come di tale sistema possa esserne analizzato solamente una sua configurazione simmetrica, nello specifico 1/4 del sistema, ed estenderne solamente in seguito i risultati all'intero; l'analisi effettuata ha infatti fornito a dei risultati congruenti con quelli ottenuti dalle prove sperimentali statiche effettuate sullo stesso sistema. Per quanto riguarda il numero e la tipologia di elementi utilizzati per analizzare questo sistema sono stati utilizzati 200.000 elementi Tet-10.

Capitolo 5-Osservazioni e prospettive future

5.1-Prove sperimentali

L'obiettivo principale di questo studio era quello di sviluppare un sistema atto alla riduzione del rinculo che potesse sostituire quelli attualmente utilizzati nei fucili di serie prodotti dall'azienda Benelli Armi, portando al contempo ad un aumento delle performance. A tale scopo sono state sviluppate due principali tipologie di strutture (primo e secondo gruppo), le quali sono state valutate attraverso delle prove sperimentali statiche e dinamiche.

Dalle prove statiche è emerso che le strutture più promettenti, sulle quali può essere interessante investire in delle ottimizzazioni, sono quelle del secondo gruppo ovvero le strutture Lattice realizzate attraverso il processo di stampa Selective Laser Sintering (SLS); in particolare la struttura SPIN è l'unica che è stata in grado di resistere alla deformazione imposta senza presentare alcuna rottura, né tantomeno deformazioni residue rilevanti; essa è l'unica struttura TPMS tra quelle considerate. La struttura SPIN risulta dunque la più interessante tra quelle del secondo gruppo poiché, per poter implementare le strutture testate all'interno del nuovo sistema di riduzione del rinculo, è indispensabile che esse siano in grado di resistere agli spostamenti cui si trovano sottoposte senza presentare rotture o deformazioni residue; il fatto di non presentare deformazioni residue garantisce infatti la ripetibilità di utilizzo del sistema.

Per quanto riguarda le strutture del primo gruppo, invece, si è visto come esse arrivino molto facilmente al loro fine corsa, senza che le alette di cui sono costituite effettuino effetti smorzanti considerevoli; questo le rende inadatte ad assolvere alla funzione cui sono dedicate, a meno che su di esse vengano apportate modifiche sostanziali.

Anche analizzando i risultati delle prove dinamiche è emerso che le strutture più promettenti risultano quelle del secondo gruppo, ed in particolare la struttura SPIN, la quale è l'unica che è stata in grado di resistere a tutte le prove cui è stata sottoposta. Infatti, da tali risultati è emerso come le strutture del secondo gruppo permettano di ridurre il picco di forza trasmessa rispetto a quanto fatto dal Progressive Comfort,

relativamente a tutte le varie altezze di rilascio del grave considerate; esse però, per effettuare tale riduzione del picco di forza trasmessa, necessitano di spostamenti maggiori rispetto a quelli dell'attuale sistema e questo non permette di rispettare il vincolo per cui il nuovo sistema dovrà possedere una deformazione massima confrontabile, o leggermente superiore, rispetto a quella dell'attuale. Ciò implica che tali strutture, per poter essere utilizzate, dovranno necessariamente subire delle modifiche in modo tale da limitarne lo spostamento massimo; tali modifiche potrebbero però causare un aumento del picco di forza trasmessa in quanto le strutture, subendo uno spostamento inferiore, ed avendo quindi a disposizione un intervallo di tempo più breve su cui distribuire la forza, tenderanno a perdere i vantaggi mostrati.

Interessante è stato valutare il coefficiente HER che rappresenta un indice della dispersione energetica fornita da tali strutture, poiché risulta svincolato, per lo meno in parte, dalla deformazione subita dalla struttura e fornisce quindi un'indicazione più generale delle potenzialità della stessa.

