

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA

BIOMEDICA



Tesi di Laurea Specialistica

Giunzione innovativa

metallo-composito con processo additivo

per piede protesico

Relatore

Prof. Giorgio De Pasquale

Candidato

Letizia Zappulla

A.A. 2019/2020

Indice

Abstract.....	1
Introduzione	2
Materiali e tecniche di produzione.....	6
1.1 Materiali compositi.....	7
1.2 Materiali compositi in fibra di carbonio	10
1.3 Additive Manufacturing (AM)	13
1.3.1 Additive Manufacturing per materiali metallici	15
1.3.2 Additive Manufacturing combinata a materiali compositi	17
1.4 Selective Laser Melting (SLM)	19
1.4.1 SLM per Inconel	23
1.5 Giunzione metallo-materiale composito	24
1.5.1 Giunti co-cured	27
Progettazione dei modelli	30
2.1 Simulazione della tenuta della resina sul metallo.....	31
2.1.1 Creazione del modello	31
2.1.2 Studio della convergenza.....	34
2.1.3 Ottimizzazione della geometria.....	38
2.1.4 Dimensionamento delle punte a tronco di piramide.....	43
2.2 Alleggerimento simulazione numerica	45
2.2.1 Primo metodo: mesh diversificato.....	46

2.2.2	Secondo metodo: modello solo resina.....	48
2.2.3	Terzo metodo: simulazione di celle.....	50
2.2.4	Quarto metodo: un quarto di modello.....	53
2.3	Simulazioni della tenuta del composito sul metallo	59
2.3.1	Creazione dei modelli con punte inclinate	61
2.3.2	Creazione dei modelli con geometrie complesse	62
2.3.3	Simulazioni FEM dei modelli con punte inclinate	66
2.3.4	Simulazioni FEM dei modelli con geometrie complesse.....	75
2.3.5	Confronto finale tra i modelli migliori.....	78
	Prove sperimentali	82
3.1	Stampa 3D dei provini metallici	83
3.2	Banco di prova e procedura di esecuzione.....	92
3.3	Prove di trazione su macchina	99
3.3.1	Prove di trazione del materiale composito.....	101
3.3.2	Prove di trazione del modello completo.....	109
3.3.3	Diagrammi forza-spostamento sperimentali	116
3.3.4	Considerazioni finali sulle prove sperimentali.....	136
	Simulazioni numeriche.....	141
4.1	Modello a due volumi	142
4.1.1	Analisi di sensitività del modello a due volumi	147
4.1		159
4.2	Modello a tre volumi	159

4.2.1	Analisi di sensitività del volume di giunzione	162
Progettazione e analisi dell'applicazione: piede protesico		177
5.1	Aspetti e caratteristiche generali del piede protesico	178
5.2	Realizzazione del modello CAD del piede protesico	182
5.3	Simulazioni numeriche del piede protesico.....	188
5.4	Stampa della componente metallica con punte	198
Conclusioni		202
Bibliografia		206

Elenco dei simboli

SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
F	<i>Forza</i>
U	<i>Spostamento</i>
σ	<i>Tensione normale</i>
ε	<i>Deformazione</i>
τ	<i>Tensione tangenziale</i>
E	<i>Modulo di Young</i>
ν	<i>Coefficiente di Poisson</i>
G	<i>Modulo a taglio</i>

Elenco delle figure e delle tabelle

Figura		Pag.
1.1.	<i>Esempio di un materiale composito con fibre</i>	2
1.2.	<i>Illustrazione di varie tipologie di materiali compositi rinforzati</i>	3
1.3.	<i>Illustrazione di fili biassiali (a), fili triassiali (b) e fili a maglia ortogonale (c)</i>	4
1.4.	<i>Illustrazione della fibra di carbonio</i>	5
1.5.	<i>Distribuzione uniforme delle fibre nel composito (a); Distribuzione discontinua e orientazione casuale delle fibre nel composito (b) (c)</i>	6
1.6.	<i>Illustrazione di un sistema a letto di polvere di AM</i>	10
1.7.	<i>Illustrazione di un sistema di alimentazione in polvere di AM</i>	11
1.8.	<i>Presentazione di un'apparecchiatura SLM (a) e rappresentazione del processo (b)</i>	13
2.1.	<i>Schermata della vista esplosa dei volumi dell'intero modello liscio (a) e dell'assieme dei volumi del modello liscio (b) su Solidworks</i>	25
2.2.	<i>Rappresentazioni del provino liscio (a), provino con parallelepipedi (b) e provino con piramidi a base 2 mm(c)</i>	26
2.3.	<i>Grafico della convergenza degli spostamenti su y</i>	30
2.4.	<i>Grafico della convergenza delle tensioni di Von Mises</i>	30

2.5.	<i>Grafico della convergenza dell'errore</i>	31
2.6.	<i>Rappresentazioni del provino a punte piramidali a base 2.5 mm (a) e punte a tronco di piramide (b)</i>	32
2.7.	<i>Distribuzione delle tensioni di Von Mises sulla resina con punte a parallelepipedo</i>	32
2.8.	<i>Distribuzione della deformata di Von Mises sulla resina con punte a parallelepipedo</i>	33
2.9.	<i>Distribuzione dello sforzo di taglio su YZ sulla resina con punte a parallelepipedo</i>	33
2.10.	<i>Istogramma delle tensioni di Von Mises dei diversi provini</i>	34
2.11.	<i>Istogramma dello sforzo di taglio su YZ dei diversi provini</i>	34
2.12.	<i>Istogramma della deformata lungo y dei diversi provini</i>	35
2.13.	<i>Raffigurazione della prima tipologia di tronchi di piramide</i>	36
2.14.	<i>Raffigurazione della seconda tipologia di tronchi di piramide</i>	37
2.15.	<i>Raffigurazione della terza tipologia di tronchi di piramide</i>	37
2.16.	<i>Istogramma di confronto delle tensioni e dello sforzo di taglio dei diversi tronchi di piramide</i>	37
2.17.	<i>Istogramma di confronto delle tensioni di Von Mises dei diversi tronchi di piramide</i>	38
2.18.	<i>Screen della prima tipologia di mesh diversificata (a); screen del provino metallico con punte a tronco di piramide con la prima tipologia di mesh diversificata (b)</i>	39
2.19.	<i>Istogramma di confronto dell'errore energetico percentuale nella zona infittita tra i diversi mesh</i>	40
2.20.	<i>Schermate delle distribuzioni delle tensioni di Von Mises sulla resina del modello intero liscio (a) e del modello con solo resina liscia (b)</i>	42
2.21.	<i>Schermate delle distribuzioni di tensione sulla resina del modello intero (a) e del modello con sola resina (b) avente punte a tronco di piramide</i>	42
2.22.	<i>Illustrazione dei volumi di una cella con provino a tronchi di piramide</i>	43
2.23.	<i>Schermata dei vincoli aggiuntivi nel modello della cella su Ansys sulla faccia del metallo (a) e su quella del composito (b)</i>	44
2.24.	<i>Grafici Forza- Spostamento per modello intero (a) e per la sola cella (b) delle punte a forma di parallelepipedo</i>	45

2.25.	<i>Grafici Forza- Spostamento per modello intero (a) e per la sola cella (b) delle punte a forma di piramide</i>	45
2.26.	<i>Grafici Forza- Spostamento per modello intero (a) e per la sola cella (b) delle punte a forma di tronco di piramide</i>	45
2.27.	<i>Schermata del modello CAD del quarto di modello su Solidoworks</i>	47
2.28.	<i>Schermata delle tensioni di Von Mises della resina del modello intero liscio sulla faccia a contatto con il metallo (a) e sulla faccia a contatto con il composito (b)</i>	48
2.29.	<i>Schermata delle tensioni di Von Mises della resina del quarto di modello liscio sulla faccia a contatto con il metallo (a) e sulla faccia a contatto con il composito (b)</i>	48
2.30.	<i>Schermate delle tensioni di Von Mises della resina sulla faccia a contatto con il metallo (a) e sulla faccia a contatto con il composito del quarto di modello</i>	50
2.31.	<i>Schermata del quarto di modello con spessore del composito dimezzato</i>	51
2.32.	<i>Schermata dei vincoli aggiuntivi sulla superficie esterna del composito</i>	51
2.33.	<i>Schermate delle tensioni di Von Mises sulla superficie della resina a contatto con il metallo (a) e a contatto con il composito (b) del quarto di modello</i>	52
2.34.	<i>Illustrazione della vista esplosa del modello con punte generiche (a) e il suo assieme (b)</i>	53
2.35.	<i>Rappresentazioni dei provini con punte a parallelepipedo inclinati verso l'alto (a) e verso il basso (b)</i>	55
2.36.	<i>Rappresentazioni dei provini con punte cilindriche inclinate verso l'alto (a) e verso il basso (b)</i>	55
2.37.	<i>Raffigurazioni del provino con doppie piramidi di base 1.6 mm (a) e della geometria di un'unica punta (b)</i>	56
2.38.	<i>Raffigurazioni del provino con doppie piramidi di base 1 mm (a) e della geometria di un'unica punta (b)</i>	57
2.39.	<i>Raffigurazioni del provino con uncini doppi (a) e della geometria di un'unica punta (b)</i>	57
2.40.	<i>Raffigurazioni del provino con quattro uncini (a) e della geometria di un'unica punta (b)</i>	58

2.41.	<i>Raffigurazioni del provino con spirali (a) e della geometria di un'unica punta (b)</i>	58
2.42.	<i>Raffigurazione di un quarto di modello</i>	59
2.43.	<i>Schermata della distribuzione delle tensioni di Von Mises sul composito del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	61
2.44.	<i>Schermata della distribuzione delle tensioni di Von Mises sul provino metallico del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	61
2.45.	<i>Schermata della distribuzione dello sforzo di taglio sul composito del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	62
2.46.	<i>Schermata della distribuzione dello sforzo di taglio sul provino metallico del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	62
2.47.	<i>Schermata della distribuzione degli spostamenti lungo y sul composito del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	63
2.48.	<i>Schermata della distribuzione degli spostamenti lungo y sul provino metallico del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	63
2.49.	<i>Raffigurazioni delle punte a base esagonale (b) ottagonale (b) dodecagonale (c) esadecagonale (d)</i>	64
2.50.	<i>Istogramma dello sforzo di taglio dei diversi poligoni di base delle punte cilindriche inclinate verso l'alto</i>	65
2.51.	<i>Istogramma dello sforzo dello spostamento lungo y dei diversi poligoni di base delle punte cilindriche inclinate verso l'alto</i>	65
2.52.	<i>Istogramma di confronto delle tensioni di Von Mises dei modelli con punte inclinate</i>	67
2.53.	<i>Istogramma di confronto delle tensioni dello sforzo di taglio dei modelli con punte inclinate</i>	67
2.54.	<i>Istogramma di confronto delle tensioni dello spostamento lungo y dei modelli con punte inclinate</i>	68
2.55.	<i>Istogramma di confronto dello sforzo di taglio tra le geometrie complesse</i>	71
2.56.	<i>Istogramma di confronto dello spostamento lungo y tra le geometrie complesse</i>	71
2.57.	<i>Istogramma di confronto dello sforzo di taglio tra i provini con punte inclinate e le tre geometrie semplici iniziali</i>	73
2.58.	<i>Istogramma di confronto dello spostamento lungo y tra i provini con punte inclinate e le tre geometrie semplici iniziali</i>	73

3.1.	<i>Macchina RenAM 500M usata per la stampa dei provini metallici</i>	76
3.2.	<i>Schermata del software QuantAM per identificare le superfici da supportare</i>	78
3.3.	<i>Stampa dei provini con supporti (a) tra le punte a forma di tronchi di piramide (b) tra le punte a forma di parallelepipedi e (c) provini con punte piramidali senza supporti</i>	78
3.4.	<i>Stampa dei provini con punte inclinate senza l'ausilio di supporti</i>	79
3.5.	<i>Processo eseguito per la stampa dei provini, dal CAD alla macchina</i>	80
3.6.	<i>Interno della camera di processo</i>	81
3.7.	<i>Provini appena estratti dalla camera di processo, ancora connessi al substrato mediante i supporti</i>	82
3.8.	<i>Foto di alcuni provini sabbiati</i>	83
3.9.	<i>Stampa dei provini con punte di geometria complessa; (a) distorsione degli uncini, (b) punte a spirali bruciate e (c) doppie piramidi si sfaldano</i>	83
3.10.	<i>Provini stampati e sabbiati</i>	84
3.11.	<i>Sistema epossidico parte A e parte B da miscelare per formare la resina e distaccante polivinilico che permette di staccare la resina dal piano di lavoro</i>	86
3.12.	<i>Tessuto in fibra di carbonio di tipo twill</i>	86
3.13.	<i>Materiale utilizzato per realizzare le giunzioni</i>	87
3.14.	<i>Inserimento singole fibre manualmente impregnate di resina tra le punte</i>	88
3.15.	<i>Posizionamento dei rettangoli di tessuto</i>	88
3.16.	<i>Posizionamento di un foglio di plastica sull'ultimo strato di resina</i>	89
3.17.	<i>Posizionamento dei pesi (6 kg)</i>	89
3.18.	<i>Provino asciutto rimosso dai supporti in plastica</i>	90
3.19.	<i>Taglio della parte di composito in eccesso</i>	90
3.20.	<i>Provini finiti ed etichettati</i>	91
3.21.	<i>Macchina a trazione utilizzata per le prove sperimentali in laboratorio</i>	92
3.22.	<i>Taglio dei provini con l'ausilio di una sega a nastro</i>	94
3.23.	<i>Schema illustrativo del posizionamento degli afferraggi della macchina a trazione</i>	94
3.24.	<i>Diagramma forza-spostamento relativo alla messa in trazione dei sei provini di composito</i>	95

Abstract

3.25.	<i>Operazione di fitting lineare degli andamenti forza-spostamento dei provini di composito</i>	98
3.26.	<i>Influenza della percentuale in volume delle fibre sulle proprietà meccaniche del materiale composito</i>	100
3.27.	<i>Foto degli spessori metallici utilizzati per le prove di trazione dell'intero modello</i>	102
3.28.	<i>Foto di un modello intero afferrato all'interno della macchina di trazione (a) e di un suo zoom degli afferraggi (b)</i>	103
3.29.	<i>Foto dei modelli di prova in seguito alla trazione in macchina</i>	105
3.30.	<i>Foto dello scollamento del giunto del provino con doppio composito</i>	107
3.31.	<i>Grafico forza-spostamento del modello con doppio composito</i>	108
3.32.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a parallelepipedo</i>	109
3.33.	<i>Foto del lato destro (a) e di quello sinistro (b) del provino 9 con punte a parallelepipedo</i>	110
3.34.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a parallelepipedo inclinate verso il basso</i>	111
3.35.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a cilindro inclinate verso il basso</i>	112
3.36.	<i>Zoom sul tratto lineare del diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a cilindro inclinate verso il basso</i>	113
3.37.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a parallelepipedo inclinate verso l'alto</i>	114
3.38.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a cilindro inclinate verso l'alto</i>	115
3.39.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a tronco di piramide</i>	116
3.40.	<i>Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a piramide</i>	117
3.41.	<i>Zoom sul tratto lineare del diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a piramide</i>	118
3.42.	<i>Istogramma del valore medio dei carichi massimi dei provini</i>	120
3.43.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con parallelepipedi</i>	121

3.44.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con parallelepipedi inclinati verso il basso</i>	122
3.45.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	122
3.46.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con cilindri inclinati verso il basso</i>	123
3.47.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con cilindri inclinati verso l'alto</i>	123
3.48.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con tronchi di piramide</i>	124
3.49.	<i>Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con piramidi</i>	124
3.50.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra le varie rette interpolanti</i>	125
3.51.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra le varie rette interpolanti</i>	126
3.52.	<i>Istogramma di confronto delle rigidezze dei giunti</i>	127
3.53.	<i>Istogramma di confronto dei carichi massimi e delle rigidezze di tutti i provini</i>	129
3.54.	<i>Foto del provino con punte a parallelepipedo con composito non ancora tagliato</i>	130
3.55.	<i>Istogramma di confronto dei carichi massimi di diverse tipologie di giunti metallo-CFRP</i>	132
4.1.	<i>Modello CAD a due volumi del provino con punte piramidali</i>	134
4.2.	<i>Sistema di carichi e vincoli</i>	135
4.3.	<i>Confronto diagrammi forza-spostamento con composito ortotropo</i>	138
4.4.	<i>Confronto rette forza-spostamento al variare della lunghezza iniziale della lastra di composito</i>	140
4.5.	<i>Confronto rette forza-spostamento al variare della sezione della lastra di composito</i>	142
4.6.	<i>Confronto rette forza-spostamento al variare dello spessore del volume di composito</i>	143
4.7.	<i>Confronto rette forza-spostamento al variare del modulo E_z</i>	145
4.8.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte a forma di parallelepipedo</i>	146

4.9.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte piramidali</i>	147
4.10.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte a forma di tronchi di piramide</i>	147
4.11.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte a forma di parallelepipedi inclinati verso l'alto</i>	148
4.12.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte a forma di parallelepipedi Inclinati verso il basso</i>	148
4.13.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte cilindriche inclinate verso il basso</i>	149
4.14.	<i>Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte cilindriche inclinate verso l'alto</i>	149
4.15.	<i>Schermata su Solidworks della vista esplosa (a) e dell'assieme (b) del modello a tre volumi</i>	151
4.16.	<i>Diagramma forza-spostamento dei diversi spessori utilizzati per l'analisi di sensitività del volume di giunzione</i>	155
4.17.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento dei diversi spessori utilizzati per l'analisi di sensitività del volume di giunzione</i>	156
4.18.	<i>Diagramma forza-spostamento delle diverse lunghezze utilizzate per l'analisi di sensitività del volume di giunzione</i>	158
4.19.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento delle diverse lunghezze utilizzate per l'analisi di sensitività del volume di giunzione</i>	158
4.20.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi</i>	160
4.21.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi</i>	161
4.22.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con piramidi</i>	161
4.23.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con piramidi</i>	162

4.24.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con tronchi di piramide</i>	162
4.25.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con tronchi di piramide</i>	163
4.26.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso il basso</i>	163
4.27.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso il basso</i>	164
4.28.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso l'alto</i>	164
4.29.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso l'alto</i>	165
4.30.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso l'alto</i>	165
4.31.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso l'alto</i>	166
4.32.	<i>Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso il basso</i>	166
4.33.	<i>Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso il basso</i>	167
5.1.	<i>Foto di piedi protesici di vario genere progettati per l'inserimento di calzari</i>	173
5.2.	<i>Piede protesico delle aziende Ottobock (a) e Ossur (b) usati come modelli di riferimento</i>	175

Abstract

5.3.	<i>Raffigurazione della vista esplosa (a) e dell'assieme (b) del CAD del piede protesico</i>	176
5.4.	<i>Vista laterale dell'intera struttura (a) e zoom sulla parte superiore (b) del CAD del piede protesico</i>	177
5.5.	<i>Raffigurazione della vista esplosa (a) e dell'assieme (b) del CAD semplificato del piede protesico</i>	178
5.6.	<i>Vista laterale dell'intera struttura (a) e zoom sulla parte superiore (b) del CAD semplificato del piede protesico</i>	178
5.7.	<i>Schermata su Ansys del mesh diversificato usato per il piede protesico</i>	180
5.8.	<i>Zoom su Ansys del mesh diversificato usato per il piede protesico</i>	181
5.9.	<i>Schermata su Ansys dei sistemi di carichi e vincoli utilizzato per il piede protesico</i>	182
5.10.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo Z del piede protesico con forza verticale statica</i>	183
5.11.	<i>Distribuzione dello sforzo di taglio sul piano XY Z del piede protesico con forza verticale statica</i>	183
5.12.	<i>Distribuzione delle tensioni di Von Mises del piede protesico con forza verticale statica</i>	184
5.13.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo X del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	184
5.14.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo Z del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	185
5.15.	<i>Distribuzione dello sforzo di taglio sul piano XY del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	185
5.16.	<i>Distribuzione delle tensioni di Von Mises del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	186
5.17.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo X del volume di giunzione, superficie a contatto con il composito, dell'intero modello del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	186
5.18.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo X del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	187

Abstract

5.19.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo Z del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	187
5.20.	<i>Distribuzione degli spostamenti lungo Z del volume di giunzione, superficie a contatto con il composito, dell'intero modello del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	188
5.21.	<i>Distribuzione dello sforzo di taglio sul piano XY del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	188
5.22.	<i>Distribuzione delle tensioni di Von Mises del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello del piede protesico con forza inclinata di 45°</i>	189
5.23.	<i>Punta a parallelepipedo con relative dimensioni della componente metallica del piede protesico</i>	191
5.24.	<i>Schermata della parte superiore (a) e di quella inferiore (b) della componente in alluminio con punte a parallelepipedo</i>	192
5.25.	<i>Vista dall'alto (a) e vista laterale (b) della componente in alluminio con punte a parallelepipedo</i>	192

Tabella		Pag.
2.1.	Proprietà meccaniche dei materiali del modello	27
2.2.	Convergenza provino liscio	29
2.3.	Convergenza provino con punte piramidali	29
2.4.	Convergenza provino con punte a parallelepipedo	29
2.5.	Confronto dei PRERR dei vari mesh	40
2.6.	Confronto tensioni tra modello liscio e modello con tronchi di piramide	42
2.7.	Confronto delle tensioni tra modello intero e un quarto di modello	47
2.8.	Confronto delle grandezze di interesse per un quarto di modello di ogni tipologia di punte	49
2.9.	Proprietà meccaniche dei materiali utilizzati nel modello	53
2.10.	Valori delle grandezze registrate per le punte a parallelepipedo inclinate verso il basso	60

2.11.	<i>Valori delle grandezze registrate per le punte a parallelepipedo inclinate verso l'alto</i>	60
2.12.	<i>Valori delle grandezze registrate per i diversi poligoni di base</i>	65
2.13.	<i>Valori delle grandezze registrati per le punte cilindriche inclinate verso l'alto</i>	66
2.14.	<i>Valori delle grandezze registrati per le punte cilindriche inclinate verso il basso</i>	66
2.15.	<i>Valori delle grandezze registrati per i provini a geometria complessa</i>	69
2.16.	<i>Valori delle grandezze registrati per le prime tre geometrie simulate con il composito</i>	72
3.1.	<i>Parametri di interesse impostati per la stampa 3D dei provini metallici</i>	81
3.2.	<i>Carichi massimi a trazione raggiunti dai provini di composito</i>	96
3.3.	<i>Carichi massimi raggiunti dai modelli di prova</i>	106
3.4.	<i>Carichi massimi raggiunti in macchina di trazione per tutti i provini</i>	119
4.1.	<i>Confronto spostamenti lungo Y delle prove sperimentali con le simulazioni numeriche con composito isotropo a $F=250N$</i>	136
4.2.	<i>Proprietà meccaniche del modello a due volumi con composito ortotropo</i>	138
4.3.	<i>Variazione dei moduli elastici e a taglio a causa della modifica della lunghezza iniziale della lastra di composito</i>	140
4.4.	<i>Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare della lunghezza iniziale della lastra di composito</i>	141
4.5.	<i>Variazione dei moduli elastici e a taglio a causa della modifica della sezione iniziale della lastra di composito</i>	142
4.6.	<i>Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare della sezione iniziale della lastra di composito</i>	143
4.7.	<i>Proprietà del materiale composito attribuite per valutare l'influenza dello spessore</i>	143
4.8.	<i>Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare dello spessore del volume di composito</i>	144
4.9.	<i>Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare di E_z</i>	145
4.10.	<i>Caratteristiche del materiale CFRP</i>	146
4.11.	<i>Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento per tutte le tipologie di provino con le nuove proprietà del composito</i>	150

Abstract

4.12.	<i>Proprietà dei materiali del modello a tre volumi</i>	153
4.13.	<i>Analisi di sensitività dello spessore del volume di giunzione</i>	155
4.14.	<i>Analisi di sensitività della lunghezza del volume di giunzione</i>	157
4.15.	<i>Proprietà meccaniche per ogni tipologia di punte con giunzione di dimensioni 20x33x2 mm</i>	159
4.16.	<i>Variazioni percentuali delle pendenze delle rette dei modelli a due e a tre volumi rispetto all'andamento sperimentale</i>	167
5.1.	<i>Tipologie di piede protesico</i>	171
5.2.	<i>Proprietà meccaniche dei materiali del piede protesico</i>	179
5.3.	<i>Valori delle grandezze di interesse registrati per le diverse inclinazioni della forza</i>	189

Abstract

Attualmente, la fibra di carbonio rappresenta uno dei materiali più impiegati nella realizzazione di protesi, ortesi, ausili per la mobilità grazie alle sue ottime proprietà meccaniche, combinate a biocompatibilità e leggerezza. I CFRP sono comunemente accoppiati con parti metalliche mediante incollaggio o giunti meccanici come viti e bulloni. A fronte dei limiti di tali giunti, viene progettata e testata una tecnica innovativa di giunzione metallo-CFRP, dove la parte metallica è realizzata tramite fabbricazione additiva. Ispirandosi ai giunti *co-cured*, il composito viene realizzato direttamente sul metallo con cui si interfaccia; l'innovazione è data dalle punte metalliche, distribuite sulla superficie a contatto con il composito, pensate per trattenere le fibre e aumentare la tenuta del giunto. Il progetto di tesi comprende la modellazione FEM di provini metallici accoppiati al materiale composito e la loro successiva fase di sperimentazione, nella quale si valuta lo scorrimento dei materiali lungo la superficie di contatto. Dagli ottimi risultati di tenuta del giunto, si procede con l'applicazione di tale tecnica di giunzione su un piede protesico, simulandola a taglio nelle principali fasi del cammino.

Introduzione

Questo progetto di tesi propone una nuova e innovativa tecnica di giunzione fra due particolari materiali, aventi diverse proprietà meccaniche: materiale composito, composto da una matrice di resina epossidica e una fase dispersa di fibre di carbonio, e metallo. La lavorazione, prendendo spunto dai giunti *co-cured* scoperti in letteratura, prevede la realizzazione del materiale composito direttamente sull'interfaccia della componente metallica così che, durante la fase di solidificazione del materiale composito, si vada a generare la giunzione metallo-composito. È presente una vasta gamma di applicazioni, non solo in ambito biomedico ma anche aeronautico, che vede questi due materiali interfacciati sfruttando le tradizionali tecniche di giunzione, tra le quali troviamo la saldatura o l'utilizzo di bulloni, rivetti e adesivi. L'esigenza di progettare questa nuova tecnica di giunzione nasce proprio dai limiti riscontrati nelle tecniche di giunto tradizionali, appena citate, le quali possono portare alla formazione di zone di concentrazione degli sforzi fino al raggiungimento di cricche e cedimento lungo l'interfaccia.

Introduzione

La produzione dei singoli materiali, protagonisti del giunto, comporta per il metallo l'utilizzo della metodologia di *additive manufacturing*, grazie alla collaborazione dell'azienda Renishaw, la quale ha reso possibile la realizzazione di 42 differenti provini di Inconel625, sei per ogni tipologia. La peculiarità dei provini sta nelle diverse geometrie di punte metalliche, collocate nella zona di interfaccia tra i due materiali, pensate per aumentare l'adesione e la tenuta della giunzione stessa. Per quanto, invece, concerne la parte di modellazione, viene utilizzato il software Ansys per le simulazioni numeriche di modelli CAD che riprendono le geometrie dei vari provini, interfacciati con materiale composito realizzato in laboratorio, per valutare proprietà meccaniche caratteristiche del giunto così fatto. Tutti i dati raccolti dalle simulazioni verranno sempre posti a confronto con gli andamenti sperimentali, ottenuti ponendo in trazione il modello di giunzione metallo-composito in un'apposita macchina a trazione, presente in laboratorio; con carichi via via crescenti si giunge al carico massimo di rottura del giunto. Prendendo come riferimento il caso sperimentale, viene realizzato un modello numerico, denominato *modello a tre volumi*, in grado di simulare il comportamento meccanico a trazione della giunzione ideata. Tale modello verrà, successivamente, utilizzato per simulare un piede protesico, scelto come applicazione del giunto; iniziando con la realizzazione del CAD e concludendo con le simulazioni numeriche si andrà a verificare la tenuta del giunto metallo-composito su un componente biomedico di uso commerciale.

La tesi si compone di cinque capitoli, ognuno dei quali si incentra sulle diverse fasi di progettazione numerica e sperimentale che hanno caratterizzato l'intero percorso.

Introduzione

Si parte con un primo capitolo contenente la descrizione dettagliata dei materiali protagonisti, materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio e Inconel625, per poi incentrarsi sulle tecniche adottate ovvero l'*additive manufacturing*, con particolare attenzione alla tecnica, utilizzata dall'azienda Renishaw, del *selective laser melting*. Una volta esposti i concetti base, si passa ad un quadro complessivo delle tecniche tradizionali, adesivi, bulloni e saldatura, utilizzate per interfacciare i materiali appena descritti, elencando sia i vantaggi che i limiti che si riscontrano per ognuna di tali metodologie.

Il capitolo successivo, invece, riguarda la prima fase di modellazione del giunto: partendo dal modello CAD su Solidworks, si ottiene il file IGES corrispondente che viene importato su Ansys al fine di effettuarne le simulazioni numeriche. Vengono mostrate le diverse geometrie di punte, dalla più semplice a quella più articolata, allo scopo di trovare quella più prestante e aggrappante.

Il terzo capitolo comprende la fase sperimentale del progetto; nella prima parte si descrive la realizzazione dei provini metallici in azienda, in particolar modo le regole da seguire per poter stampare particolari geometrie sporgenti in additive. La seconda sezione si compone di tutti i passaggi caratteristici della costruzione del materiale composito in resina epossidica e tessuto in fibra di carbonio, dei tempi e degli attrezzi necessari all'ottenimento del componente solido.

Le prime prove di trazione in macchina vedono protagoniste delle lastre di materiale composito, dalle quali sarà possibile ricavare il valore di modulo di Young caratteristico di quel tipo di composito. Si prosegue con le prove sperimentali in macchina dei vari provini, la raccolta dei dati in appositi grafici forza-spostamento che ne descrivono il comportamento meccanico fino a scollamento totale del giunto.

Introduzione

Prendendo spunto dai risultati ottenuti sperimentalmente, il quarto capitolo si propone di realizzare un nuovo modello numerico, avente modulo elastico del composito appena ricavato. Si ottiene un modello a tre volumi, in cui la giunzione è rappresentata dalla percentuale in volume delle punte metalliche del provino e della componente in composito, al fine di alleggerire le simulazioni numeriche dei CAD contenenti le punte.

Grazie ad un modello semplificato come quello appena descritto, è stato possibile applicare la giunzione metallo-composito ad un particolare modello di piede protesico. La progettazione, dal modello CAD fino alle simulazioni, è inserita nel quinto capitolo insieme ad una breve introduzione su tale protesi e sui modelli da cui si prende spunto per il design finale scelto. L'analisi viene principalmente focalizzata sulla zona della sola giunzione, al fine di valutarne la corretta tenuta e le prestazioni meccaniche in questo specifico caso.

Capitolo 1

Materiali e tecniche di produzione

Questo capitolo si compone di una descrizione delle proprietà dei materiali utilizzati in questo lavoro di tesi. Partendo da un'introduzione generale dei materiali compositi, il discorso si incentra, principalmente, sui compositi a fibre di carbonio. A seguire, si ha una presentazione delle tecniche di produzione adottate. Viene descritto il campo dell'*Additive Manufacturing* (AM) e, nello specifico, la tecnica del *Selective Laser Melting* (SLM), il cui nome ufficiale da standard ISO è *Powder Bed Fusion- Laser Beam Metal* (PBF-LB/M); in questo progetto di tesi, per semplicità, si farà riferimento a tale tecnica con l'acronimo più comune di SLM. Si conclude con una esposizione generica delle tipologie di giunto utilizzate in campo ingegneristico, con particolare attenzione alla tecnica "*co-cured*", principale fonte di ispirazione per la progettazione dei giunti descritti in questo studio.

1.1 Materiali compositi

“Un materiale composito è, nella sua accezione più generale, qualunque tipo di materiale caratterizzato da una struttura non omogenea, costituita dall'insieme di due o più sostanze diverse, fisicamente separate e dotate di proprietà differenti.” [1]

È costituito da due fasi distinte: la prima, detta *matrice*, è omogenea e può essere costituita da materia plastica, metallica, ceramica o, nella grande maggioranza dei casi, polimerica; l'altra fase è dispersa, data da fibre o particelle, detta *rinforzo* o *carica*, alla quale viene affidato, solitamente, il compito di assicurare rigidità e resistenza meccanica. Due fasi così danno vita a un materiale con proprietà meccaniche elevatissime e massa volumica decisamente bassa. [1]

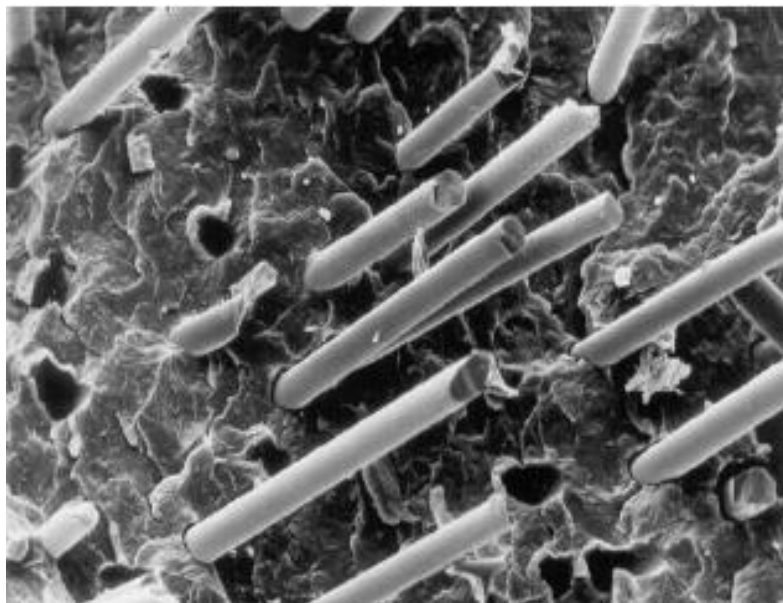


Fig.1.1. Esempio di un materiale composito con fibre [1]

Nel caso di fase dispersa data da fibre, è importante citare, però, un terzo componente che gioca un ruolo fondamentale nel dettare le prestazioni meccaniche complessive del composito: la zona di transizione fibra-matrice.

Talvolta, al fine di migliorare la compatibilità tra matrice e fibra, si riveste quest'ultima con un'interfase. Essa serve a rinforzare il legame fibra-matrice, evitando da una parte che la fibra vada a disperdersi nella matrice e, dall'altra, previene il contatto diretto fibra-fibra. [1]

In generale, dunque, i compositi sono materiali ortotropi e bifasici, ovvero aventi due fasi distinte solide, una rinforzante (fibre) e l'altra che funge da legante (matrice), evidenziando, inoltre, una spiccata anisotropia. [2] Con tale termine, si intende una variazione significativa sia delle proprietà elastiche sia di quelle di resistenza, nel caso in cui esse vengono misurate lungo differenti direzioni. [3] Tale anisotropia può essere sfruttata in quanto, con una disposizione delle fibre lungo la direzione del carico, si ottiene un'ottimizzazione della struttura. [2]

Al fine di migliorare ulteriormente le proprietà del composito, solitamente il materiale viene rinforzato tramite l'inserimento di fibre, lunghe o corte, particelle o mono-filamenti.

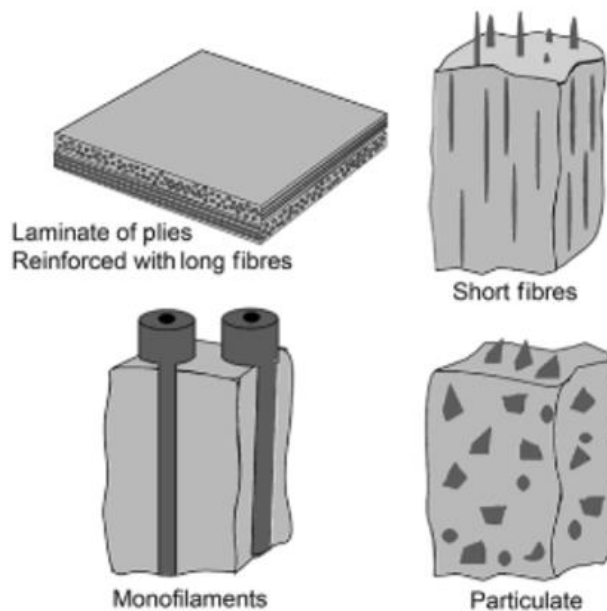


Fig.1.2. Illustrazione di varie tipologie di materiali compositi rinforzati [3]

Materiali e tecniche di produzione

Come mostrato in Figura 1.2, le fibre sono dei corpi solidi resistenti di forma allungata, aventi dimensione longitudinale che prevale su quella trasversale. Esse vengono inserite all'interno della matrice, le quali fungono da tessuto connettivo di riempimento tra le fibre. Inizialmente si ha una matrice allo stato viscoso che, successivamente, verrà solidificata per ottenere stabilità dimensionale e geometrica alla struttura finale. Si deduce, quindi, che, in generale, le matrici servono principalmente a trasferire i carichi, ovvero distribuiscono le sollecitazioni, proveniente dall'esterno, sulle fibre sotto forma di sollecitazioni interne. [2]

Diventa, dunque, fondamentale il ruolo delle fibre nella gestione dei carichi esterni in quanto esse possono fermare, rallentare o favorire la propagazione di un'eventuale cricca. Fattori che portano a un comportamento positivo o negativo delle fibre risiedono nell'estensione della superficie di contatto e nell'adesione fibra-matrice. In particolare, l'ideale è avere una superficie di contatto elevata rapportata alla sezione delle fibre e, quindi, un rapporto tra lunghezza e diametro della fibra deve essere alto, a volte superiore anche a 100. Motivo, questo, per cui le fibre lunghe rendono il composito più forte e resistente se confrontate a quelle corte, a parità del loro diametro. [2]

Al fine di aumentare la superficie di contatto, i fili vengono intessuti tra loro; si possono avere fili biassili, triassiali e a maglia ortogonale, come mostra la figura 1.3:

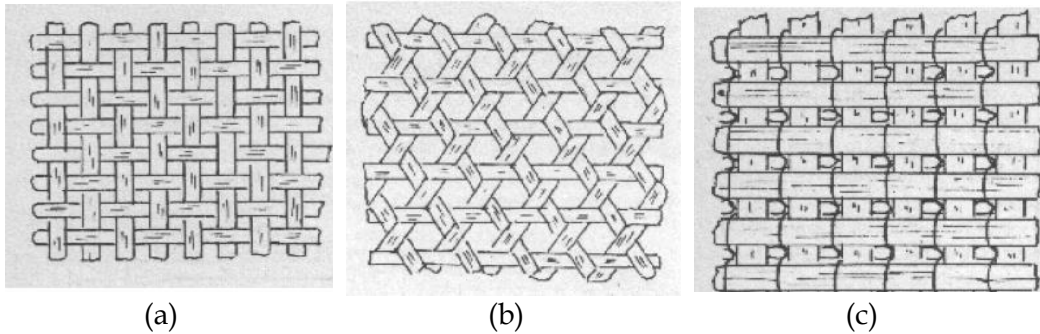


Fig.1.3. Illustrazione di fili biassiali (a), fili triassiali (b) e fili a maglia ortogonale (c) [2]

Il risultato finale è un tessuto dove le fibre sono disposte su di un unico piano; esse vengono tagliate e disposte secondo la trama scelta prima di entrare a contatto con la matrice allo stato fluido. Tale procedura è principalmente usata in caso di fibre di carbonio, vetro e kevlar. [2]

1.2 Materiali compositi in fibra di carbonio

“Nella scienza e tecnologia dei materiali, la fibra di carbonio è un materiale avente una struttura filiforme, molto sottile, realizzato in carbonio, utilizzato in genere nella realizzazione di una grande varietà di materiali compositi”. [4]



Fig.1.4. Illustrazione della fibra di carbonio [4]

“Per la realizzazione di strutture in composito le fibre di carbonio vengono dapprima intrecciate in veri e propri panni in tessuto di carbonio e una volta messi in posa vengono immersi nella matrice. Tra le caratteristiche della fibra di carbonio spiccano l'elevata resistenza meccanica, la bassa densità, la capacità di isolamento termico, resistenza a variazioni di temperatura e all'effetto di agenti

chimici, buone proprietà ignifughe. Di contro il materiale composito in fibre di carbonio risulta non omogeneo e presenta spesso una spiccata anisotropia, ovvero le sue caratteristiche meccaniche hanno una direzione privilegiata.” [4]

Analizzando nel dettaglio, la fibra di carbonio presenta una struttura simile a quella della grafite, costituita da aggregati di atomi di carbonio disposti in una struttura planare, seguendo la normale geometria esagonale. Queste fibre, inoltre, risultano inerti, a livello chimico, nei confronti di molte soluzioni acquose. [5]

La fibra di carbonio viene utilizzata principalmente per rinforzare materiali compositi, in particolare quelli con matrici polimeriche. In tali casi, quindi, le fibre vengono inserite per sopportare principalmente i carichi, fungono da barriera ai movimenti delle dislocazioni ed alla propagazione delle fratture all'interno della matrice e, infine, conferiscono rigidità al composito. [1] Ne consegue che alcune caratteristiche variano in seguito all'inserimento delle fibre; esse influenzano modulo e resistenza a trazione e compressione, densità, resistenza a fatica, conducibilità elettrica e termica e coefficiente di espansione del composito. Il massimo miglioramento di tutte queste proprietà del composito finale si ottiene con una distribuzione delle fibre di tipo uniforme, come mostrato in Figura 1.3 (a). [4]

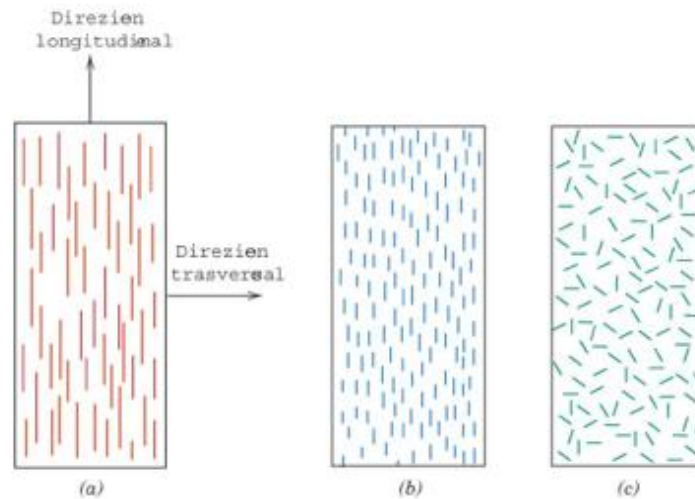


Fig.1.5. Illustrazioni di una distribuzione uniforme delle fibre nel composito (a), distribuzione discontinua e orientazione casuale delle fibre nel composito (b) (c) [4]

I materiali così ottenuti presentano elevata resistenza, leggerezza, basso costo e una certa valenza estetica. Per questi motivi, i materiali in fibra di carbonio sono ampiamente utilizzati in una molteplicità di aree in cui il peso e la resistenza meccanica dell'oggetto sono fattori decisivi o semplicemente per i prodotti di consumo con scopi estetici. La leggerezza di questi materiali trova ampio impiego persino nel campo sportivo, dove il peso inferiore dell'attrezzatura sportiva consente di aumentare la resistenza degli atleti; in particolare, questi materiali sono utilizzati nella costruzione di macchina da corsa, biciclette, canoe, protesi, caschi protettivi e rivestimenti per aeromobili. [5]

Tutte le caratteristiche precedentemente descritte, sono fortemente dipendenti dal modo in cui le fibre stesse vengono prodotte. Si possono, infatti, individuare due differenti tecniche, dalle quali si ottengono prodotti aventi un elevato modulo (*high modulus*) o un'elevata resistenza (*high strength*). L'utilizzo di un processo a basse temperature consente di avere un materiale meno denso, forte ma non molto rigido; un processo, invece, sviluppato ad alte temperature conferisce un'elevata densità e rigidità, accompagnate da una forte fragilità. [3]

Un esempio di materiale composito in fibra di carbonio è il polimero rinforzato con fibra di carbonio (CFRP). Tale materiale, però, in prossimità dei suoi limiti meccanici, arriva a delaminazione e frattura catastrofica. Si è, dunque, pensato di disporre le lamine di carbonio secondo una struttura bio-ispirata; lo scopo è quello di incrementare le prestazioni meccaniche e la durezza del composito finale rispetto al semplice inserimento unidirezionale delle lamine. Tale disposizione ha portato degli ottimi risultati in merito a duttilità e resistenza del composito ed è, inoltre, un processo automatizzabile tramite macchine che dispongono le lamine secondo una struttura a “mattoni e malta”. [6]