Riguardo la dispersione energetica, tutte le strutture del secondo gruppo hanno mostrato delle difficoltà nel raggiungere le prestazioni del Progressive Comfort e questo è sicuramente un fattore di cui tenere conto, poiché è una delle principali caratteristiche ricercate. Infatti, analizzando i valori di HER relativi a tali strutture si è visto come non risultino confrontabili con quelli associati al Progressive Comfort, ma questo dato non deve scoraggiare riguardo le loro potenzialità; si era consapevoli fin dall'inizio che raggiungere gli stessi valori di HER dell'attuale sistema sarebbe stato difficile, in quanto esso presenta al suo interno delle parti in moto relativo che strisciando dissipando energia.

Per quanto riguarda invece le strutture del primo gruppo anche i test dinamici hanno evidenziato che esse arrivano troppo facilmente al loro fine corsa, senza che le alette di cui sono costituite realizzino effetti smorzanti considerevoli; ciò le rende inadatte ad assolvere alla funzione cui sono dedicate, a meno che su di esse vengano apportate modifiche sostanziali. Infatti, valutandone i valori dell'indice HER si è osservato che,

come per le strutture del primo gruppo, essi risultano notevolmente inferiori rispetto a quelli associati al Progressive Comfort.

Infine, sono stati confrontati, relativamente alle strutture del secondo gruppo, i risultati della statica con quelli della dinamica in modo tale da identificare le relazioni che intercorrono tra le curve Forza-Spostamento statiche e dinamiche di ciascuna struttura. Da tali confronti è emerso come sia la struttura SPIN che la Lathel, quando sottoposte a deformazioni dinamiche, si irrigidiscono rispetto al caso statico e come sia possibile ottenerne le curve dinamiche moltiplicando i valori di forza relativi alle curve statiche per un opportuno coefficiente. La struttura Helical, invece, non presenta alcun irrigidimento in seguito all'applicazione delle deformazioni in maniera dinamica rispetto al caso statico e questo è dovuto alla geometria di cui è costituita.

5.2-Analisi agli elementi finiti

Oltre a sviluppare delle strutture atte alla riduzione del rinculo, un altro obiettivo di questo studio è stato quello di approcciarsi alle analisi agli elementi finiti delle stesse; infatti, simulare correttamente tali strutture non è affatto banale, poiché caratterizzate da geometrie particolari e materiali il cui comportamento non risulta di facile definizione.

Dai risultati ottenuti dall'analisi di sensibilità della mesh è emerso come, allo scopo di discretizzare tutte le strutture considerate, sia conveniente utilizzare degli elementi Tet-10 rispetto ad elementi Tet-4, poiché permettono di ottenere dei risultati stabilizzati attraverso un numero molto inferiore di elementi; in particolare, sia nel caso delle strutture Small, Medium e Large (primo gruppo) che per la struttura g70 (secondo gruppo), l'utilizzo di elementi Tet-10 ha permesso di ridurre il tempo di analisi circa del 90% rispetto all'utilizzo di elementi Tet-4 e di ottenere addirittura dei risultati maggiormente stabilizzati.

Dalle analisi effettuate si è visto che, assegnando al materiale utilizzato il modulo di resistenza che appare nel suo datasheet, non si riesce a cogliere il reale comportamento delle strutture. Per arrivare a coglierne in maniera precisa il

comportamento, per lo meno fintanto che esse si trovano a lavorare in campo elastico, è stato necessario utilizzare un valore del modulo di resistenza di molto inferiore rispetto a quello riportato nel datasheet del materiale di cui le strutture considerate sono costituite. Attraverso l'utilizzo dei moduli di resistenza identificati si è però riusciti a cogliere in maniera precisa il reale comportamento delle strutture g70 e Large. In particolare, della struttura g70 se ne è colto il comportamento fino ad un certo valore di deformazione imposta, poiché dal momento in cui all'interno di essa viene superata la tensione di snervamento, le analisi non permettono più di seguirne il comportamento essendo state eseguite delle analisi lineari elastiche; della struttura Large, invece, se ne è riusciti a cogliere il comportamento per tutti i valori di deformazione cui essa è stata sottoposta, poiché al suo interno non è mai stata superata la tensione di snervamento.