1.3 Additive Manufacturing (AM)

Con l'espressione “additive manufacturing” (AM) si intende l'insieme di processi di produzione di fabbricazione additiva partendo da modelli digitali, in contrapposizione alle tradizionali tecniche sottrattive (lavorazioni per asportazione di truciolo, taglio e foratura). Si parte da un modello CAD tridimensionale che viene suddiviso in strati da un software, integrato nel sistema di controllo della macchina, o da servizi on-line; lo schema di strati risultanti guida la stampante nella deposizione, o sinterizzazione, del materiale. La tecnologia non è una novità, da decenni viene adottata per la produzione di prototipi presso le aziende più grosse e innovative, ma negli ultimi anni, grazie anche alla scadenza di alcuni brevetti chiave, è crollato il costo delle stampanti, con una conseguente diffusione che cresce esponenzialmente. [7]

Un così ampio campo di applicazione deriva dagli innumerevoli vantaggi che risiedono in questa particolare tipologia di fabbricazione:

- non pone alcun limite sulla complessità geometrica;

Materiali e tecniche di produzione

- è applicabile ad un'ampia gamma di materiali come polimeri, metalli e potenzialmente anche ai materiali compositi;
- presenta minori scarti di materiale e costi contenuti (le polveri non utilizzate vengono riciclate per una successiva lavorazione);
- è data da un ciclo produttivo composto di un singolo passaggio;
- risulta particolarmente utile nei casi in cui sia necessario fabbricare un componente con un materiale poco lavorabile e con una geometria molto complessa;
- risulta utile se è necessario produrre pochi pezzi e per pezzi fatti su misura;
- evita i costi derivanti dall'impiego di stampi per produzioni in piccola serie;
- è caratterizzata da totale automatizzazione, produzione semplice e tempi, costi e inquinamento ambientale ridotti;
- garantisce buone proprietà meccaniche derivanti da un'eliminazione quasi totale della porosità residua con formazione di una microstruttura fine che aumenta la durezza e la resistenza meccanica. [8]

L'AM, però, presenta anche degli svantaggi che comprendono:

- produzione di componenti molto grandi limitata da considerazioni economiche e sulle prestazioni;
- limitata accuratezza dimensionale, ripetibilità dei processi, finitura superficiale e tempo di vita dei componenti;
- tolleranza dimensionale (tra 0,1 e 0,2 mm ogni 100 mm);
- costi elevati dei macchinari;
- tempi lunghi del ciclo produttivo che non permettono la produzione massiva di componenti;

- necessità spesso di lavorazioni successive per ottenere prodotti con le caratteristiche desiderate soprattutto a causa di una distribuzione non perfettamente omogenea della taglia delle particelle, di difficoltà di stesura delle polveri e della rugosità superficiale presente al termine del processo;
- presenza di tensioni residue: nel caso dell'additive manufacturing per metalli, le alte densità di energia messe in gioco dall'utilizzo del laser o di altre fonti energetiche comportano alti gradienti di temperatura e, dunque, tensioni residue non trascurabili che possono portare alla deformazione o all'infragilimento del pezzo. [8]

1.3.1 Additive Manufacturing per materiali metallici

Nel campo della metallurgia, la fabbricazione additiva ha trovato un ampio utilizzo. In questo caso, il materiale di partenza è dato da polveri metalliche, provenienti da un singolo componente o da polveri preallegate di una lega metallica o miscela di polveri con punti di fusione differenti. [8]

Tali polveri metalliche vengono sinterizzate o portate a parziale o totale fusione per mezzo di un fascio energetico concentrato, il quale può essere costituito da un fascio elettronico (EBM) o un fascio Laser (SLS, SLM, LENS): il primo risulta più efficiente dal punto di vista energetico rispetto al secondo, ma richiede un ambiente di lavoro sotto vuoto; un'ulteriore differenza sta nella precisione del fascio laser garantita dalla focalizzazione di una grande quantità di energia in una zona più ristretta. Esistono, inoltre, tre grandi categorie che racchiudono diversi sistemi di produzione additiva:

- *Sistemi a letto di polvere* → si genera un letto di polveri tramite rastrellazione di queste ultime. La fonte di calore sinterizza la superficie del letto, secondo la

geometria che si vuole ottenere. Terminato il primo, viene rastrellato un successivo strato di polvere fino all'ottenimento di un prodotto tridimensionale. Vantaggi di tale sistema risiedono nell'alta risoluzione e nell'ottimo controllo dimensionale; [9]

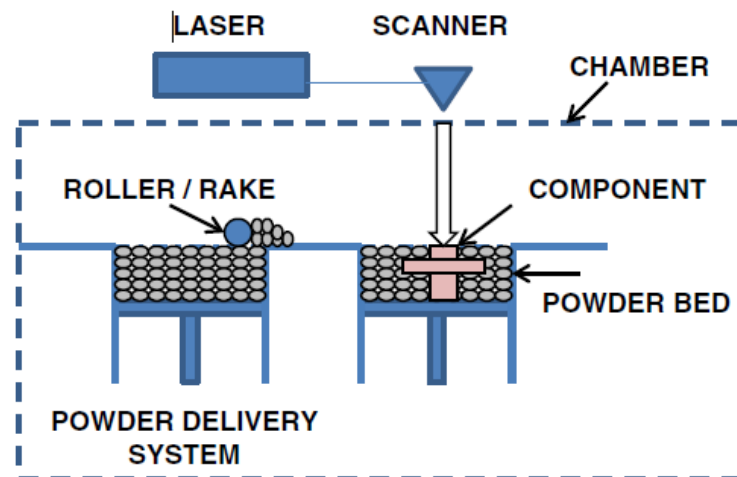


Fig.1.6. Illustrazione di un sistema a letto di polvere di AM [9]

- *Sistemi di alimentazione in polvere* → le polveri vengono convogliate, tramite un ugello, sulla superficie di costruzione. Un fascio laser viene utilizzato per sinterizzare uno o più strati, seguendo la geometria desiderata. Si possono avere due disposizioni differenti: l'ugello di deposizione mobile con il piano di costruzione fisso o viceversa. Tale sistema fornisce un volume di costruzione maggiore e un ampio utilizzo in caso di rinnovo di materiale usurati o danneggiati; [9]

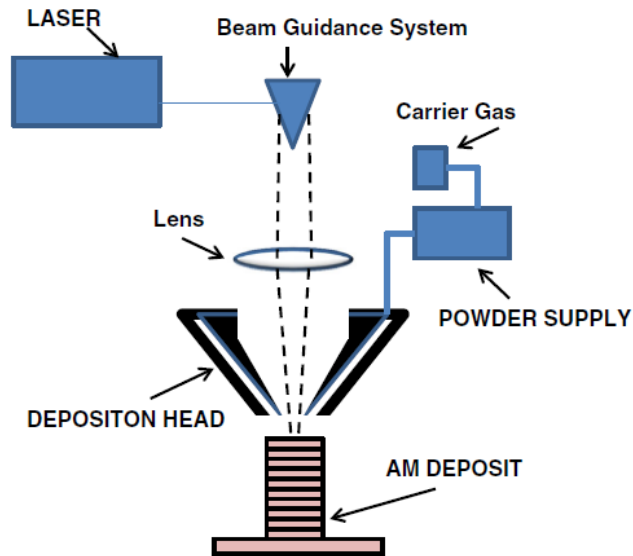


Fig.1.7. Illustrazione di un sistema di alimentazione in polvere di AM [9]

- *Sistemi di alimentazione a filo* → viene depositato un singolo tallone di materiale e, con passaggi successivi, viene costruita una struttura tridimensionale. In generale, i sistemi di alimentazione del filo sono adatti per l'elaborazione ad alta velocità di deposizione e hanno grandi volumi di costruzione; rispetto ai due sistemi precedenti, però, il prodotto fabbricato richiede solitamente una lavorazione più estesa. [9]

1.3.2 Additive Manufacturing combinata a materiali compositi

La combinazione di produzione additiva (AM) con compositi a base polimerica, rinforzati con fibra di carbonio, sblocca le potenzialità nella progettazione di strutture leggere per uso biomedico. Opportunità progettuali emergenti sono l'individuazione geometrica delle strutture utilizzando la libertà progettuale dell'additive manufacturing e il design individuale del paziente, sfruttando componenti caratterizzati da posizionamento di patch in fibra di carbonio. Ad oggi, tuttavia, il pieno sfruttamento di queste opportunità risulta un compito

parecchio complesso, che richiede un'elevata conoscenza e ingegneria per la progettazione, l'ottimizzazione e la produzione. [10]

In merito al campo di applicazione biomedico, è possibile menzionare dispositivi quali ortesi, protesi ed esoscheletri (OPE), i quali aiutano le persone con disabilità nella ripresa della loro locomozione. Per quanto riguarda i requisiti strutturali, è importante che i componenti forniscano alta resistenza e resistenza a basso peso. Produrre strutture biomediche economicamente valide implica un costo ridotto al minimo sia per progettazione che produzione. È proprio per raggiungere tale obiettivo che entra in gioco la fabbricazione additiva (AM), nota anche come stampa tridimensionale (3D). L'utilizzo della scansione 3D e dell'AM, in combinazione con un processo digitalizzato, consente di ridurre al minimo il design e di personalizzare un dispositivo OPE per ciascuno singolo paziente. Ad esempio, per le protesi del piede, la geometria degli arti è catturata attraverso la scansione 3D e, successivamente, i dati vengono convertiti in geometria di superficie; il componente viene progettato con un software CAD e quindi prodotto direttamente con AM. Nonostante AM sia una tecnica di fabbricazione che ha reso accessibili una grande quantità di dispositivi biomedici, le parti polimeriche fabbricate da AM mancano di durabilità e resistenza. Creare componenti più forti, possono essere impiegati polimeri rinforzati con fibre (FRP), come materiali ad alte prestazioni con resistenza e stabilità eccellenti rapporti resistenza-peso. Combinazione di materiali FRP con le possibilità di AM offre una serie di opportunità per la progettazione e la produzione di strutture leggere personalizzate e ad alte prestazioni. [10]

Tra i polimeri rinforzati da fibre, quelli di ampio utilizzo in campo biomedicale, sono i polimeri rinforzati da fibre di carbonio (CFRP). La produzione additiva e i

CFRP sono risultati essere due tecnologie complementari. AM consente la produzione diretta di elementi che possono sostenere carichi complessi, nonché complessità geometrica e personalizzazione. Dall'altra parte, invece, i CFRP eccellono per i loro eccezionali rapporti di rigidità e resistenza rispetto alla massa, estremamente ridotta. Grazie alla loro anisotropia e alla struttura a strati, i compositi rinforzati con fibra di carbonio sono inoltre adatti per adattare le strutture portanti alle esigenze meccaniche individuali. La personalizzazione del carico può essere ottenuta in modo molto efficiente, andando a variare il posizionamento delle patch in fibra, mirato a determinate zone di interesse. [11]

1.4 Selective Laser Melting (SLM)

Selective Laser Melting (SLM), il cui acronimo da standard ISO, oggi, è *Powder Bed Fusion- Laser Beam Metal* (PBF-LB/M), è una tecnologia di *additive manufacturing* a letto di polvere in cui le parti sono fabbricate, strato su strato, sfruttando l'azione di un raggio ad alta energia mirato a sinterizzare le polveri colpite. [12]

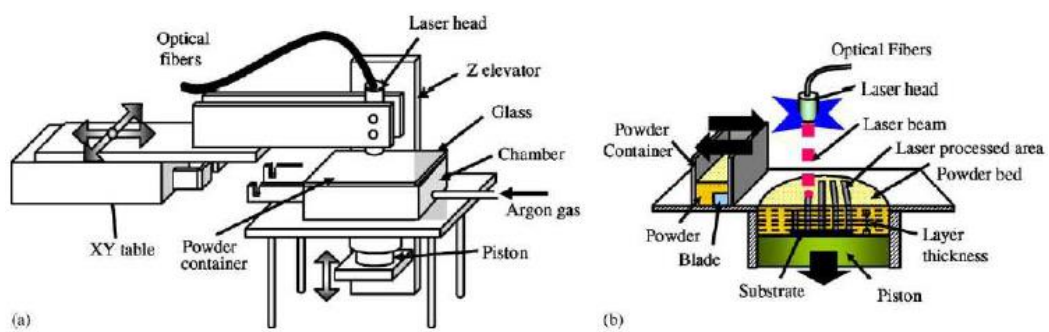


Fig.1.8. Presentazione di un'apparecchiatura SLM (a) e rappresentazione del processo (b) [8]

Come illustrato in Figura 1.4, le polveri vengono completamente fuse e solidificate in un'atmosfera controllata da un fascio laser con un valore medio di potenza di circa 50 W, mentre i picchi massimi arrivano a 3 kW; tale fascio laser, di circa 0,8

mm di diametro, viene guidato, lungo le direzioni x e y, attraverso un computer, seguendo il modello CAD fornito. Successivamente, un pistone d'acciaio si abbassa di un tratto pari allo spessore dello strato, lungo la direzione della profondità z, ogniqualvolta che uno strato di polvere viene correttamente sinterizzato. [8]

Questa tecnica di fabbricazione additiva si compone di un processo particolare:

1. creazione del modello 3D (CAD), ottenibile da apposito software o con la scansione 3D o tramite tomografia computerizzata;
2. il modello CAD viene convertito nel formato dei file *standard.stl*;
3. un algoritmo opportuno seziona in numerose fette parallele il modello;
4. le polveri vengono setacciate e posizionate all'interno della camera di produzione riempita di gas inerte (solitamente Argon) al fine di raggiungere una concentrazione di ossigeno inferiore al 0,1%;
5. il laser fonde le polveri per creare il primo strato con spessore che può variare da 15 a 150 μm . La focalizzazione del fascio è controllata da un sensore galvanometrico e il movimento del fascio è controllato tramite un sistema ottico;
6. una volta che il processo è iniziato la polvere metallica viene depositata per mezzo di una lama di acciaio inossidabile su una piattaforma preriscaldata tra 35°C e 90°C, in modo da attenuare i gradienti termici che si vengono a formare;
7. la deposizione e fusione delle polveri continua strato dopo strato, grazie all'abbassamento della piattaforma lungo la direzione z per la deposizione di un nuovo strato di polvere;

8. come ultimo step, si tira fuori, dalla camera di costruzione, la piattaforma di costruzione con sopra il prodotto e si inserisce in una fornace per effettuare un trattamento, che ha lo scopo di eliminare e diminuire le tensioni residue;
9. viene, infine, rimosso il supporto così il manufatto finale può essere utilizzato o sottoposto a specifici trattamenti superficiali. [13] [14]

Come tutte le tecniche di produzione, anche la SLM porta con sé degli aspetti negativi. Tra questi si può evidenziare la scarsa precisione dimensionale. Risultano, quindi, necessari dei trattamenti successivi di finitura del prodotto; aumenta il tempo complessivo necessario per la produzione del manufatto e si riduce la flessibilità. Una volta realizzato il pezzo, inoltre, si evidenziano degli stati di stress residui nel materiale, causati da rapide variazioni di temperatura e da eventuali trasformazioni di fase che avvengono durante il processo. Si tratta di tensioni di trazione o di compressione, localizzate in certe zone o distribuite su tutto il volume dell'oggetto che permangono durante tutta la fase di produzione del pezzo. Tali tensioni sono indesiderate in quanto possono introdurre deformazioni e micro-cricche nel componente finale e, se presenti in eccesso, riducono le prestazioni meccaniche globali. Molte di queste tensioni sono strettamente legate alle radiazioni laser, le quali sono in grado di produrre gradienti termici molto elevati, responsabili, a volte, di fusione localizzata. A tal proposito, è possibile distinguere due differenti meccanismi che causano l'insorgenza di tensioni residue nel materiale:

- la formazione di un forte gradiente di temperatura attorno al punto in cui il fascio energetico viene focalizzato. Accade che la superficie investita dal fascio energetico si scalda velocemente, ma la limitata conducibilità termica del materiale fa sì che lo strato sottostante si trovi ad una temperatura molto

inferiore; l'espansione termica dello strato surriscaldato è impedita dal vincolo posto dal materiale sottostante, perciò si generano tensioni di compressione sulla superficie e di trazione negli strati inferiori. Una volta raffreddato, il pezzo tende a flettersi dalla parte opposta rispetto al fascio energetico e se le tensioni superano la resistenza allo snervamento del materiale si genera deformazione plastica. Al raffreddamento, lo strato superficiale tende a restringersi, si generano stati di trazione negli strati superiori e di compressione in quelli sottostanti: il pezzo tende a flettersi verso il fascio energetico;

- la solidificazione del bagno fuso, per rapido raffreddamento, non appena il fascio energetico si allontana. Conseguentemente si ha formazione di tensioni di trazione nell'ultimo strato aggiunto in superficie e di compressione in quelli inferiori. I parametri che influiscono sul profilo finale delle tensioni residue sono: il numero di piani di cui è composto il campione, le dimensioni della piattaforma d'appoggio e le proprietà meccaniche del materiale, ossia il modulo elastico e il carico unitario di snervamento. Il processo produttivo può essere eseguito con modalità che consentono di ridurre il livello di tensioni residue introdotte, dopo la deposizione di un piano: per esempio si può preriscaldare il substrato per ridurre il gradiente di temperatura che si forma durante la sinterizzazione, oppure, eseguire, dopo la scansione di ogni piano, un trattamento termico successivo utilizzando il fascio energetico ad un valore di potenza ridotto. [8]

1.4.1 SLM per Inconel

“L’Inconel (IN) è una lega, principalmente a base di Nichel (48%-72%) e Cromo (14%-29%). Presenta un’ottima resistenza all’ossidazione alle alte temperature ed alla corrosione; per queste sue caratteristiche viene impiegato in parti di turbine a gas, nel settore petrolifero (per esempio per il rivestimento interno dei tubi), negli inceneritori di rifiuti RSU/industriali tossico-nocivi, per la protezione dei tubi di caldaia a recupero, fissato con saldatura o con *termal spray*, per la realizzazione delle scatole nere degli aerei e nell’industria chimica.” [4]

È possibile distinguere due tipologie di Inconel: Inconel 625 e Inconel 718. Il primo materiale si differenzia per un’alta resistenza all’usura e alla rottura, ottima tolleranza a stress meccanici, anche se inseriti in ambienti tendenti all’ossidazione. Inconel 718, invece, è più adatto ad applicazioni che prevedono ambienti ad alte temperature come, ad esempio, turbine a gas o impianti industriali. [15]

Grazie alle sue caratteristiche, l’Inconel si presta bene in diversi campi di applicazione differenti e, in alcuni di questi casi, i pezzi vengono prodotti tramite *Selective Laser Melting*.

In merito a questa tecnica di fabbricazione, l’Inconel 718 si distingue dagli altri materiali per la sua rapida solidificazione. D’altra parte, però, si riscontra una certa fragilità, derivante proprio dalla produzione tramite SLM; essa si aggiunge agli svantaggi tipici del materiale, quali: porosità, stress residui e presenza di parti relativamente ruvide. [16]

A tal proposito, sono stati effettuati alcuni studi riguardanti l’influenza dell’angolo di inclinazione sulla risposta a trazione e alla corrosione di campioni di Inconel 718, realizzati tramite SLM. In particolare, si è visto come, variando l’orientazione utilizzata per depositare il materiale sulla piattaforma di

costruzione, si ottengano performance, a livello meccanico, differenti nel prodotto finale. Si deduce, pertanto, una forte dipendenza tra angolo di inclinazione per la deposizione del materiale sulla piattaforma ed eventuali anisotropie nella microstruttura, tra cui rugosità superficiale e resistenza a corrosione. Nello specifico, gli esiti mostrano, anche, che il comportamento meccanico dipende dall'orientamento del campione: in caso di inclinazione angolare più elevata, il campione mostra una maggiore resistenza allo snervamento e sia la massima trazione che la forza aumentano con l'aumentare dell'angolo di costruzione, mentre l'allungamento rimane relativamente invariato. [17]

1.5 Giunzione metallo-materiale composito

Il tema principale di questo studio di tesi è l'analisi numerica e sperimentale di giunti che prevedono l'interfacciarsi di materiale composito in fibra di carbonio con un componente metallico, dato da Inconel. Partendo da una visione ancora più generale, un giunto nasce dal bisogno di unire più parti per ottenere un'unica struttura, nella quale esso ha il compito di trasferire un carico da una parte all'altra di uno stesso componente, garantendo la rigidità di quest'ultimo anche se dato da più parti. Esistono diverse tipologie di giunti, classificabili a seconda delle modalità e tecniche con cui vengono ottenuti:

- Giunti saldati: la saldatura è un processo che prevede l'unione di materiali tramite l'azione combinata di riscaldamento e pressione. Tale tecnica è usata solo per unire materiali metallici e nei punti di saldatura, portati a fusione e poi raffreddati, si registrano proprietà meccaniche finali diverse dal resto del componente;

- Giunti imbullonati e rivettati: nel primo caso, il giunto comprende un bullone che comprime tra di loro le sue superfici a contatto, impedendone lo scorrimento relativo. Il suo vantaggio risiede nella facilità di smontare e rimontare il giunto senza rovinarlo. La rivettatura, invece, avviene tramite un cilindro metallico che presenta ad un'estremità una testa; è un giunto non smontabile, per tanto per poterlo disassemblare è necessaria la rottura stessa del rivetto. In entrambi i giunti, è possibile unire materiali anche molto diversi fra loro ma, con lo svantaggio, di registrare elevati sforzi localizzati in corrispondenza dei fori; questi risultano particolarmente critici in caso di materiali compositi, in quanto, causano una discontinuità fibrosa;
- Giunti incollati: l'unione prevede l'utilizzo di un adesivo. Grazie ad esso, si hanno estese superfici di giunzione, non è necessaria la realizzazione di fori e la trasmissione, quindi, dei carichi avviene in maniera graduale su tutto il giunto. [18]

In generale, per il collegamento di materiali con nature diverse, si preferiscono le tecniche di giunzione continua, saldatura e incollaggio, rispetto a quelle discontinue, come bullonatura e rivettatura. Escludendo la saldatura, in quanto non adatta ai materiali compositi, l'incollaggio risulta avere un vasto utilizzo nel campo ingegneristico e, nello specifico, nei giunti metallo-composito. A tal proposito, secondo le normative ASTM, un adesivo è definito come "una sostanza in grado di tenere assieme i materiali in maniera funzionale tramite l'adesione superficiale". Tale adesione può avvenire tramite svariati meccanismi, alcuni di origine elettrostatica o meccanica, ma più, frequentemente, dati dalla formazione di legami chimici. Tutto ciò

conferisce ai giunti incollati delle prestazioni funzionali superiori a quelle delle altre tecniche concorrenti, come, ad esempio:

- Possibilità di adesione di materiali di qualsiasi spessore, anche molto sottili;
- Ampia superficie di incollaggio con conseguente capacità di trasferimento di carichi anche molto elevati;
- Minimizzazione delle concentrazioni di sforzo grazie all'assenza di discontinuità sulla superficie del giunto;
- Bassa invasività derivante dall'aerodinamicità dell'adesivo;
- Isolamento termico ed elettrico in caso di adesivi di natura polimerica;
- Minimizzazione dei fenomeni di corrosione galvanica tra materiali dissimili, smorzamento delle vibrazioni e miglioramento del comportamento a fatica del giunto stesso;
- Indipendenza del costo del giunto dall'estensione delle sue superfici.