Inoltre, si è visto come analizzando le strutture Small e Medium utilizzando il modulo di resistenza identificato per la corretta simulazione della struttura Large, se ne sia colto il reale comportamento.

Nonostante quest'ultima considerazione, non è possibile affermare che utilizzando i moduli di resistenza identificati, possa essere simulata correttamente una qualsivoglia struttura costituita degli stessi materiali considerati; questo è dovuto al fatto che i processi di stampa utilizzati non permettono di ottenere tolleranze dimensionali abbastanza strette. Infatti, si è visto come il processo di stampa utilizzato per generare tali strutture, non permette di ottenere tolleranze strette e porta a delle incongruenze geometriche tra i modelli 3D e le strutture stampate. Questo potrebbe essere uno dei motivi per cui è stato necessario, allo scopo di cogliere il reale comportamento delle strutture, ridurre così tanto il valore del modulo di resistenza del materiale rispetto a quello riportato nel suo datasheet; infatti, il fatto che le strutture stampate presentino delle dimensioni minorate rispetto ai loro modelli 3D, le conferisce una rigidità reale inferiore rispetto a quella considerata durante l'analisi FEM, poiché quest'ultime utilizzano le quote riportate nel modello tridimensionale. Dunque, il fatto che utilizzando il valore del modulo di resistenza riportato all'interno del datasheet del materiale non si riesca a cogliere il reale comportamento della struttura, non è dovuto

al fatto che tale valore non sia corretto, ma piuttosto al fatto che modello 3D e struttura stampata non possiedono le stesse dimensioni o ad una combinazione dei due fattori.

In ogni caso è possibile affermare che, attraverso l'utilizzo del modulo di resistenza identificato per le strutture del primo gruppo, è possibile coglierne il comportamento e valutare le tensioni che si sviluppano al loro interno. Non è stato possibile effettuare delle considerazioni simili riguardo la struttura g70, poiché non si è in grado di valutarne la differenza tra gli spessori del modello tridimensionale e quelli dei provini stampati, ma probabilmente anche in questo caso la notevole riduzione del valore del modulo di resistenza da assegnare al materiale per poterne cogliere il comportamento è imputabile, almeno in parte, alla realizzazione di provini di dimensioni inferiori rispetto a quelle riportate nel loro modello tridimensionale.

Tutte queste motivazioni stanno alla base dell'assunzione che i valori di rigidità individuati, necessari a cogliere il reale comportamento delle strutture testate, non possono essere utilizzati per analizzare qualsivoglia struttura realizzata attraverso tali materiali; infatti, il fatto che la riduzione del modulo di resistenza è legata a delle incongruenze tra le dimensioni del modello 3D e della struttura stampata, fa sì che il valore di rigidità da assegnare al materiale per simulare la struttura sia fortemente legato alla geometria della stessa. Dunque, analisi effettuate su strutture la cui geometria risente meno della differenza che si instaura tra le dimensioni del modello tridimensionale e della struttura stampata, potrebbero richiedere di assegnare al materiale un modulo di resistenza più simile, se non uguale, a quello riportato all'interno del suo datasheet.

Riguardo la possibilità di analizzare delle configurazioni simmetriche della struttura Large si è visto come questo sia effettivamente possibile e come permetta di ridurre notevolmente il numero di elementi necessari a discretizzare la struttura e di conseguenza il tempo di calcolo necessario a completare l'analisi. In definitiva, è possibile affermare che se una qualsivoglia struttura presenta delle simmetrie, è possibile analizzarne una sua parte simmetrica ed estenderne solo in seguito i risultati all'intero, riducendo così il costo computazionale della simulazione.