Come ogni giunto, però, ci sono degli aspetti negativi su cui porre attenzione per avere una visione completa dell'incollaggio tra due aderenti. Tra gli svantaggi, possiamo evidenziare:

- Accurate e, talvolta, complessa preparazione delle superfici, prima dell'incollaggio;
- Complessità relativa all'analisi strutturale in caso di applicazioni critiche o aventi geometria complessa;
- Forte dipendenza della durata del giunto dalle condizioni ambientali esterne, come temperatura e percentuale di umidità;
- Sensibilità elevata degli adesivi all'attacco chimico di alcuni solventi e a quello da parte di funghi e batteri; [19]

Il rischio più grande, per ogni tipologia di giunto, è che questo possa cedere. Nel caso specifico di giunto incollato, è importante chiarire la tipologia di cedimento:

- Coesivo, ovvero interno allo strato di incollaggio;
- Adesivo, cioè localizzato all'interfaccia tra adesivo e aderenti.

Il cedimento di tipo adesivo è da ricondurre, principalmente, a una preparazione delle superfici degli aderenti non ben eseguita. Si può, ad ogni modo, porre rimedio ad un giunto ceduto tramite riparazione sul campo; il risultato è che le prestazioni meccaniche finali non saranno pari a quelle precedenti alla rottura, a causa di processi, legati alla riparazione stessa, che non risultano ottimali. Entrando nel merito dei giunti metallo-composito, si è visto che uno dei problemi principali che affligge i materiali compositi in fibra di carbonio è l'assemblaggio con leghe metalliche di uso comune nel campo ingegneristico. Il motivo di ciò è da ricondurre alla differente posizione assunta dai due aderenti nella scala dei potenziali elettrochimici; si genera, infatti, una cella galvanica ogni volta che il giunto, così fatto, entra in contatto con un qualsiasi tipo di elettrolita, dato, ad esempio, dalla percentuale di umidità nell'aria circostante. Il risultato è che il carbonio, presente all'estremità catodica della scala delle elettronegatività, non arriva a corrodersi, come un metallo nobile, accelerando, però, la corrosione del metallo con il quale si interfaccia nel giunto. Una soluzione a ciò è data dall'utilizzo di leghe in titanio e acciai inossidabili per costruire giunti con materiali compositi in fibra di carbonio. [19]

1.5.1 Giunti co-cured

Tra le tecniche per la realizzazione dei giunti che comprendono aderenti in materiale composito, è possibile descriverne una più innovativa che va ad

affiancarsi a quella tradizionale, che prevede l'incollaggio tramite un adesivo. Tale tecnica innovativa genera i cosiddetti "*giunti co-cured*" e nasce in campo aeronautico, dove le giunzioni ibride metallo/composito hanno largo impiego. Essi prevedono la creazione del composito simultanea alla realizzazione del giunto in quanto è la resina stessa del materiale a fungere da legante tra il composito e il suo aderente. Tra i vantaggi che è possibile sottolineare di questa metodologia di giunto è l'eliminazione del trattamento superficiale del composito, precedente all'inserimento dell'adesivo, in quanto di fatto non esiste più un'interfaccia netta che separi l'adesivo, la resina, e il materiale composito. Essendo la resina l'unica responsabile della giunzione, l'ordine di grandezza di tale adesivo è solo di 10 μm , nettamente inferiore a quello registrato con un classico adesivo per incollaggio tradizionale. Diversi studi sono stati effettuati nel corso degli anni per comprendere al meglio le peculiarità di una giunzione del genere. Testando a trazione provini a gradino a semplice sovrapposizione a gradino, ad esempio, si è evidenziata la forte dipendenza della resistenza statica e di quella a fatica del giunto dalla lunghezza di sovrapposizione del gradino. All'aumentare di tale lunghezza, si ha un accrescimento della resistenza del giunto; relazione che si registra anche nei giunti incollati in modo classico. A livello di simulazione numerica, invece, ulteriori studi hanno confrontato i risultati derivanti da provini a semplice sovrapposizione, sottoposti a carico di trazione, con quelli aventi doppia sovrapposizione. Lo stato tensionale all'interfaccia tra gli aderenti del giunto co-cured ha evidenziato delle differenze di comportamento tra le due tipologie di provini: nel caso di singola sovrapposizione, le tensioni normali e di taglio all'interfaccia sono le principali cause di rottura all'interfaccia; mentre, per quanto concerne i provini con doppia

Materiali e tecniche di produzione

sovrapposizione, la rottura avviene principalmente con meccanismo coesivo, tramite delaminazione della prima lamina dell'aderendo composito. [20]

Capitolo 2

Progettazione dei modelli

In questo capitolo viene presentato il lavoro di modellazione agli elementi finiti del modello realizzato, al fine di valutare la tenuta del giunto metallo-composito. Si parte dal testare la tenuta della sola resina epossidica sul materiale metallico, andando a variare la geometria delle punte del provino stesso. Vengono descritti dei metodi di alleggerimento del mesh, che verranno poi sfruttati per il secondo lavoro di modellazione, quello relativo alla tenuta dell'intero composito sul provino metallico. Tutti i dati raccolti dalle varie simulazioni, utili alla comprensione del percorso, sono inseriti in apposite tabelle e grafici.

2.1 Simulazione della tenuta della resina sul metallo

I materiali protagonisti di questo progetto di tesi sono tre: lega metallica composta da Inconel625, resina epossidica e un materiale composito con matrice di resina epossidica e fase dispersa di fibre di carbonio, intrecciate a tessuto.

Prendendo spunto dalla tecnica dei giunti *co-cured*, descritta nel paragrafo 1.5.1, si è partiti dall'analizzare la tenuta della sola resina tra il composito in fibra di carbonio e il provino metallico. A tale scopo, si è proceduto simulando la resina come un volume separato, rispetto ai due aderenti, così da poterne valutare la forza adesiva.

2.1.1 Creazione del modello

Per procedere con l'analisi, si è ideato un modello, la cui struttura potesse fornire risultati indicativi della tenuta della resina sul metallo, senza l'aggiunta o l'influenza di fattori esterni non desiderati.

Di seguito vengono riportate delle immagini illustrative del modello CAD tridimensionale, nel caso di provino metallico liscio, realizzato tramite il software Solidworks.

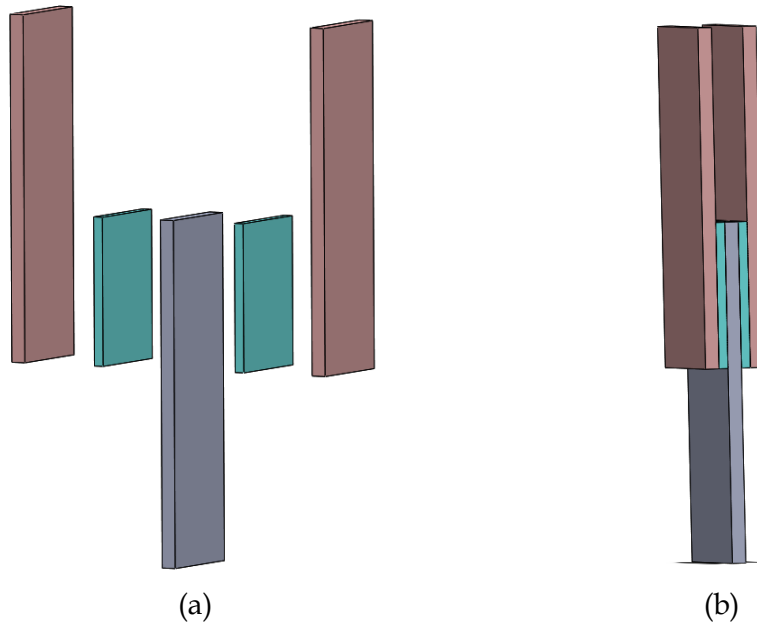


Fig.2.1. Schermata della vista esplosa dei volumi dell'intero modello liscio (a) e dell'assieme dei volumi del modello liscio (b) su Solidworks

Come si può osservare dall'immagine sopra, il modello consta di tre volumi separati: composito in fibra di carbonio (volume marrone), resina epossidica (volume azzurro) e provino metallico (volume grigio), il tutto strutturato in un modello simmetrico rispetto al provino stesso. La scelta di inserire punte metalliche e composito doppi risiede nel fatto che, se si ponesse in trazione solo la metà del modello, si andrebbe incontro a un momento flettente tra composito e metallo, generato dalla reazione vincolare sugli incastri alla base e dalla forza distribuita sulla superficie superiore del composito. Ciò, come già preannunciato in precedenza, rappresenta un fattore che influenzerebbe i risultati ottenuti dopo la messa in trazione del modello. Con il modello intero e simmetrico, invece, l'effetto del momento flettente viene automaticamente annullato, rendendo la trazione l'unica responsabile delle sollecitazioni subite dal giunto composito-metallo.

Per comprendere meglio tale progettazione, si sono ideate diverse geometrie di punte, finalizzate ad aggrappare più composito possibile, essendo questo

costituito da un tessuto intrecciato di fibre di carbonio. La prima geometria, considerata come punto di partenza, prevede un modello liscio, quindi privo di punte, che serve per la valutazione dell'efficacia o meno delle punte stesse. Si sono, successivamente, realizzate due tipologie di punte: la prima a forma di parallelepipedo e la seconda piramidale. Si riportano delle immagini illustrative delle tre geometrie descritte:

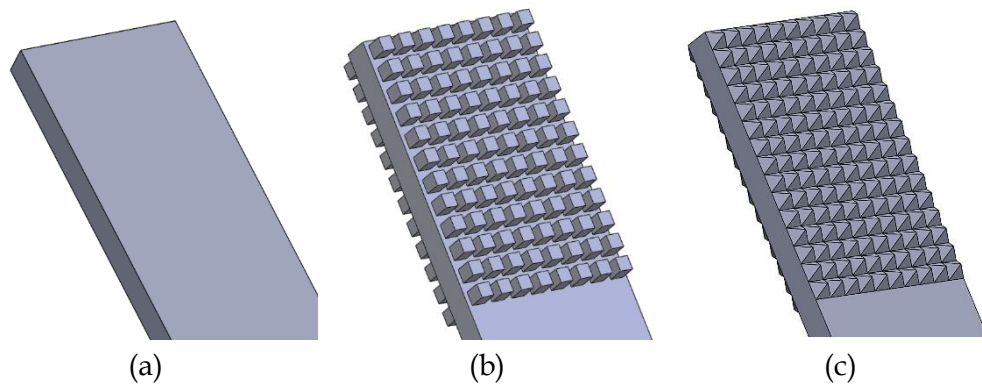
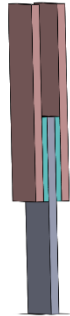


Fig.2.1. Rappresentazioni del provino liscio (a), provino con parallelepipedi (b) e provino con piramidi a base 2 mm(c)

Per analizzare la tenuta a trazione della resina sulla superficie metallica si è effettuata una simulazione FEM utilizzando il software ANSYS. La geometria è stata costruita utilizzando uno dei software più comuni nel campo della modellazione di oggetti tridimensionali, Solidworks, e, successivamente, importata su ANSYS in formato *file.IGES*, per la simulazione.

Il modello è stato sottoposto ad un carico di 1000 N, distribuito sulla superficie superiore del composito, ed è stato incastrato alla base in corrispondenza del metallo. Si è poi proceduto con il mesh dei vari volumi utilizzando elementi tetraedrici, solid92, e con l'imposizione di carichi e vincoli. A questo punto si è passati alla fase di postprocessing, dove viene elaborata e rappresentata la soluzione, per valutare le tensioni, le deformazioni e gli spostamenti che si

registrano sul provino. Il modello è composto da 5 diversi volumi, le cui caratteristiche meccaniche, usate per l'analisi, vengono riportate nella seguente tabella:

Componente	Materiale	E [MPa]	Dimensioni [mm]	ν	
Grigio	Inconel625 non trattato termicamente	180000	70x20x3	0.3	
Azzurro	Resina epossidica	3000	30x20x2.5	0.3	
Marrone	Composito in fibra di carbonio	100000	70x20x3	0.3	

Tab.2.1. Proprietà meccaniche dei materiali del modello

È importante sottolineare che, in queste prime simulazioni, tutti i materiali coinvolti nel modello sono stati trattati come materiali elastici lineari e isotropi, ovvero le caratteristiche, sopra riportate, risultano costanti in tutte le direzioni. Si tratta di un'assunzione forte, che verrà rivalutata nelle ultime simulazioni di questo lavoro. Si effettua, inoltre, un'analisi di tipo statica perché questo progetto di tesi è incentrato sulle prime considerazioni dei giunti metallo-composito, i quali, se risulteranno validi per lo scopo, saranno oggetto di analisi dinamiche e di altri studi più complessi.

2.1.2 Studio della convergenza

Nella teoria della modellazione agli elementi finiti si è soliti sapere che un mesh più fitto, ovvero costituito da elementi finiti di dimensioni minori, genera una soluzione più accurata. Al tempo stesso, però, l'affinamento del mesh aumenta notevolmente il tempo necessario all'elaborazione dei dati. Un metodo per

bilanciare efficacemente tempistiche di elaborazione e precisione dei risultati è dato dallo studio della convergenza del mesh. [21]

A tal fine, si sono effettuate simulazioni con diverse dimensioni dell'elemento a dieci nodi, solid92, partendo da valori di 10 mm fino a 1.25 mm, garantendo sempre un mesh che fosse auto-contenuto, dove, cioè, gli elementi della simulazione precedente vengono conservati in quella successiva, aggiungendone degli altri.

Non è stato possibile procedere con mesh ancora più fitti poiché la licenza di Ansys per studenti, offerta dal Politecnico di Torino, presenta dei limiti sul numero di elementi finiti e, con valori di lato inferiori a 1.25, si eccede il valore massimo concesso. Le simulazioni sono state effettuate anche con un altro elemento, solid187, tetraedrico a 10 nodi, al fine di confrontare le prestazioni con solid92. Non essendosi registrate notevoli differenze, la scelta, dunque, è ricaduta su solid92 e i risultati, che verranno trascritti di seguito, sono tutti derivanti da simulazioni con mesh di tale elemento.

I modelli presi per tale analisi sono i provini con punte a parallelepipedo, a piramide con base di 2 mm ed il provino liscio. Per ogni simulazione, si registrano i valori di spostamento lungo la direzione y del carico, di tensione massima di Von Mises, il numero di nodi totali e il PRERR. Si sono scelti queste grandezze per valutare, durante il processo di *fitting*, la convergenza a un valore pressoché costante, al quale corrisponderà la dimensione ottimale della mesh.

I valori ottenuti per ogni grandezza sono riportati nelle tabelle seguenti, facendo una distinzione in base alla tipologia di punte del provino metallico.

PROVINO LISCIO				
Dimensione mesh [mm]	Numero dei nodi	Spostamento [mm]	Tensione di Von Mises [MPa]	PRERR [%]
10	1361	4.3482e-03	21.28	15.72
5	3498	4.3667e-03	23.55	11.63
2.5	12711	4.3762e-03	25.96	9.42
1.25	92666	4.3899e-03	31.82	6.37

Tab.2.2. Convergenza provino liscio

PUNTE PIRAMIDALI				
Dimensione mesh [mm]	Numero dei nodi	Spostamento [mm]	Tensione di Von Mises [MPa]	PRERR [%]
10	4877	4.37E-03	23.23	14.65
5	6630	4.37E-03	24.88	11.19
2.5	14595	4.38E-03	25.24	9.17
1.25	200566	4.42E-03	31.86	5.78

Tab.2.3. Convergenza provino con punte piramidali

PUNTE PARALLELEPIPEDI				
Dimensione mesh [mm]	Numero dei nodi	Spostamento [mm]	Tensione di Von Mises [MPa]	PRERR [%]
10	mesh troppo grossolana, non è possibile procedere			
5	27911	4.3387e-03	32.97	12.51%
2.5	34868	4.3446e-03	31.62	9.36%
1.25	173781	4.3657e-03	29.01	7.09%

Tab.2.4. Convergenza provino con punte a parallelepipedo

Dalle tabelle, si può notare come, per dimensioni inferiori di solid92, le grandezze analizzate tendano ad avvicinarsi ad un valore pressochè costante, con livelli d'errore percentuale, PRERR, sempre più bassi. Per una visione più completa di tale convergenza, si sono riportati i dati su dei grafici, in modo da illustrare separatamente l'andamento di spostamento lungo la direzione del carico y, tensioni di Von Mises ed errore percentuale, PRERR.

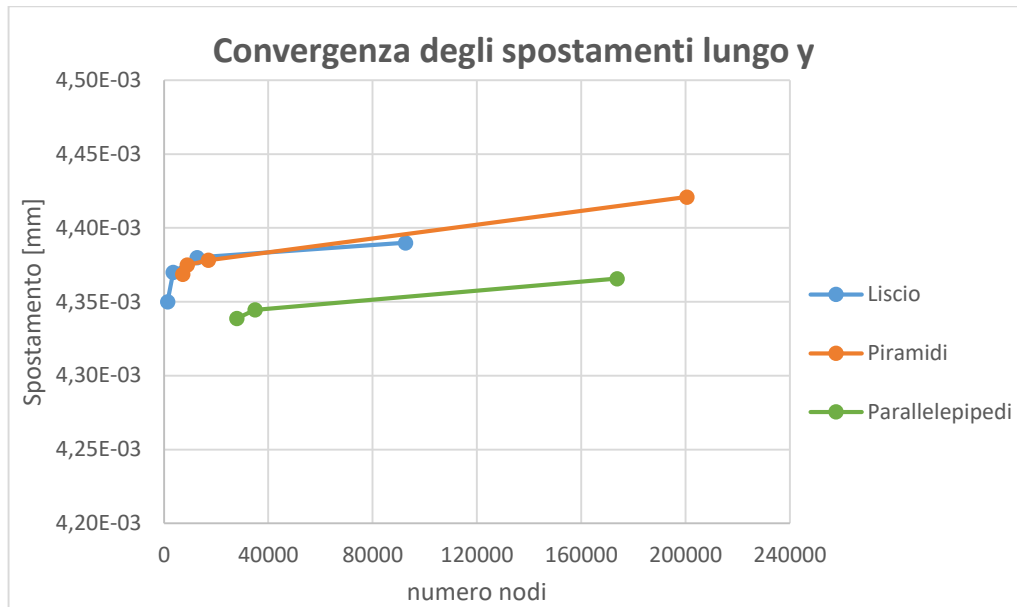


Fig.2.3. Grafico della convergenza degli spostamenti su y

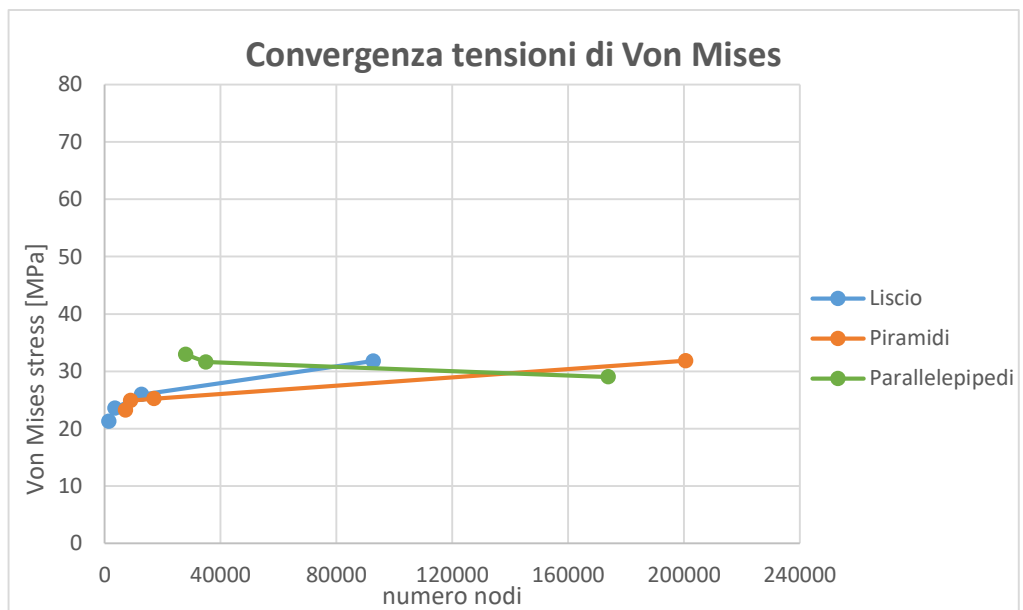


Fig.2.4. Grafico convergenza delle tensioni di Von Mises

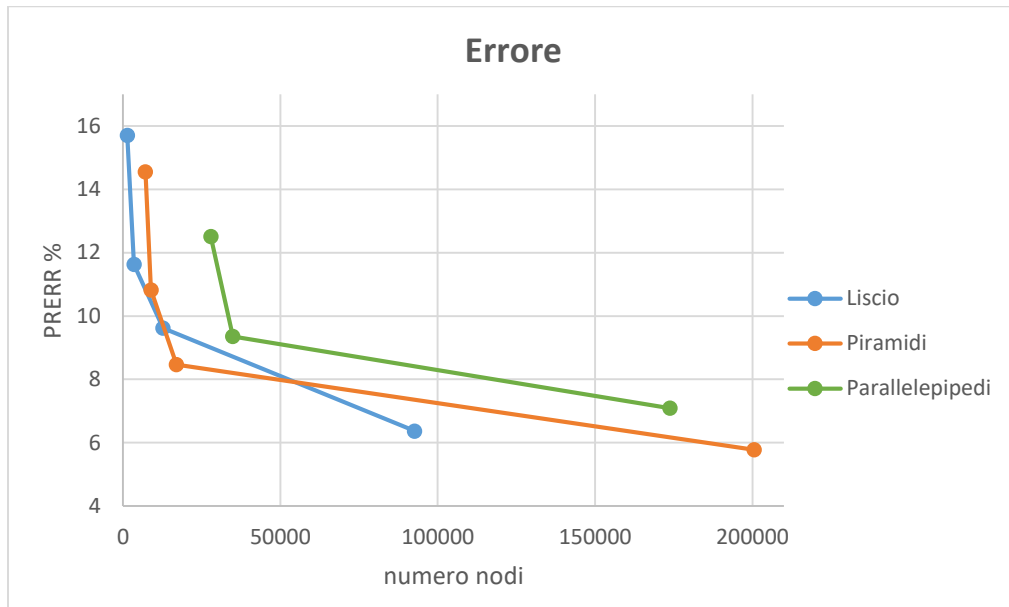


Fig.2.5. Grafico convergenza dell'errore

Dai grafici sopra riportati si deduce che, per le tre tipologie di provini, la convergenza viene raggiunta con mesh con elementi solid92 di lato 1.25 mm. A fronte di ciò, si è scelto di utilizzare questa dimensione per gli elementi del mesh usato nelle successive simulazioni.