Per quanto riguarda l'andamento delle tensioni all'interno delle varie strutture analizzate si è visto come all'interno della struttura g70, superato un certo valore di deformazione, le tensioni raggiungono un valore superiore rispetto a quella di snervamento del materiale; all'interno di tutte le strutture del primo gruppo (Small, Medium, Large), invece, la tensione di snervamento non viene raggiunta per nessun valore di deformazione imposta. In ogni caso per tutte le strutture considerate si è notato come la geometria dalla quale sono caratterizzate presenta notevoli margini di ottimizzazione, poiché sono presenti delle zone in cui si verifica una concentrazione delle tensioni.

Infine, dai risultati dell'analisi del sistema Progressive Comfort si è visto come, allo scopo di simulare quest'ultimo, possa essere utilizzato il valore del modulo di resistenza riportato all'interno del datasheet del materiale di cui è costituito. I risultati hanno inoltre confermato la possibilità di analizzare una parte simmetrica del sistema, nello specifico 1/4 di esso, ed estenderne solamente in seguito i risultati all'intero; l'analisi effettuata ha infatti fornito a dei risultati congruenti con quelli ottenuti dalle prove sperimentali statiche effettuate sullo stesso sistema.

5.3-Prospettive future

In prospettiva futura potrebbe essere interessante approfondire lo studio delle strutture del secondo gruppo, pensando alla possibilità di combinarle tra loro o di sottoporle a delle ottimizzazioni. Per quanto riguarda l'ottimizzazione della geometria delle singole strutture, questa dovrà essere mirata a ridurre la concentrazione delle tensioni che si verifica in determinate zone delle stesse, come emerso dai risultati delle analisi agli elementi finiti svolte sulla struttura g70.

Per migliorare queste strutture si potrebbe inoltre pensare di inserire al loro interno degli elementi che durante l'utilizzo del sistema si muovano tra loro di moto relativo; questi elementi, strisciando, consentirebbero al sistema di dissipare energia per attrito. Infatti, si è visto che la dispersione energetica del sistema Progressive Comfort

risultati elevata e come, senza aggiungere attriti interni al sistema, sia difficile superarne le performance.

Per quanto riguarda invece le strutture del primo gruppo, si è visto che esse non permettono di realizzare alcun effetto smorzante, e sarebbe dunque possibile continuare a considerarle solamente a fronte di modifiche sostanziali; si potrebbe, ad esempio, pensare di mantenerne il principio di funzionamento, aumentando lo spessore delle alette di cui sono costituite e verificare se tale modifica permetta o meno di ottenere un'azione smorzante.

Riguardo le prove sperimentali effettuate, nel caso dovessero essere effettuate nuovamente, potrebbe essere interessante apportare alcune modifiche all'alloggiamento utilizzato per testare le varie strutture. Sarebbe infatti opportuno realizzare un alloggiamento che permetta di visualizzare la struttura durante l'esecuzione delle prove, in modo tale da poterne osservare la deformazione; questo risulterebbe interessante soprattutto per quanto riguarda le prove dinamiche perché permetterebbe di misurare, attraverso delle fotocamere, direttamente lo spostamento della struttura; al contrario, in questo studio è stato misurato lo spostamento del maglio, assumendo che esso fosse identico a quello della struttura.

Riguardo le analisi FEM è stata individuata sia la tipologia che la quantità di elementi che più si prestano a simulare tali strutture; potrebbe dunque essere interessante in futuro iniziare ad approcciarsi a simulazioni non-lineari o iperelastiche che possano permettere di cogliere il reale comportamento delle strutture considerate, anche quando esse si trovano a lavorare al di fuori del loro campo elastico lineare.

Potrebbe essere inoltre approfondito lo studio di strutture realizzate attraverso le due tecniche di stampa utilizzate durante questo studio; sarebbe infatti interessante capire se, durante le analisi FEM, la necessita di utilizzare valori di rigidità molto inferiori rispetto a quelli riportati nel datasheet, per arrivare a cogliere in maniera precisa il comportamento delle strutture, sia effettivamente legato all'impossibilità di tali processi di realizzare tolleranze strette.

Potrebbero anche essere testate nuove strutture simmetriche e verificare se i risultati ottenuti dalle analisi delle simmetrie della struttura Large possano effettivamente essere estesi a qualsivoglia struttura.

Per concludere questo studio non ha permesso di arrivare ad ottenere il sistema ricercato, ma ha posto le basi per il suo sviluppo; sono state infatti identificate diverse strutture promettenti, tra cui in particolare la struttura SPIN, attraverso la cui ottimizzazione potrebbero essere raggiunti i risultati sperati. Inoltre, questo studio ha permesso di approcciarsi all'analisi agli elementi finiti di strutture realizzate attraverso processi di Additive Manufacturing, che, come si è visto, non risulta affatto banale.

Bibliografia

- [1] Benelli Armi, [Online]. Available: <https://benelli.it/it/>.
- [2] Benelli Armi, Documenti Ufficio Sviluppo Prodotto
- [3] AMPrint Center, [Online]. Available:
<https://www.rit.edu/AMPrint/Research.html>
- [4] Molitch-Hou, Michael. "Overview of additive manufacturing process." Additive Manufacturing. Butterworth-Heinemann, 2018. 1-38.
- [5] Wong, Kaufui V. and Aldo Hernandez. "A review of additive manufacturing." International scholarly research notices 2012 (2012)
- [6] Nazir, Aamer, et al. "A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 104.9 (2019): 3489-3510.
- [7] Ziaee, Mohsen, and Nathan B. Crane. "Binder jetting: A review of process, materials, and methods." Additive Manufacturing 28 (2019): 781-801.
- [8] 3D Printing Industry, «GE Teases Details of Prototype H1 Binder Jet 3D Printer» [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/ge-teases-details-prototype-h1-binder-jet-3d-printer-126072/>
- [9] Sun, S., Milan Brandt, and M. J. L. A. M. Easton. "Powder bed fusion processes: An overview." Laser Additive Manufacturing (2017): 55-77.
- [10] Research Gate, «Schematic of a Powder Bed Fusion Process» [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-powder-bed-fusion-process>
- [11] Mold Technology, «Selective Laser Sintering» [Online]. Available: <http://mold-technology4all.blogspot.com/2011/08/selective-laser-sintering.html>
- [12] Kruth, Jean-Pierre, et al. "Lasers and materials in selective laser sintering." Assembly Automation (2003).

- [13] HP, «HP Multi Jet Fusion Technology» [Technical WhitePaper]
- [14] Prototek, «Multi Jet Fusion» [Online]. Available: <https://prototek.it/multi-jet-fusion/>
- [15] Stampa 3D, «HP Jet Fusion vs. Sinterizzazione Laser – EOS Protootyping» [Online]. Available: <https://www.stampa3donline.com/hp-jet-fusion-confronto-con-sinterizzazione-laser>
- [16] Cai, Chao, et al. "Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion." *Journal of Materials Processing Technology* 288 (2021): 116882.
- [17] Nazir, Aamer, et al. "A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104.9 (2019): 3489-3510.
- [18] Unità GP2, «Alveare» [Online]. Available: <https://www.unitapastoralegp2.it/portfolio/alveare/>
- [19] Gaggi, Flavio. "Modellazione geometrica generativa ed ottimizzazione di strutture cellulari per la fabbricazione mediante additive manufacturing." (2014).
- [20] Prouct Lifecycle Managment, «Additive Manufacturing – TECHNIA» [Online]. Available: <https://www.technia.nl/solutions/additive-manufacturing/>
- [21] Hössinger-Kalteis, Anna, et al. "Overview and comparison of modelling methods for foams." *Journal of Cellular Plastics* 57.6 (2021): 951-1001.
- [22] Jetor, «The Properties of Foams and Lattices» [Online]. Available: <https://www.rit.edu/AMPrint/Research.html>
- [23] Istrate, Oana M., and Biqiong Chen. "Relative modulus–relative density relationships in low density polymer–clay nanocomposite foams." *Soft Matter* 7.5 (2011): 1840-1848.