2.1.3 Ottimizzazione della geometria

Stimata la dimensione ottimale dell'elemento finito, si è passati alla valutazione della tenuta adesiva della resina tra i due aderenti. Si è scelto di tenere traccia, come grandezze indicative della tenuta, le tensioni di Von Mises, le deformazioni di Von Mises e lo sforzo a taglio sul piano parallelo alla direzione del carico. Per un confronto più corposo, si sono aggiunte alle tre geometrie già realizzate, altre due: piramidi con base quadrata di 2.5 mm per ottenere lo stesso numero di punte degli altri provini perché con il lato di 2 mm si ottengono più piramidi; la seconda forma nasce dall'unione di piramidi e parallelepipedi ed è rappresentata da dei tronchi di piramide a base quadrata.

Per completezza si inseriscono le immagini delle due nuove geometrie:

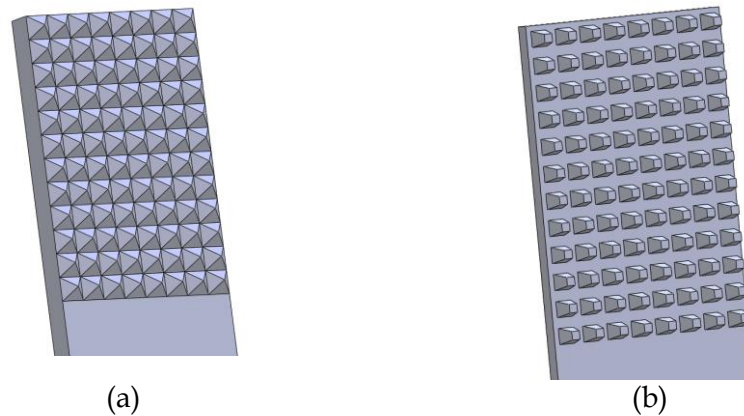


Fig.2.6. Rappresentazioni del provino a punte piramidali a base 2.5 mm (a) e punte a tronco di piramide (b)

Il sistema di carichi e vincoli è il medesimo usato per la convergenza: incastri alla base del metallo e forza di 1000 N distribuita sulla base superiore del composito. Per la valutazione delle grandezze, si considera solo la resina del lato sinistro in quanto, a livello tensionale, non si sono riscontrati grandi differenze con la parte di destra, ad essa simmetrica.

L'analisi viene effettuata confrontando i valori massimi delle varie grandezze sulla resina, poiché essi si registrano tutti nella medesima zona.

Grazie a questa similitudine, si riportano solo gli andamenti relativi alla geometria dei parallelepipedi, per dare un'idea delle distribuzioni di tensione, deformazione e sforzo di taglio sulla resina.

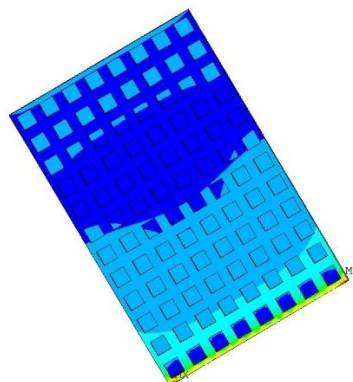


Fig.2.7. Distribuzione delle tensioni di Von Mises sulla resina con punte a parallelepipedo

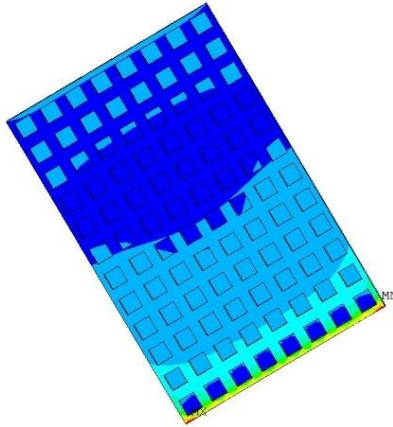


Fig.2.8. Distribuzione della deformata di Von Mises sulla resina con punte a parallelepipedo

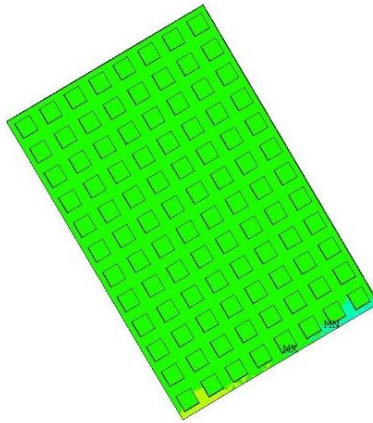


Fig.2.9. Distribuzione dello sforzo di taglio su YZ sulla resina con punte a parallelepipedo

Dalle immagini, sopra riportate, si possono notare due aspetti: il primo è che la distribuzione, come ci si poteva aspettare dalla teoria, della deformata di Von Mises è uguale a quella delle tensioni; il secondo aspetto è dato dalla distribuzione uniforme e costante del taglio su tutto il volume di resina.

Nel campo delle simulazioni numeriche agli elementi finiti, un aspetto su cui porre attenzione è che un valore puntuale di una grandezza può derivare da un artefatto, legato al tipo di impostazione assunta per la simulazione stessa. Altrimenti si potrebbe provare ad infittire ulteriormente il mesh per vedere se tale valore massimo compare in più elementi adiacenti, ovvero se esso si distribuisce

Progettazione dei modelli

maggiormente; in questo caso si potrà considerare tale valore come massimo, risultando sicuramente più realistico.

Si sono riportati i valori massimi di tensione, deformata e sforzo a taglio, per ogni tipologia di modello, in un istogramma per ottenere un confronto più immediato:

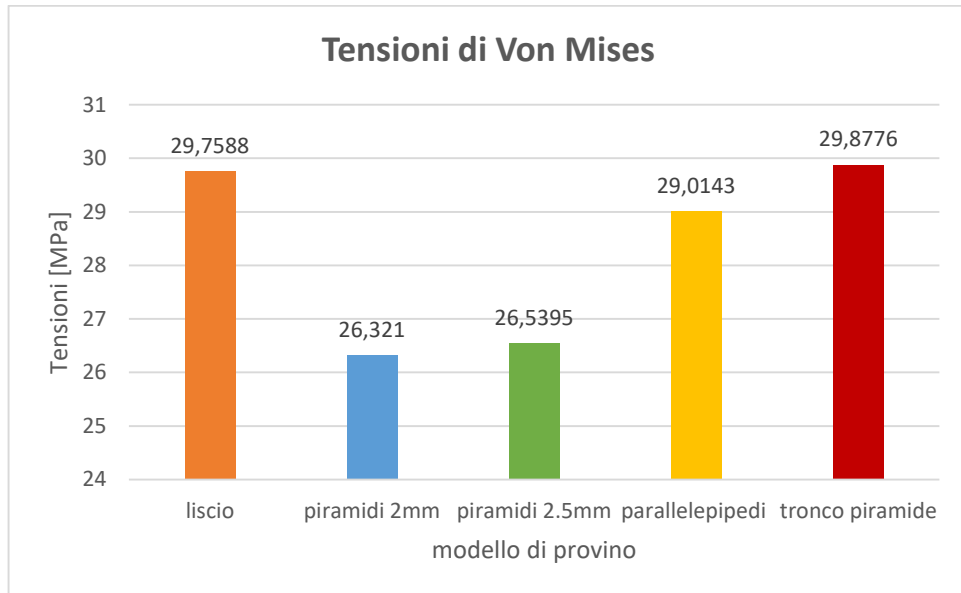


Fig.2.10. Istogramma delle tensioni di Von Mises dei diversi provini

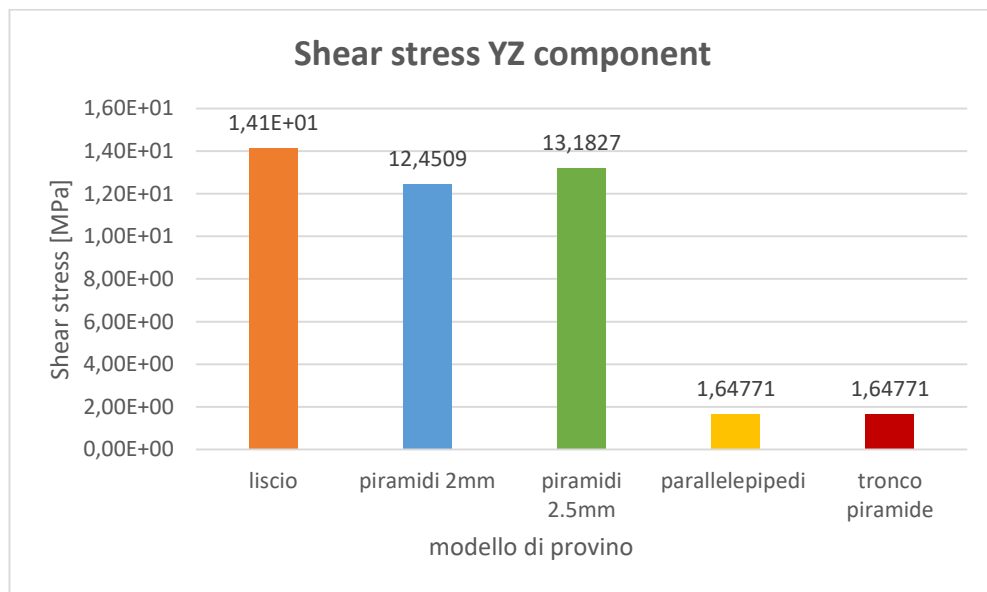


Fig.2.11. Istogramma dello sforzo di taglio su YZ dei diversi provini

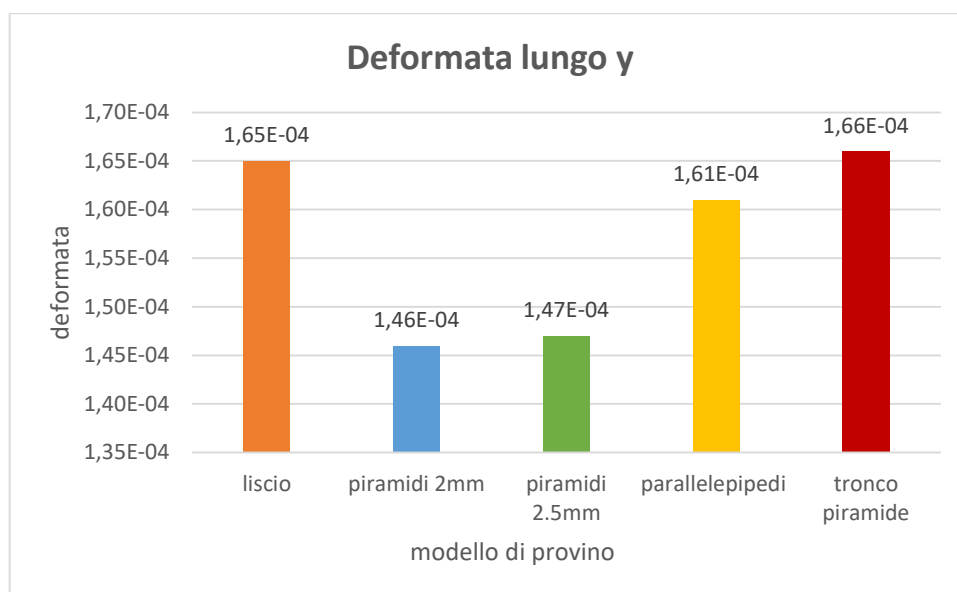


Fig.2.12. Istogramma della deformata lungo y dei diversi provini

Dal confronto si nota che il modello con piramidi a 2.5 mm ha prestazioni inferiori perché l'angolo di inclinazione delle facce diminuisce la presa, sono, di fatti, meno sporgenti. La geometria con tronchi di piramide ha delle buone prestazioni in quanto a tenuta, con tensioni superiori al modello con parallelepipedo ma, con una geometria che consente di alleggerire la massa del metallo. Osservando lo sforzo di taglio lungo il piano YZ, cioè il piano di interfaccia tra metallo e resina, si è visto che il modello con punte a forma di tronco di piramide e quello con parallelepipedo presentano uno sforzo di taglio, *shear stress*, notevolmente inferiore a quello degli altri modelli. Essendo questa una grandezza che gioca un ruolo importante nel mantenimento dell'adesione tra i due materiali, si conclude che le geometrie migliori per il provino metallico sono quelle aventi punte a tronco di piramide o a parallelepipedo. Poiché il modello con punte a parallelepipedo presenta deformazioni e tensioni di Von Mises poco inferiori rispetto al modello con punte a tronco di piramide, si è deciso che la geometria migliore, che verrà utilizzata da qui in avanti, è quella con le punte a tronco di piramide. Essa infatti

ha buone proprietà meccaniche accompagnate da un alleggerimento della massa totale.

2.1.4 Dimensionamento delle punte a tronco di piramide

Considerando che il provino con tronchi di piramide risulta il migliore, per ciò che concerne la tenuta della resina sul metallo, si sono effettuate altre prove per migliorarne la geometria.

Si sono quindi confrontati provini con tronchi di piramide con caratteristiche geometriche differenti per capire quali di queste risultassero più adatte allo scopo.

Si sono modificati alcune grandezze: inclinazione delle facce del tronco di piramide e, di conseguenza, le dimensioni della base superiore e le dimensioni del lato della base inferiore. Le tre tipologie pensate sono:

1. Tronchi di piramide di lato 1.5 mm alla base, facce inclinate di 10° e distanza tra le punte di 0.5 mm;
2. Tronchi di piramide di lato 3.4 mm alla base, facce inclinate di 10° e distanza tra le punte di 0.5 mm;
3. Tronchi di piramide di lato 1.5 mm alla base, facce inclinate di 15° e distanza tra le punte di 0.5 mm.

Nelle seguenti figure vengono mostrate le tipologie di punte, appena descritte:

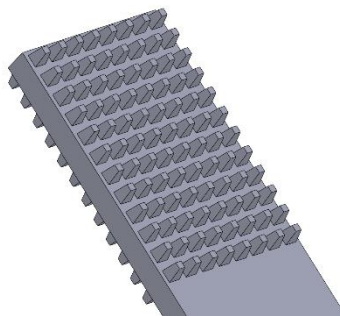


Fig.2.13. Raffigurazione della prima tipologia di tronchi di piramide

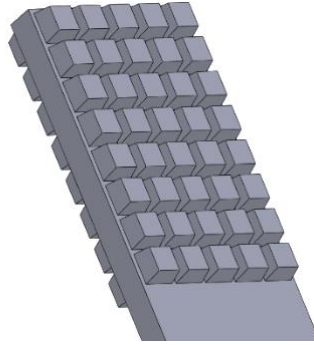


Fig.2.14. Rappresentazione della seconda tipologia di tronchi di piramide

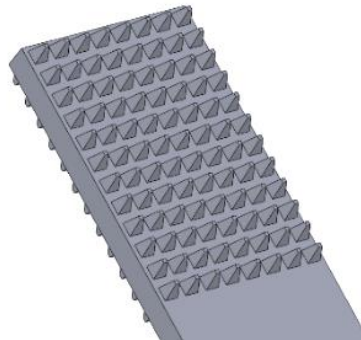


Fig.2.15: Rappresentazione della terza tipologia di tronchi di piramide

Per ciascuna delle geometrie è stata effettuata una simulazione FEM con carichi e vincoli, disposti in ugual modo a quello descritto precedentemente. Si sono riportati i risultati su degli istogrammi per confrontarne l'entità e, successivamente, scegliere la geometria ottimale per la tenuta della sola resina.

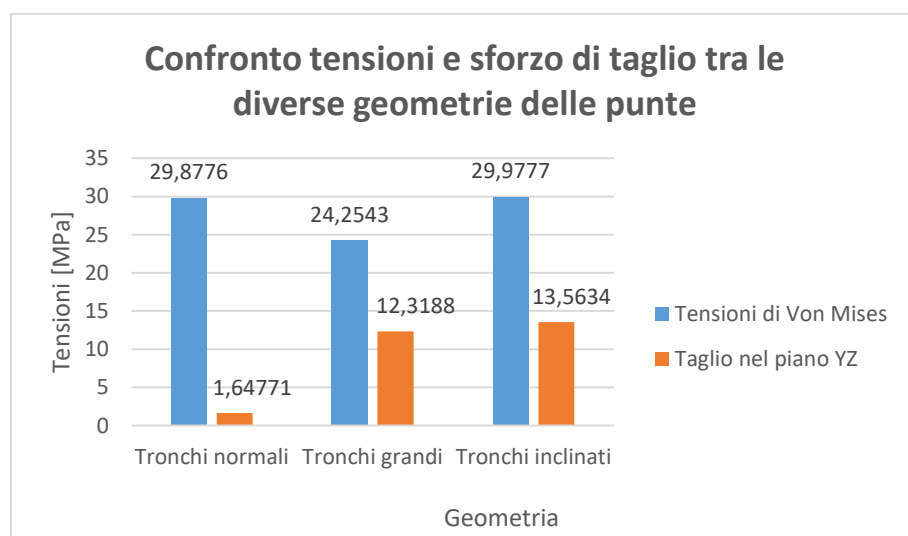


Fig.2.16. Istogramma di confronto delle tensioni e dello sforzo di taglio dei diversi tronchi di piramide

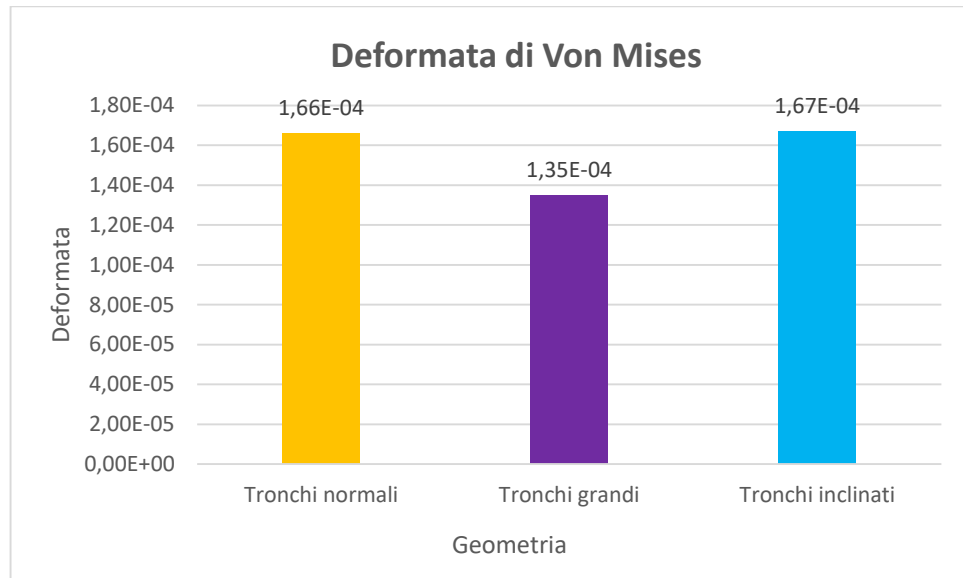


Fig.2.17. Istogramma di confronto della deformata di Von Mises dei diversi tronchi di piramide

Dai risultati, sopra schematizzati, si deduce che il modello con tronchi normali risulta avere le migliori prestazioni, in quanto le tensioni di Von Mises sono pressoché paragonabili agli altri modelli, così come per la deformazione; l'aspetto che però lo distingue dagli altri è il valore di sforzo di taglio, decisamente più basso, che suggerisce una tenuta più ferma. A fronte di ciò, si procederà con i tronchi di piramide normali per le successive simulazioni.

2.2 Alleggerimento simulazione numerica

Come già descritto nel paragrafo relativo alla convergenza, una mesh con elementi di dimensioni inferiori, rispetto a un'altra dello stesso elemento ma più grossolana, genera dei risultati più accurati. A tal fine, si è deciso di migliorare l'accuratezza dei risultati finora ottenuti, andando a sfruttare quattro metodi differenti, scegliendo i tronchi di piramide come strumento d'analisi.

2.2.1 Primo metodo: mesh diversificato

Questo metodo prevede l'utilizzo dello stesso elemento finito, solid92, per l'intero modello con l'unica differenza di adottare dimensioni diverse a seconda delle zone: elementi più piccoli andranno a ricoprire volumi di maggiore interesse per lo studio ed altri, più grandi, costituiranno il mesh del restante modello.

Poiché si vuole analizzare la sola resina, si è scelto di adottare un mesh più fitto per il volume di resina e i soli tronchi di piramide del provino metallico. Si provano due configurazioni di mesh diversificato differenti per poter, alla fine, scegliere la più prestante:

- Mesh con elementi solid92 con lato di 1mm per la resina e i tronchi di piramidi e mesh con elementi solid92 con lato di 5mm per il composito e la base del componente metallico;
- Mesh con elementi solid92 con lato di 1mm per la resina e i tronchi di piramidi e mesh con elementi solid92 con lato di 2.5mm per il composito e la base del componente metallico.