- [24] Tao, Wenjin, and Ming C. Leu. "Design of lattice structure for additive manufacturing." 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA). IEEE, 2016.
- [25] Khemani, Kishan C. "Polymeric foams: an overview." (1997): 1-7.
- [26] Fastisol Isolamenti, «Schiuma Poliuretana a Cella Aperta e Chiusa» [Online]. Available: <https://www.fastisol.it/notizie/schiuma-poliuretana-a-celle-aperte-o-chiuse>
- [27] Gibson, Lorna J. "Cellular solids." *Mrs Bulletin* 28.4 (2003): 270-274.
- [28] Vettoriale, «Nido d'ape, Profilo Seamless » [Online]. Available: https://it.123rf.com/photo_24826660_un-nido-d-ape-profilo-seamless-pattern-che-pu%C3%B2-essere-ridimensionata-e-ricolorato-salvato-a-eps10.html
- [29] Hilton, Harry H., and Sung Yi. "The significance of (an) isotropic viscoelastic Poisson ratio stress and time dependencies." *International Journal of Solids and Structures* 35.23 (1998): 3081-3095.
- [30] Mir, Mariam, et al. "Review of mechanics and applications of auxetic structures." *Advances in Materials Science and Engineering 2014* (2014).
- [31] AIP Publishing - Scitation, «3D Auxetic Lattice Materials for Anomalous Elastic Wave Polarization» [Online]. Available: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5116687>
- [32] Han, Lu, and Shunai Che. "An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: from biological structures to self-assembled systems." *Advanced Materials* 30.17 (2018): 1705708.
- [33] ResearchGate, «Catenoide Rys 5.1.» [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Catenoide-Rys-51-Katenoida_fig2_235256942
- [34] Meeks III, William H. "The theory of triply periodic minimal surfaces." *Indiana University Mathematics Journal* (1990): 877-936.

- [35] Semantic Scholar, «Porous scaffold design using the distance field and triply periodic minimal surfaces models» [Online]. Available:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Porous-scaffold-design-using-the-distance-field-and-Yoo/7c96ebde4540fb060f788e105a087cd41469e6a3>
- [36] Susquehanna University, «Triply Periodic Minimal Surfaces» [Online]. Available:
<http://facstaff.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/periodic.html>
- [37] Helou, Mark, and Sami Kara. "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31.3 (2018): 243-261.
- [38] Nature, «Influence of Relative Density on Quasi-Static and Fatigue Failure of Lattice Structure» [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-98631-3>
- [39] Seharing, Asliah, Abdul Hadi Azman, and Shahrum Abdullah. "A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts." *Advances in Mechanical Engineering* 12.6 (2020): 1687814020916951.
- [40] MDPI, «Applied Sciences, Design and Optimization of Lattice Structure» [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6374/htm>
- [41] Wagner, Marius A., et al. "Programmable, active lattice structures: Unifying stretch-dominated and bending-dominated topologies." *Extreme Mechanics Letters* 29 (2019): 100461.
- [42] Chen, Wen, et al. "Stiff isotropic lattices beyond the Maxwell criterion." *Science advances* 5.9 (2019): eaaw1937.
- [43] Ferro, Carlo Giovanni, et al. "Lattice structured impact absorber with embedded anti-icing system for aircraft wings fabricated with additive SLM process." *Materials Today Communications* 15 (2018): 185-189.