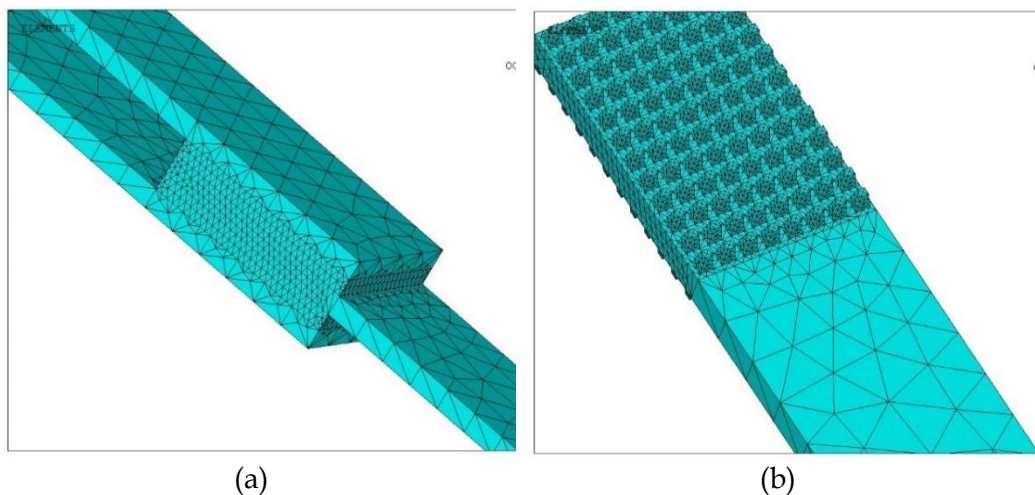


Fig.2.18. Screen della prima tipologia di mesh diversificata (a); screen del provino metallico con punta a tronco di piramide con la prima tipologia di mesh diversificata (b)

Progettazione dei modelli

Si è calcolato l'errore energetico percentuale dell'intero modello e della sola parte d'interesse per decidere il mesh da utilizzare, così da produrre risultati significativi con tempi computazionali accettabili.

	PRERR [%]
Mesh con lato 1.25 mm	6.34
Mesh diversificato 1mm-5mm	8.58
Mesh diversificato 1mm-2.5 mm	7.52

Tab.2.5. Confronto dei PRERR dei vari mesh

Si è poi pensato di confrontare i valori di PRERR relativi alla sola zona di interesse, ovvero lungo l'interfaccia resina-metallo, e di inserirli in un istogramma:

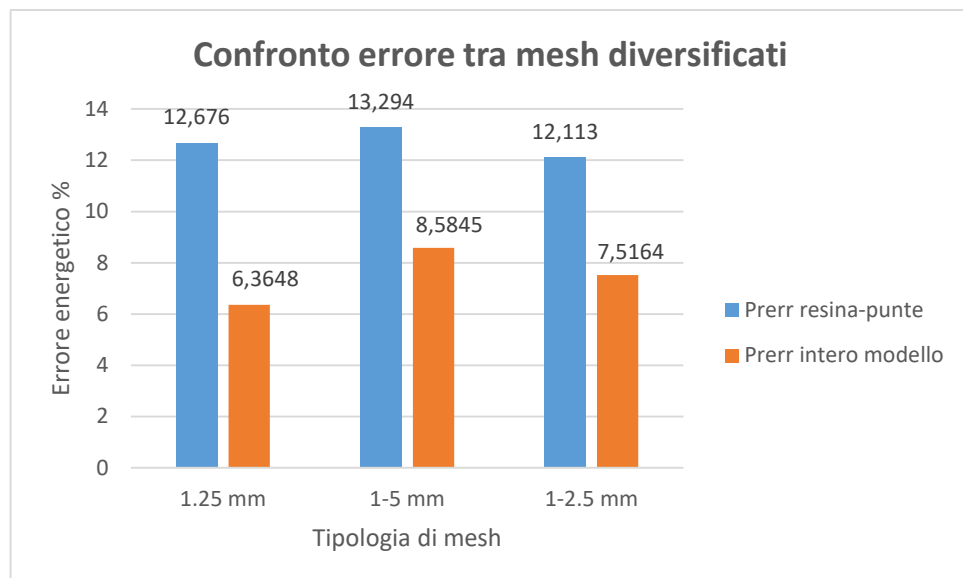


Fig.2.19. Istogramma di confronto dell'errore energetico percentuale nella zona infittita tra i diversi mesh

Dal grafico precedente si nota che, per quanto concerne l'errore sull'intero modello, il mesh migliore risulta quello omogeneo a 1.25 mm. Considerando, invece, l'errore localizzato nella parte di interesse, il valore più basso si registra nel caso di combinazione 1 mm-2.5 mm.

Il valore localizzato del PRERR è superiore a quello dell'intero modello in quanto l'errore energetico percentuale è un valore medio dell'errore, pertanto le zone con

una geometria più semplice contribuiscono ad abbassare l'errore che risulta, al contrario, più elevato nei volumi con geometria più complessa.

A fronte dei risultati ottenuti, si è scelto il modello con mesh omogeneo a 1.25 mm perché ha il PRERR totale più basso, il PRERR locale poco al di sopra del valore minimo registrato e, infine, i tempi computazionali paragonabili agli altri modelli. Si conclude, quindi, che il processo di infittimento del mesh nelle zone di particolare interesse non ha portato ai miglioramenti, che ci si aspettava, in termini di prestazioni della simulazione.

Si procederà, dunque, all'utilizzo di mesh uniforme di lato 1.25 mm per le successive modellazioni.

2.2.2 Secondo metodo: modello solo resina

In questo caso, il modello da simulare si compone del solo volume di resina del lato sinistro.

Si vuole verificare la possibilità di modellare solo la parte di reale interesse per questa analisi, caricando e vincolando in modo da poter simulare l'influenza dei volumi che la circondano nel modello intero.

Si è utilizzato un mesh con elementi solid92 di lato 0.5 mm, non più fitto perché si eccede il limite massimo di elementi finiti fornito dalla licenza di Ansys.

Il sistema di carichi e vincoli è stato modificato al fine di riprendere le condizioni di trazione assiale di partenza: si è incastrata la superficie a contatto con il metallo e si è caricata con una F da 1000 N la faccia a contatto con il composito; tale superficie è anche stata vincolata lungo le altre due direzioni, differenti da quella del carico, per simulare l'impedimento alle traslazioni che impone il composito alla resina.

Progettazione dei modelli

Per capire se tale alleggerimento avesse successo, si sono registrate le distribuzioni delle tensioni di Von Mises della sola resina per provino liscio e a tronchi di piramide, così da poterli, poi, confrontare con quelli derivanti dall'intero modello. Per una visione completa si riportano i dati ottenuti in una tabella e, di seguito, le schermate relative alle distribuzioni delle tensioni di Von Mises:

	Tensione di Von Mises [MPa]	
	Intero modello	Sola resina
Modello liscio	29.76	5.13
Tronchi di piramide	29.88	8.11

Tab.2.6. Confronto tensioni tra modello liscio e modello con tronchi di piramide

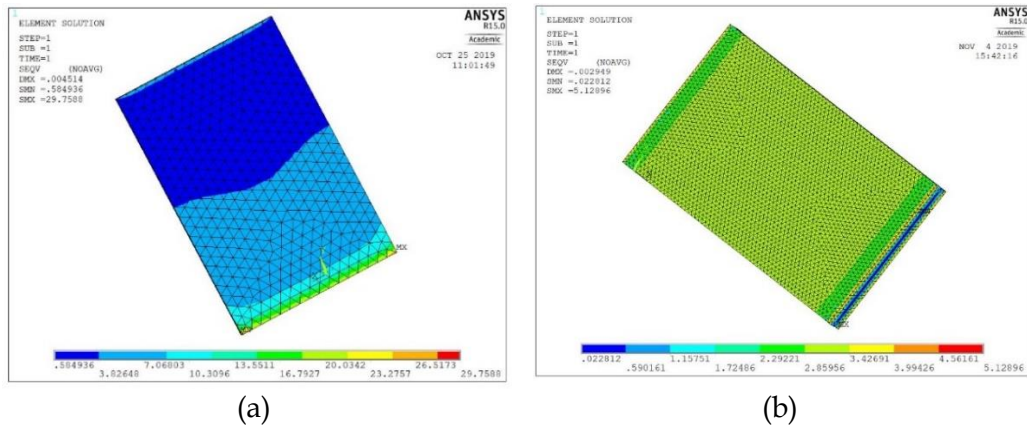


Fig.2.20. Schermate delle distribuzioni delle tensioni di Von Mises sulla resina del modello intero liscio (a) e del modello con solo resina liscia (b)

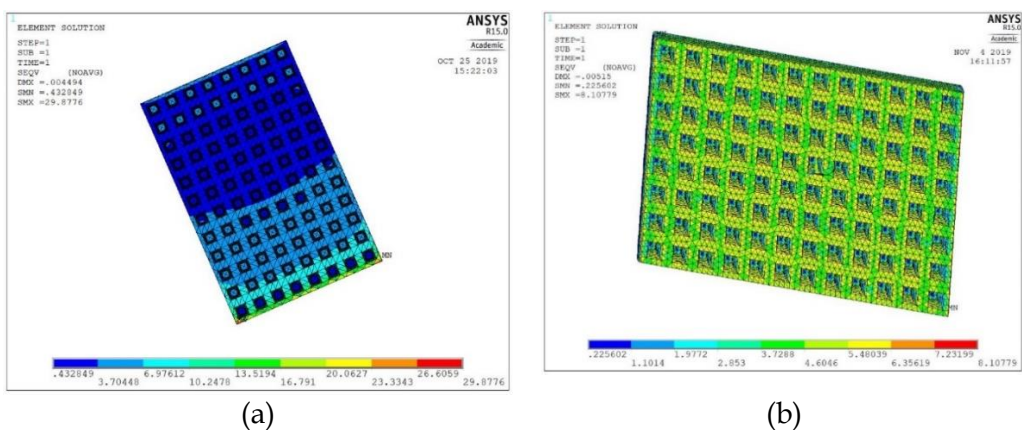


Fig.2.21. Schermate delle distribuzioni di tensione sulla resina del modello intero (a) e del modello con sola resina (b) avente punte a tronco di piramide

Dai valori di tensione, si può osservare che non è possibile modellare la sola resina per determinare il comportamento meccanico dell'intero modello. Si è anche

provato a dimezzare la forza applicata sia perché nell'intero modello il carico viene maggiormente sopportato dai due materiali con il modulo elastico più elevato, ovvero metallo e composito, e sia perché si sta modellando solo una delle due resine presenti. La diminuzione della forza ha, però, comportato un'ulteriore diminuzione dei valori di tensione.

Dalle immagini si può, inoltre, aggiungere che la distribuzione delle tensioni ottenuta è nettamente differente da quella che si ha nel caso di modello intero.

Si conclude che il metodo appena descritto non è valido per alleggerire la simulazione.

2.2.3 Terzo metodo: simulazione di celle

In questo caso la parte da simulare diventa una singola cella. Per cella si intende una frazione di volume contenente una sola punta metallica, la resina e il volume di composito corrispettivi. Per maggiore chiarezza dei singoli componenti, si inserisce, qui di seguito, una schermata contenente i tre volumi separati, che saranno, poi, assemblati per costituire una singola cella:

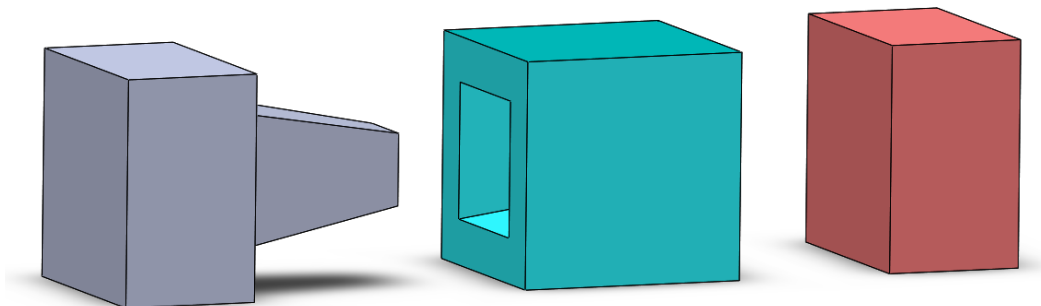


Fig.2.22. Illustrazione dei volumi di una cella con provino a tronchi di piramide

Il sistema di carichi e vincoli adottato per la cella è uguale a quello del modello intero, aggiungendo a questi dei blocchi per le traslazioni lungo le due direzioni,

x e z, perpendicolari a quella del carico. Viene riportata una schermata illustrativa dei vincoli aggiuntivi:

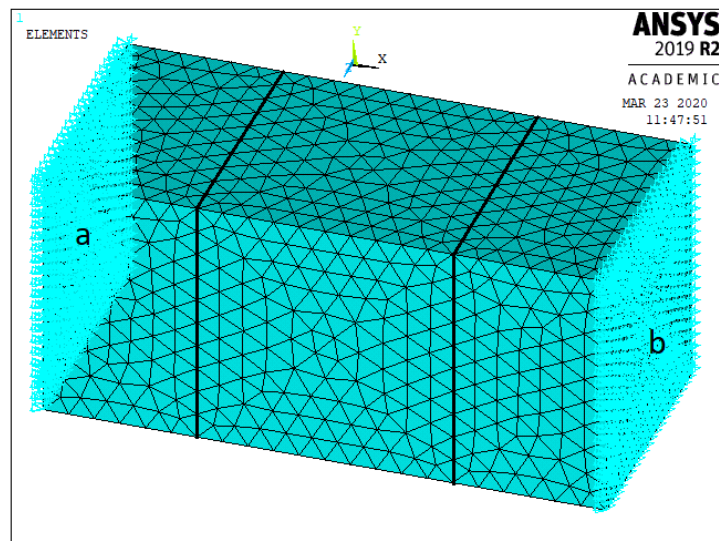


Fig.2.23. Schermata dei vincoli aggiuntivi nel modello della cella su Ansys sulla faccia del metallo (a) e su quella del composito (b)

La figura mostra come i vincoli siano stati aggiunti alla faccia del metallo parallela alla punta e, per il composito, alla superficie più esterna.

Tale simulazione è stata poi confrontata con le simulazioni riferite all'intero modello per determinare se è possibile analizzare il comportamento di una singola cella ed estenderlo per N volte, tante quante sono le celle costituenti il modello intero, oppure se non è ammissibile effettuare tale semplificazione.

Come strumento per il confronto, sono state considerate le curve forza-spostamento in quanto sono valori meno puntuali, cioè meno dipendenti dal punto considerato, rispetto ai valori di tensione. Le curve sono state create imponendo diversi valori di forza distribuita sulla superficie superiore della resina da cui derivano i corrispondenti valori di spostamento; per la creazione delle curve si sono utilizzati i valori di spostamento massimo che si trovano all'estremità superiore del composito. Medesima procedura è stata condotta nel

caso della singola cella dividendo la forza distribuita per il numero di celle presenti nel modello intero sulla superficie su cui è presente la forza.

Di seguito si riportano i grafici contenenti gli andamenti di forza-spostamento del modello intero e della singola cella per le punte a parallelepipedo, piramidali e a tronco di piramide:

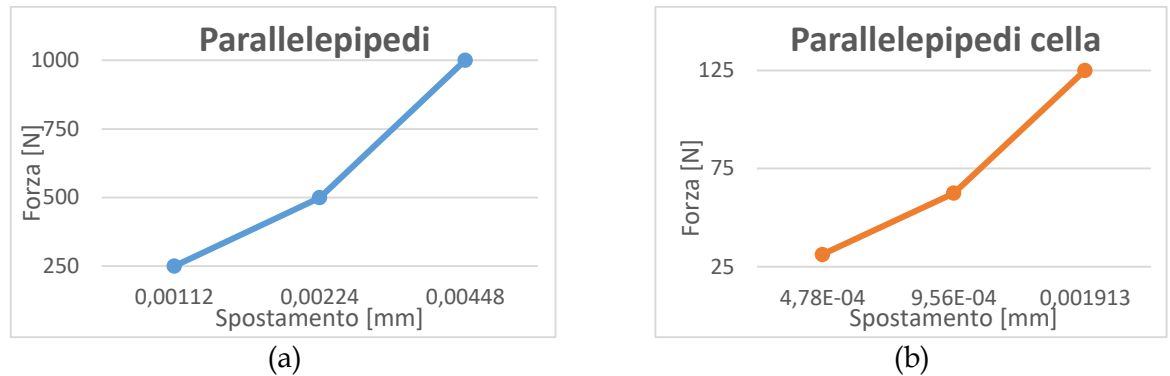


Fig.2.24. Grafici Forza- Spostamento per modello intero (a) e per la sola cella (b) delle punte a forma di parallelepipedo

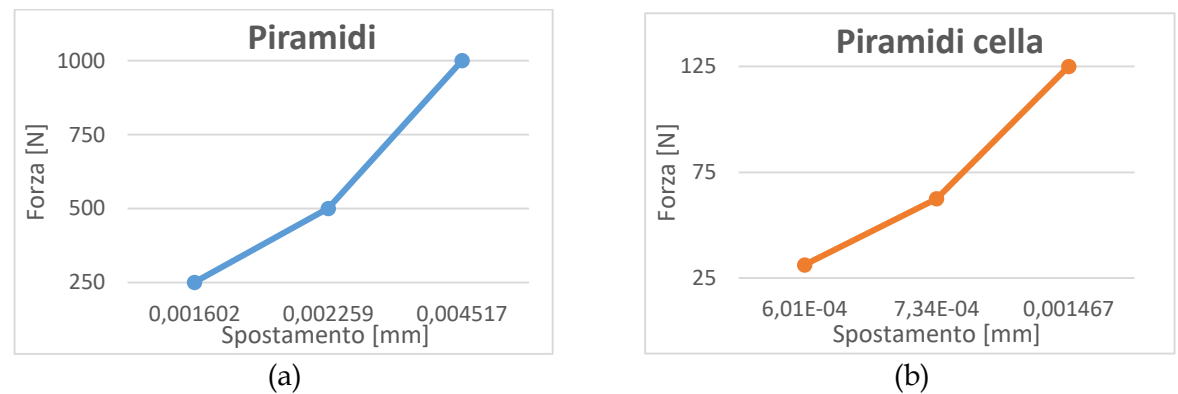


Fig.2.25. Grafici Forza- Spostamento per modello intero (a) e per la sola cella (b) delle punte a forma di piramide

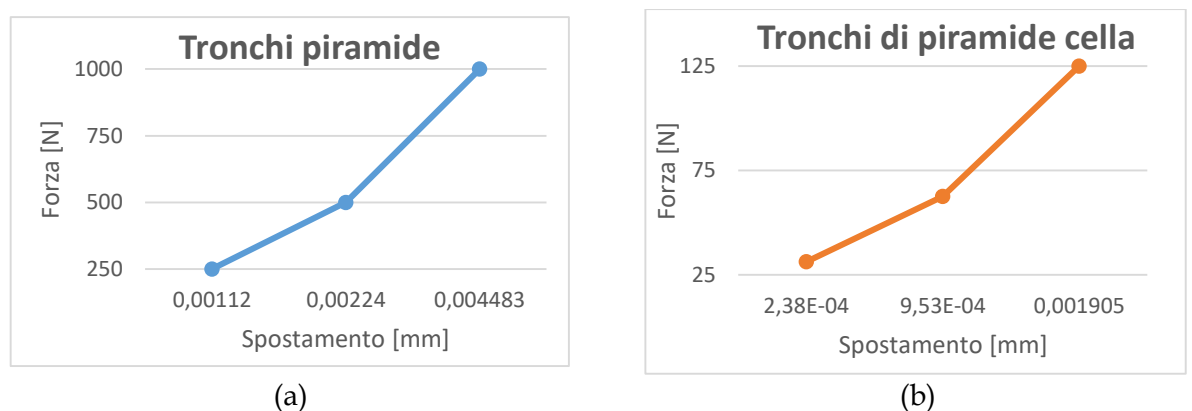


Fig.2.26. Grafici Forza- Spostamento per modello intero (a) e per la sola cella (b) delle punte a forma di tronco di piramide

Dai grafici soprastanti, si può osservare che sia nel caso della singola cella sia con l'intero modello si ottiene una relazione lineare tra forza e spostamento. Quindi si deduce che per osservare l'andamento degli spostamenti in funzione della forza applicata è possibile simulare semplicemente una singola cella. Dall'altra parte, però, i valori degli spostamenti con la singola cella sono molto diversi da quelli ottenuti con il modello intero perché non si può ignorare la posizione assunta dalla cella analizzata nell'intero modello. Le celle prossime alla superficie, su cui è distribuito il carico, risentiranno meno dell'incastro alla base del provino, mentre quelle più vicine ad esso saranno soggette ad un carico meno intenso.

Si conclude, dunque, che per la comprensione del comportamento globale del modello non è possibile modellare una sola cella e duplicare il suo comportamento per N volte quante sono le punte nel provino perché le caratteristiche strutturali delle celle sono fortemente influenzate dalla loro posizione nel modello complessivo.

2.2.4 *Quarto metodo: un quarto di modello*

L'idea alla base è riuscire a modellare la più piccola porzione di modello sufficiente all'ottenimento dei dati di interesse. Poiché il modello è stato pensato con una geometria totalmente simmetrica rispetto al provino metallico, è stato possibile prenderne una sola porzione utile all'analisi.

Si è, dunque, realizzato il *file.IGES* di un quarto dell'intero modello, sfruttando al massimo le simmetrie presenti. Si è utilizzata un mesh con elementi solid92 di lato 1.25 mm, in modo da poter confrontare i risultati con quelli ottenuti con le simulazioni dell'intero modello.

La forza applicata presenta un modulo pari a 250 N, in quanto i nodi su cui essa viene, ora, distribuita sono un quarto di quelli di partenza. Di seguito si riporta un'immagine illustrativa del quarto di modello CAD:

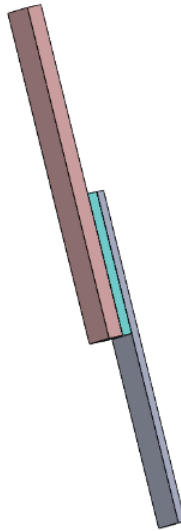


Fig.2.27. Schermata del modello CAD del quarto di modello su Solidworks

Il sistema di vincoli è il medesimo del modello intero, con l'aggiunta di incastri su tutta la faccia del metallo, quella che dovrebbe essere, in realtà, continuativa del provino ma che è stata dimezzata, lungo lo spessore del provino, per alleggerire la simulazione; tali incastri servono a simulare la restante parte simmetrica del modello, volutamente tagliato via.

Al fine di valutare la validità di questo metodo, si riportano i valori di tensione di Von Mises della resina tagliata per confrontarli con quelli relativi alla resina intera.

	Tensione di Von Mises [MPa]	
	Intero modello	Un quarto di modello
Liscio	29.76	28.125

Tab.2.7. Confronto delle tensioni tra modello intero e un quarto di modello

È importante, inoltre, che non solo il valore di tensione puntuale sia simile ma che la distribuzione di tale grandezza possa essere ricondotta a quella del modello intero. Si riportano di seguito le schermate delle tensioni di Von Mises, per

Progettazione dei modelli

entrambe le facce della resina, prima per il modello intero e poi quelle relative alla sua quarta parte.

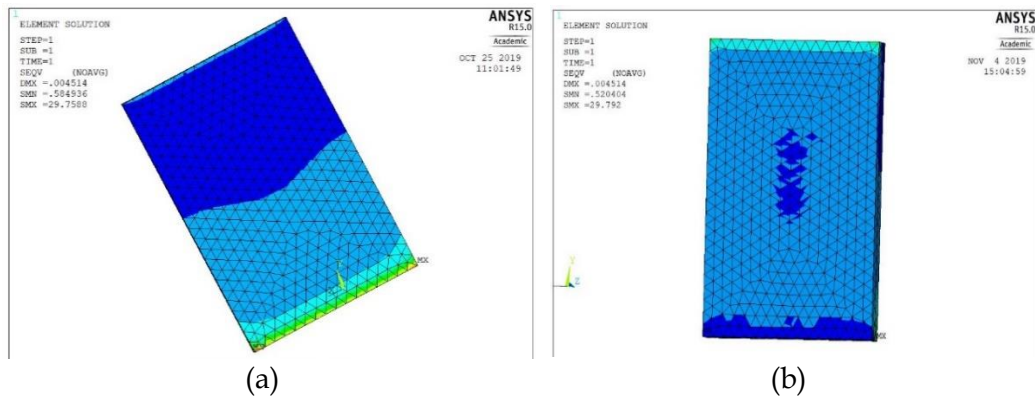


Fig.2.28. Schermata delle tensioni di Von Mises della resina del modello intero liscio sulla faccia a contatto con il metallo (a) e sulla faccia a contatto con il composito (b)

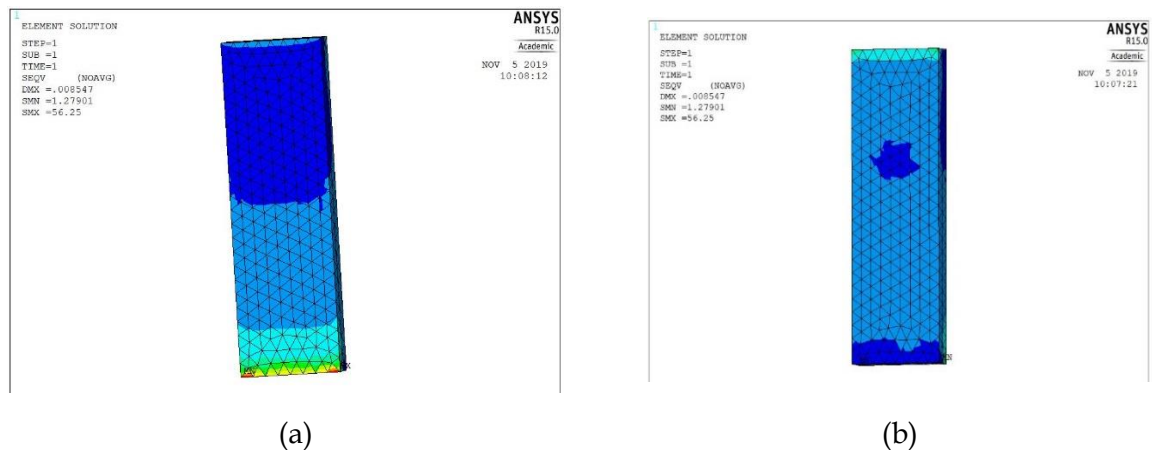


Fig.2.29. Schermata delle tensioni di Von Mises della resina del quarto di modello liscio sulla faccia a contatto con il metallo (a) e sulla faccia a contatto con il composito (b)

Dalla tabella e dalle immagini si evince che la distribuzione delle tensioni di Von Mises è la medesima e i valori di tali tensioni risultano circa le stesse nel caso del modello tagliato.

Tornando al secondo metodo, si conclude, quindi, che non è possibile modellare solo la resina ma occorre modellare anche il composito e il metallo, in quanto le deformazioni di questi materiali apportano una modifica nel comportamento della resina. Si può, invece, alleggerire le simulazioni andando a simulare il

Progettazione dei modelli

comportamento di un quarto del modello, andando a sfruttare le simmetrie presenti nella geometria.

Il fatto di utilizzare solo parte del modello permette di infittire ulteriormente il mesh. Simulando il modello con tronchi di piramide, si è, quindi, proceduto con un mesh di elementi solid92 con lato 0.75 mm perché con 0.625 mm si eccede il numero di nodi.

Trovata la dimensione minima degli elementi finiti consentita, si è passati alla simulazione di tutte le geometrie di punte, per poter valutare tutte le grandezze di interesse nel caso di un quarto di modello. È importante sottolineare che, ogni qualvolta si parla di spostamento lungo la direzione del carico y, tali valori derivano da una differenza tra valore massimo, riscontrato sul volume in esame, e quello minimo ad esso relativo.

I dati raccolti, si riportano nella seguente tabella:

Un quarto di modello						
Tipologia di modello	PRERR Totale [%]	PRERR Resina [%]	Von Mises stress [MPa]	YZ stress [MPa]	Uy [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
Liscio	8.09	11.07	31.13	14.56	8.0e-04	2.69e-05
Piramidi	8.67	9.71	25.93	12.44	7.9e-04	2.64e-05
Parallelepipedi	8.48	17.87	20.78	10.34	7.8e-04	2.61e-05
Tronchi piramide	5.71	12.43	15.93	3.25	3.9e-04	1.31e-05

Tab.2.8. Confronto delle grandezze di interesse per un quarto di modello di ogni tipologia di punte

Analizzando i dati in tabella, si evidenzia lo spiccare di due comportamenti assai differenti dai restanti. Il primo tra questi è dato dal provino liscio, il quale presenta i valori massimi registrati in tutte le grandezze analizzate, eccetto per l'errore in quanto la sua geometria è quella più semplice da ricostruire. Dalla parte opposta, troviamo il provino con punte a tronco di piramide, il quale mostra il miglior

Progettazione dei modelli

comportamento meccanico. I valori che si registrano, in questo caso, sono non solo inferiori ma anche ben distanti da quelli degli altri modelli.

Ciò consente di affermare che il provino liscio non è adatto a favorire la tenuta della resina, mentre, il modello con tronchi di piramide soddisfa bene i requisiti richiesti.

Durante le varie simulazioni, si è notato come la distribuzione delle tensioni sulla resina non fosse simmetrica tra la faccia a contatto con il metallo e quella rivolta al composito. Al fine di comprendere tale asimmetria, si è scelto di riportare le schermate di tale distribuzione per la resina del provino liscio:

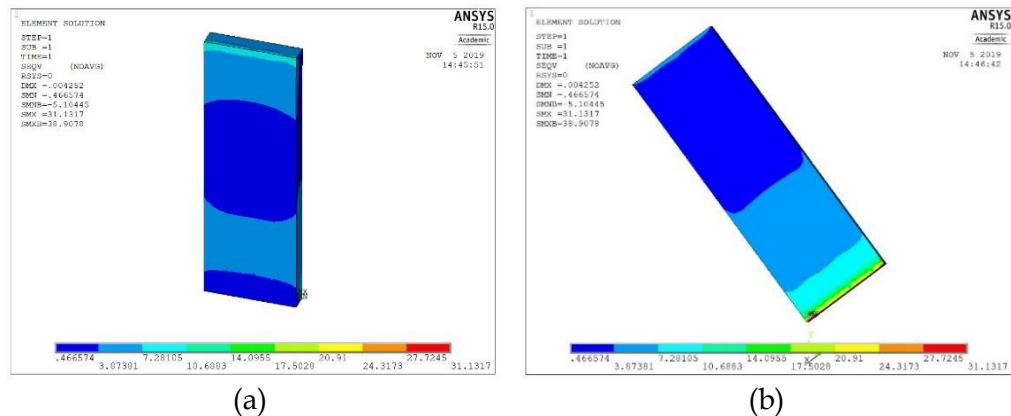


Fig.2.30. Schermate delle tensioni di Von Mises della resina sulla faccia a contatto con il metallo (a) e sulla faccia a contatto con il composito del quarto di modello

A fronte di ciò, si è pensato che la causa di tale asimmetria fosse dovuta al diverso valore del modulo elastico dei due materiali a contatto con la resina stessa: 100000 MPa del composito rispetto ai 180000 MPa del metallo. Si sono pertanto sviluppate delle simulazioni di prova con il provino liscio tagliato, nelle quali si sono variati i moduli elastici dei volumi esaminati e il sistema di vincoli.

1. Tutti i volumi con lo stesso modulo elastico del metallo: persiste una distribuzione non simmetrica delle tensioni nelle due facce della resina;
2. Si è pensato che la persistenza dell'asimmetria fosse dovuta al diverso spessore di metallo e composito, quindi si è dimezzato lo spessore del

composito, come mostra la figura seguente, mantenendo intatto il sistema di vincoli.

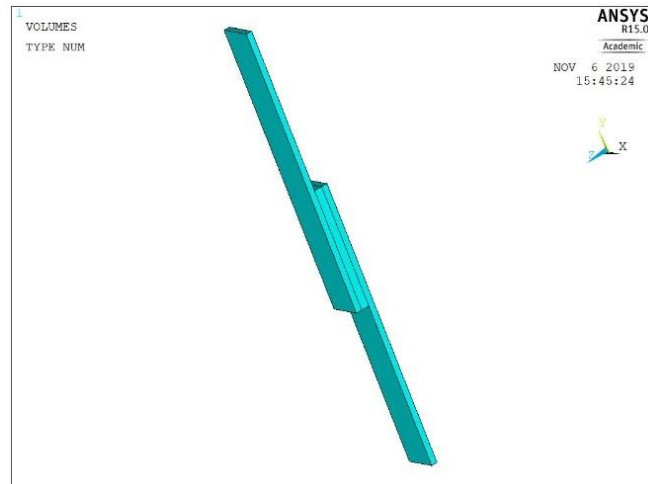


Fig.2.31. Schermata del quarto di modello con spessore del composito dimezzato

Si evidenzia una certa simmetria tra le facce della resina ma non del tutto perfetta;

3. Si è usato il modello precedente ma con l'aggiunta di vincoli per bloccare la traslazione lungo gli assi x e z di tutti i nodi presenti sulla faccia esterna del composito, come mostra la figura sottostante:

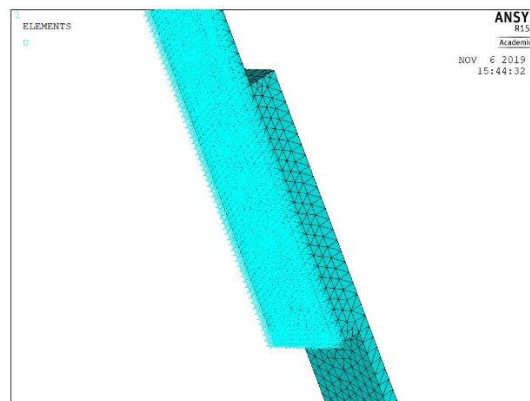


Fig.2.32. Schermata dei vincoli aggiuntivi sulla superficie esterna del composito

Lo scopo è rendere il sistema di vincoli simmetrico anche se esso non rispecchia appieno la realtà. Così facendo, inoltre, si ottiene la perfetta simmetria nella

distribuzione delle tensioni con l'utilizzo dei corretti moduli di Young per i vari materiali. La simmetria raggiunta viene illustrata nelle immagini che seguono:

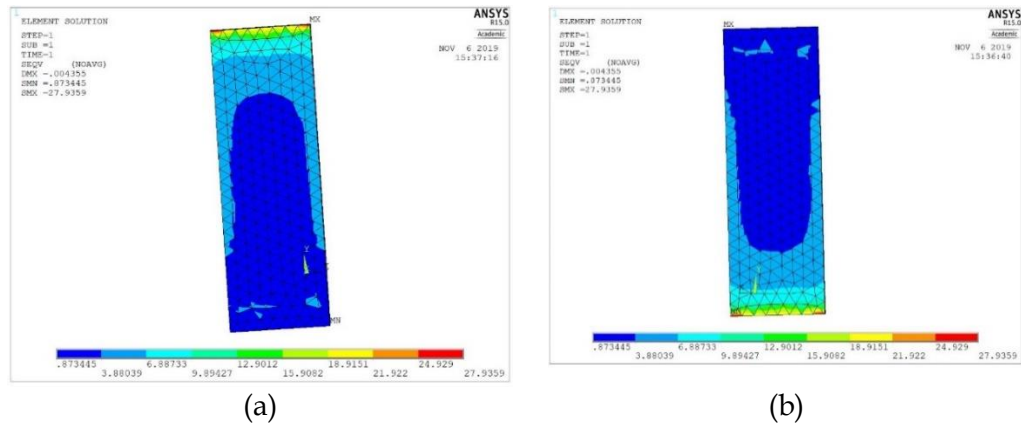


Fig.2.33. Schermate delle tensioni di Von Mises sulla superficie della resina a contatto con il metallo (a) e a contatto con il composito (b) del quarto di modello

A fronte dei risultati ottenuti, si può concludere che la non perfetta simmetria, riscontrata nelle simulazioni precedenti, seppur più realistiche, non è dovuta, in alcun modo, alla differenza tra i moduli elastici di materiale composito e metallo. La vera causa, invece, dell'asimmetria risiede nella distribuzione non simmetrica tra vincoli e forze.

Il metodo di alleggerimento del mesh che prevede la simulazione di un solo quarto di modello, perciò, è risultato valido e verrà, da questo punto in avanti, usato come modello base per le successive modellazioni.

2.3 Simulazioni della tenuta del composito sul metallo

In seguito alla valutazione della tenuta della sola resina sul metallo, si è passati ad analizzare quella esercitata dal materiale composito. In questa tipologia di simulazioni, l'oggetto d'analisi è, dunque, il composito, modellato come un unico volume, che interagisce direttamente con le punte del provino metallico. Di conseguenza, il modello è costituito solo da tre differenti volumi: il provino

metallico e le due parti di materiale composito. Le immagini che seguono mostrano una vista esplosa dei volumi, costituenti il modello, e una illustrazione del loro assieme.

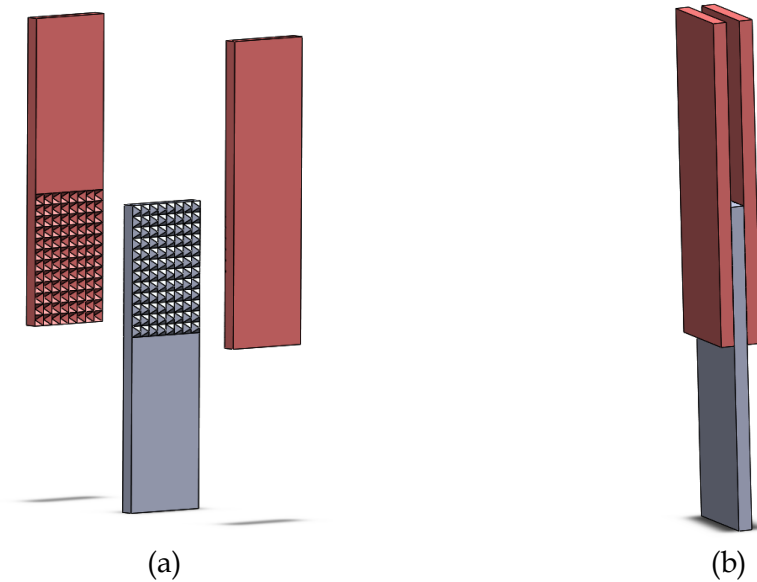
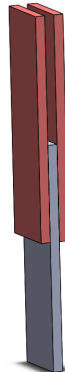


Fig.2.34. Illustrazione della vista esplosa del modello con punte generiche (a) e il suo assieme (b)

Per tutte le simulazioni, descritte nei prossimi paragrafi, si sono impostate determinate proprietà meccaniche per i due materiali in esame, considerati sempre come omogenei ed isotropi. Tali valori vengono riportati in tabella 2.9.

Componente	Materiale	E [MPa]	ν	Dimensioni [mm]	
Grigio	Inconel625 non trattato termicamente	180000	0.3	70x10x1.5	
Marrone	Composito in fibra di carbonio con matrice di resina epossidica	100000	0.3	70x10x3	

Tab.2.9. Proprietà meccaniche dei materiali utilizzati nel modello

Per la valutazione della tenuta del composito, si sono ideate e realizzate altre tipologie di punte che vengono, per comodità, divise in due differenti gruppi di provini: punte inclinate e punte a geometria complessa.

2.3.1 Creazione dei modelli con punte inclinate

In questo particolare punto dell'analisi, si è partiti pensando a delle geometrie che potessero aggrappare al meglio la fibra di carbonio che si trova all'interno del composito. Come prima caratteristica da modificare, si è scelta l'inclinazione delle punte, finora realizzate perpendicolari alla superficie, in modo da favorire la loro penetrazione all'intero del composito.

I provini che ne derivano sono quattro:

- Punte a forma di parallelepipedo, inclinate verso l'alto di 45° rispetto alla base di ancoraggio e sporgenti da essa di 2 mm, aventi base quadrata di lato 1.5 mm;
- Punte a forma di parallelepipedo, inclinate verso il basso di 45° rispetto alla base di ancoraggio e sporgenti da essa di 2 mm, aventi base quadrata di lato 1.5 mm;
- Punte a forma di cilindro, inclinate verso l'alto di 45° rispetto alla base di ancoraggio e sporgenti da essa di 2 mm, aventi diametro di base di 1.5 mm;
- Punte a forma di cilindro, inclinate verso il basso di 45° rispetto alla base di ancoraggio e sporgenti da essa di 2 mm, aventi diametro di base di 1.5 mm;

Si riportano, qui di seguito, delle immagini per ogni singola tipologia di punte descritte.

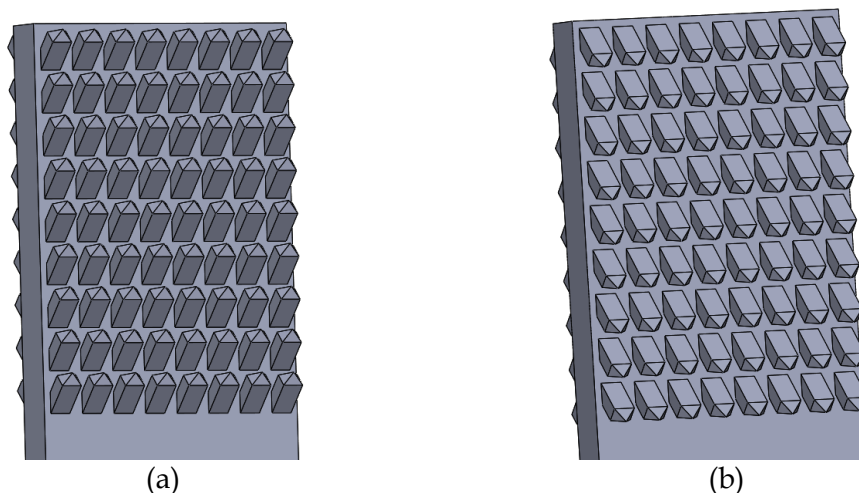


Fig.2.35. Rappresentazioni dei provini con punte a parallelepipedo inclinati verso l'alto (a) e verso il basso (b)

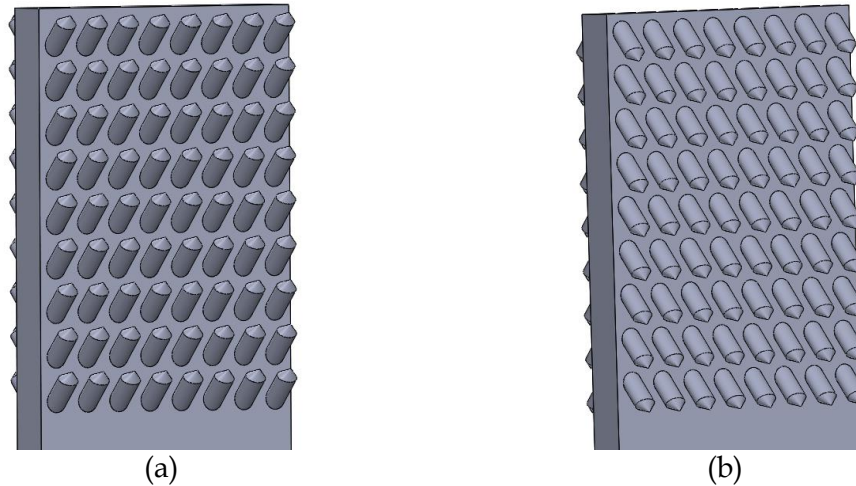


Fig.2.36. Rappresentazioni dei provini con punte cilindriche inclinate verso l'alto (a) e verso il basso (b)

Per la realizzazione del modello CAD tridimensionale di ogni provino si è utilizzato il software Solidworks, tramite il quale si ricava il file.IGES della geometria da inserire su Ansys per la modellazione numerica.

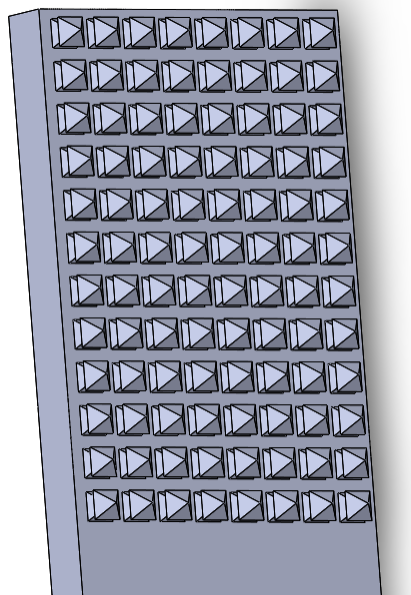
2.3.2 Creazione dei modelli con geometrie complesse

Oltre all'inclinazione, ci si è soffermati su un altro aspetto che potrebbe favorire l'ancoraggio delle punte metalliche al composito: una forma che da una parte favorisca la penetrazione all'interno del tessuto in fibra e dall'altro possa garantire l'ancoraggio ad esso. Si lavora, dunque, sulla realizzazione di geometrie più complesse, al fine di ottenere ottime capacità di inserimento e trattenimento delle fibre di carbonio, le quali, ricordiamo, sono disposte lungo direzioni fra loro ortogonali. Da tale considerazione derivano cinque diversi provini metallici:

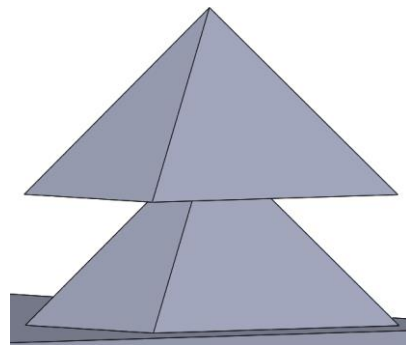
- Punta aventi due piramidi sovrapposte, a base quadrata di lato 1.6 mm e altezza complessiva di 1.7 mm rispetto la superficie di ancoraggio;
- Punta aventi due piramidi sovrapposte, a base quadrata di lato 1 mm e altezza complessiva di 0.9 mm rispetto la superficie di ancoraggio;

- Punta a forma di doppio uncino, posizionate sulla base con due diverse orientazioni per permettere l'ancoraggio sia delle fibre orizzontali che di quelle verticali;
- Punta a forma di spirale conica con diametro di base di 1.5 mm, terminanti con un cono per facilitare l'ingresso del provino nel tessuto;
- Punta formate da un parallelepipedo terminante con 4 uncini, per ancorare le fibre disposte in direzione orizzontale e verticale; sull'estremità è presente una piramide per facilitare l'ingresso delle punte stesse nel tessuto.