- [44] Stampfl, Jürgen, et al. "Regular, low density cellular structures-rapid prototyping, numerical simulation, mechanical testing." MRS Online Proceedings Library (OPL) 823 (2004).
- [45] Young, Robert J., and Peter A. Lovell. Introduction to polymers. CRC press, 2011.
- [46] Polymers [Online]. Available:
<http://www.whatischemistry.unina.it/it/polymers.html>
- [47] Strobl, Gert R., and Gert R. Strobl. The physics of polymers. Vol. 2. Berlin: Springer, 1997.
- [48] Chimica Online, «Polimeri» [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/organica/polimeri.htm>
- [49] Olatunji, Ololade. "Classification of natural polymers." Natural Polymers. Springer, Cham, 2016. 1-17.
- [50] SlideToDoc, «H Curtis N S Barnes A Schnek A» [Online]. Available:
<https://slidetodoc.com/h-curtis-n-s-barnes-a-schnek-a-9/>
- [51] DocPlayer, «Teoria dei Polimeri e loro Caratterizzazione» [Online]. Available: <https://docplayer.it/20637658-Teoria-dei-polimeri-e-loro-caratterizzazione-debora-puglia.html>
- [52] WinSpazioinfo, «POLIMERI» [Online]. Available:
<http://win.spazioinfo.com/public/POLIMERI%202006-2007.pdf>
- [53] Unisalento, «Polimeri Termoplastici e Termoindurenti» [Online]. Available:
<https://www.google.com/search?q=polimeri+cristallini+struttura+sferulitica&tbm>
m
- [54] Benin, M. Aniber, et al. "Comparative study of tensile properties on Thermoplastic & Thermosetting polymer composites." International Journal of Applied Engineering Research 10.11 (2015): 10109-10113.

- [55] Bhowmick, Anil K., and Howard Stephens, eds. Handbook of elastomers. CRC Press, 2000.
- [56] Ferry, John D. Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons, 1980.
- [57] Hay, J., and E. Herbert. "Measuring the complex modulus of polymers by instrumented indentation testing." *Experimental Techniques* 37.3 (2013): 55-61.
- [58] Findley, William N., and Francis A. Davis. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. Courier corporation, 2013.
- [59] SlideToDoc, «REOLOGIA» [Online]. Available: <https://slidetodoc.com/reologia-il-nome-si-deve-a-bingham-e/>
- [60] Jabbari-Farouji, Sara, et al. "Plastic deformation mechanisms of semicrystalline and amorphous polymers." *ACS Macro Letters* 4.2 (2015): 147-150.
- [61] Bîrcă, Alexandra, et al. "Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers." *Materials for Biomedical Engineering*. Elsevier, 2019. 1-28.
- [62] Polimeri e Biopolimeri, «Polimeri e Biopolimeri di Interesse Farmaceutico» [Online]. Available: https://biomateriali.files.wordpress.com/2017/04/lezione-5_polimeri-iii.pdf
- [63] Fecht, H. J. "Thermodynamic Properties of Amorphous Solids—Glass Formation and Glass Transition—(Overview)." *Materials Transactions, JIM* 36.7 (1995): 777-793.
- [64] Richeton, J., et al. "Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress." *International journal of solids and structures* 43.7-8 (2006): 2318-2335.
- [65] Archivia, «» [Online]. Available: http://archivia.unict.it/bitstream/10761/1109/24/PLLNTN79P03C351E-01_Introduzione.pdf

- [66] HP, Multi Jet Fusion, Datasheet Polvere PA12
- [67] EOS, e-Manufacturing Solutions, SLS, Datasheet PA2200 Balance 1.0
- [68] INSTRON, «Universal Testing Machine » [Online]. Available:
<https://www.instron.com/en/>
- [69] Schwanitz, Stefan, Sebastian Möser, and Stephan Odenwald. "Comparison of test methods to quantify shock attenuating properties of athletic footwear." *Procedia Engineering* 2.2 (2010): 2805-2810.
- [70] PCB Piezotronics, Force Trorque Division, Installation And Operating Manual Datasheet Model 200C20
- [71] PCB Piezotronics, Force Trorque Division, Installation And Operating Manual Datasheet Model 350D02
- [72] Micro Epsilon, Technical Data, Datasheet Laser Sensor LD 1605
- [73] DEWE, Technical Reference Manual, Datasheet DEWE-43
- [74] Farina, A., et al. "Prove interlaboratorio per la determinazione dei valori di ripetibilità e riproducibilità nella misura del potere fonoisolante." *Atti del XXIV Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, (Trento)* (1996): 12-14.