Si riportano, qui di seguito, delle immagini per ogni tipologia di punta descritta, con accanto una raffigurazione ingrandita della forma caratteristica della singola punta.

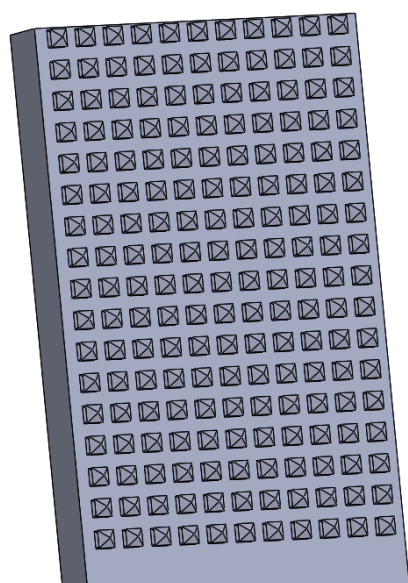


(a)

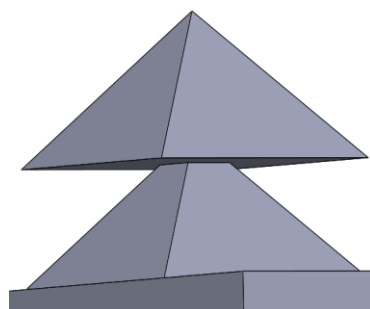


(b)

Fig.2.37. Raffigurazioni del provino con doppie piramidi di base 1.6 mm (a) e della geometria di un'unica punta (b)

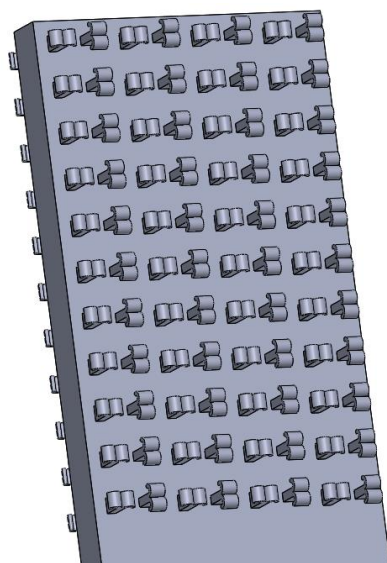


(a)

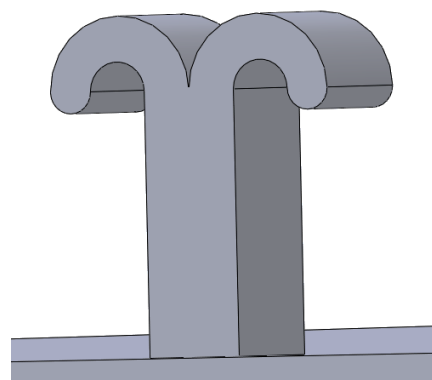


(b)

Fig.2.38. Raffigurazioni del provino con doppie piramidi di base 1 mm (a) e della geometria di un'unica punta (b)



(a)



(b)

Fig.2.39. Raffigurazioni del provino con uncini doppi (a) e della geometria di un'unica punta (b)

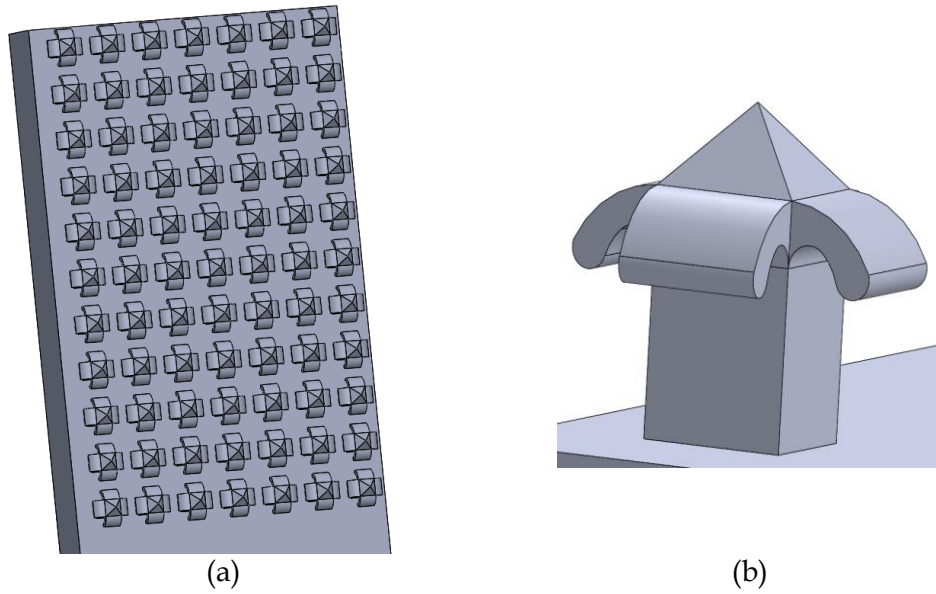


Fig.2.40. Raffigurazioni del provino con quattro uncini (a) e della geometria di un'unica punta (b)

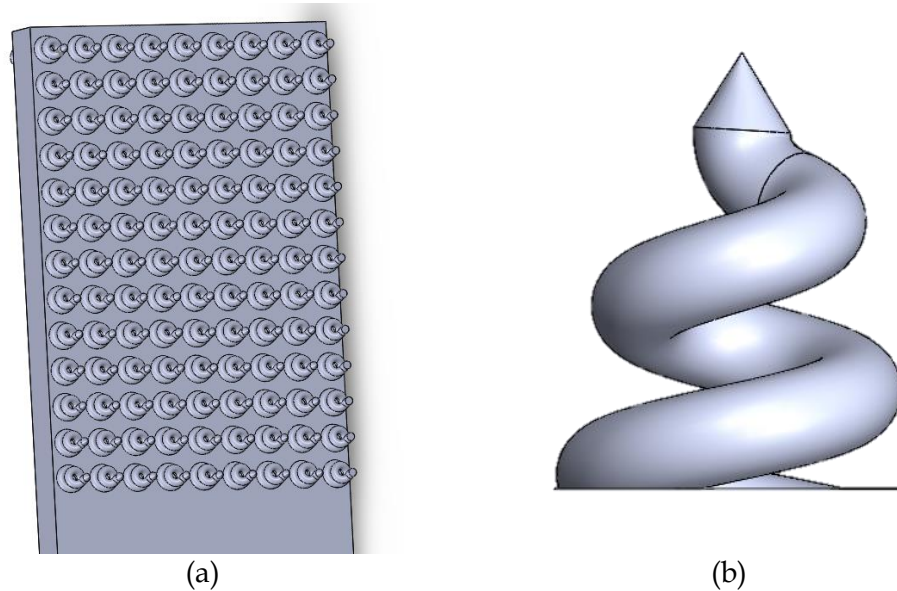


Fig.2.41. Raffigurazioni del provino con spirali (a) e della geometria di un'unica punta (b)

Anche per questi nuovi modelli, il software, utilizzato per la realizzazione del modello CAD tridimensionale, è Solidoworks, tramite il quale si ricava il file.IGES della geometria da inserire su Ansys per la modellazione numerica.

2.3.3 Simulazioni FEM dei modelli con punte inclinate

A fronte delle ottime prestazioni ottenute dalla simulazione di un quarto di modello, si è proceduto, semplicemente, con la simulazione della quarta parte dei provini con punte inclinate. Anche in questo caso, questa tecnica finalizzata ad un miglior *fitting* del mesh, è stata possibile in quanto il modello di partenza è simmetrico. Effettuati i dovuti tagli, si ottiene un modello tridimensionale di questo tipo:

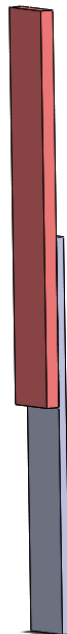


Fig.2.42. Raffigurazione di un quarto di modello

Importato il *file.IGES* ed inserite le proprietà dei materiali, si è impostata una dimensione di 0.75 mm per gli elementi solid92.

Per quanto concerne il sistema di carichi e vincoli, si è incastrata la base inferiore del metallo, si è imposta una forza distribuita di 250 N sulla base superiore del composito e si sono bloccate le traslazioni lungo le due direzioni diverse da quelle di trazione della faccia destra del metallo e di quella sinistra del composito al fine di ottenere una trazione pura, ottenere simmetria delle tensioni e per considerare anche la parte di volume non modellata.

Per ciascuna delle prove effettuate si sono considerate le tensioni di Von Mises, il taglio e gli spostamenti lungo la direzione di trazione. Per determinare la geometria delle punte che meglio permette l'adesione tra i due diversi materiali, si sono considerati i valori massimi delle grandezze facendo riferimento al volume del composito. Ciò è stato possibile in quanto tali valori si posizionano, per tutte le geometrie, nella medesima zona del composito, quella corrispondente all'ultima fila di punte in basso del provino. Essendo una zona ben estesa e non riconducibile ad un unico nodo, grazie alla distribuzione omogenea di carichi e vincoli per ogni geometria, si possono considerare validi i valori massimi che si registrano.

Per ogni tipologia di modello, si riportano le tabelle contenenti i valori ottenuti delle grandezze utili al confronto finale.

Provino con parallelepipedi inclinati verso il basso			
Von Mises stress [MPa]	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
97.99	39.55	0.0054	0.77e-04

Tab.2.10. Valori delle grandezze registrate per le punte a parallelepipedo inclinate verso il basso.

Provino con parallelepipedi inclinati verso l'alto			
Von Mises stress [MPa]	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
54.09	8.88	0.0052	0.75e-04

Tab.2.11. Valori delle grandezze registrati per il modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto

Per questa tipologia di punte, si è scelto di riportare le distribuzioni per tensioni di Von Mises, sforzo di taglio e spostamento lungo la direzione del carico sia per il metallo che per il composito, facendo una schermata incentrata principalmente sulla zona di interesse per entrambi i volumi: punte metalliche per il provino e

zona scavata nel composito dalle punte stesse. Si sceglie di riportare le immagini, relative ai parallelepipedi inclinati verso l'alto, solo per una maggiore comprensione delle distribuzioni, le quali risultano pressoché simili tra i vari modelli; non si notano particolari casi in cui le distribuzioni di una grandezza risultino anomale tanto da doverne tenere traccia.

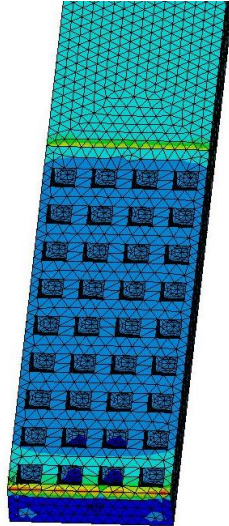


Fig.2.43. Schermata della distribuzione delle tensioni di Von Mises sul composito del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto

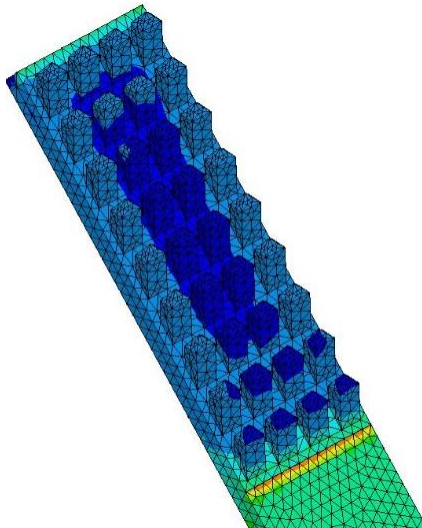


Fig.2.44. Schermata della distribuzione delle tensioni di Von Mises sul provino metallico del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto



Fig.2.45. Schermata della distribuzione dello sforzo di taglio sul composito del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto

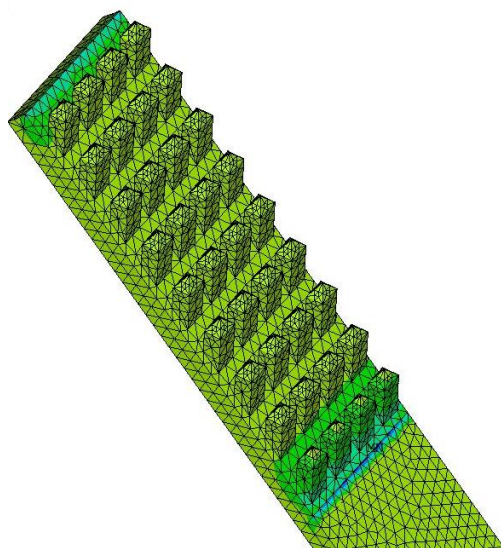


Fig.2.46. Schermata della distribuzione dello sforzo di taglio sul provino metallico del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto

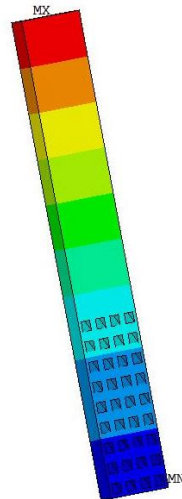


Fig.2.47. Schermata della distribuzione dello spostamento lungo y sul composito del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto

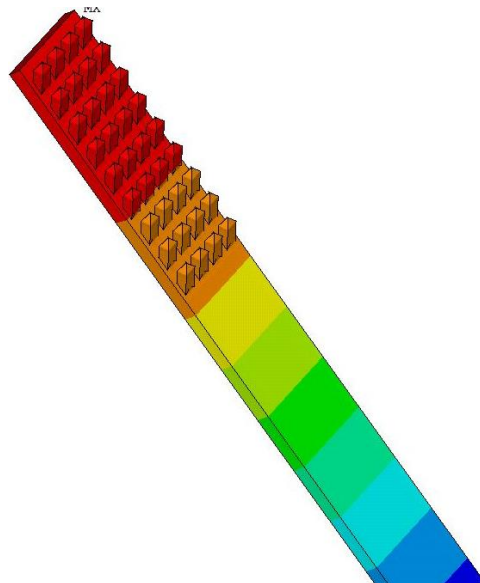


Fig.2.48. Schermata della distribuzione dello spostamento lungo y sul provino metallico del modello con parallelepipedi inclinati verso l'alto

Giunti a questo punto, si è proceduti con la simulazione delle punte con cilindri inclinati, i quali hanno mostrato, da subito, un problema con la formattazione del codice di Ansys, fino ad ora utilizzata. Per questa particolare geometria, infatti, non è possibile utilizzare la funzione *vglue*, per simulare i volumi incollati, poiché vengono trattate superfici non booleane. Una funzione alternativa è data da *nummrg* ma non è stato possibile utilizzarla perché necessita di una mesh più fitta

di quella che si può ottenere con la versione accademica di ANSYS. Pertanto, si è pensato di approssimare il cerchio di base dei cilindri con un esagono e successivamente con ottagono, dodecagono e esadecagono, trattando così superfici booleane.

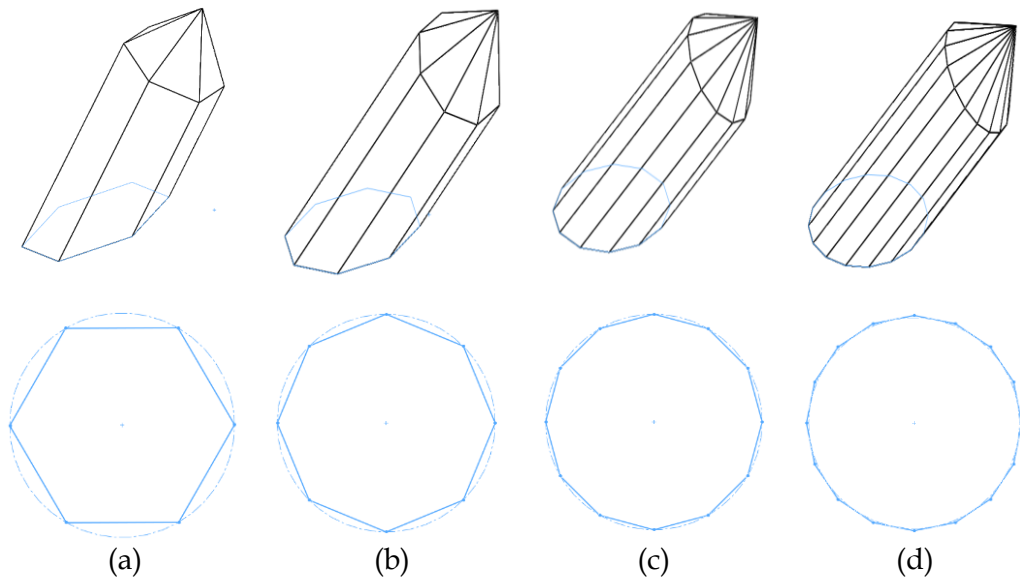


Fig.2.49. Rappresentazioni delle punte a base esagonale (a) ottagonale (b) dodecagonale (c) esadecagonale (d)

Come strumento di confronto, si è scelto di valutare due sole grandezze più significative: lo sforzo di taglio e lo spostamento lungo la direzione del carico y .

Poiché la distribuzione delle caratteristiche considerate rimane invariata, vengono riportati in tabella solo i corrispondenti valori massimi necessari per effettuare un confronto senza le immagini.

Poligono di base	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
esagono	12.83	0.0052	0.74e-04
ottagono	11.29	0.0052	0.75e-04
dodecagono	11.38	0.0053	0.76e-04
esadecagono	11.49	0.0053	0.76e-04

Tab.2.12. Valori delle grandezze registrate per i diversi poligoni di base

Per un confronto più immediato si sono realizzati due istogrammi per sforzo di taglio e spostamento lungo y, così da poter valutare la migliore approssimazione.

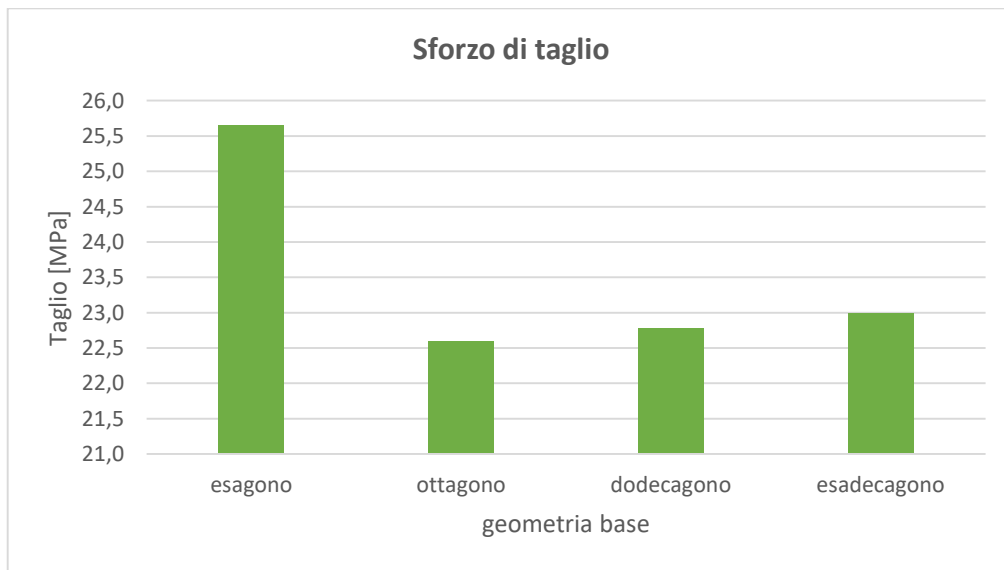


Fig.2.50. Istogramma dello sforzo di taglio dei diversi poligoni di base delle punte cilindriche inclinate verso l'alto

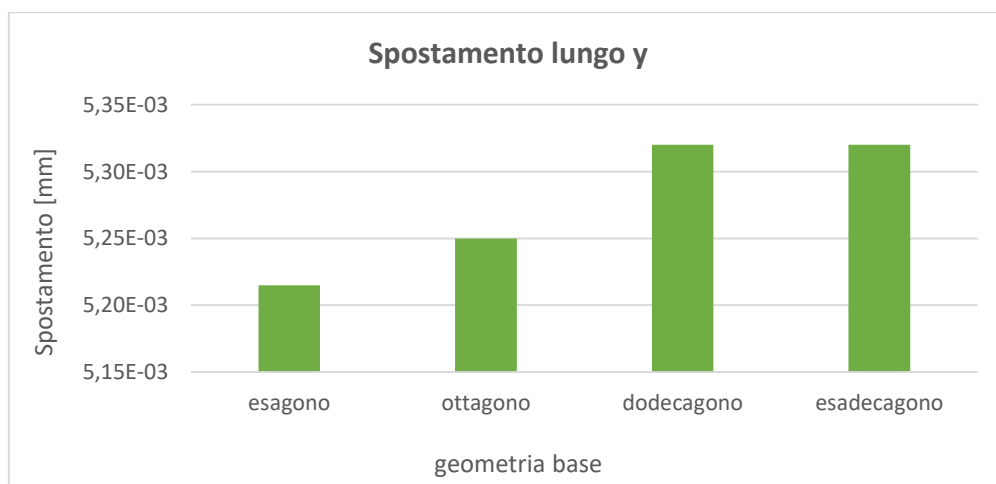


Fig.2.51. Istogramma dello spostamento lungo y dei diversi poligoni di base delle punte cilindriche inclinate verso l'alto

Dai grafici soprastanti si deduce che i risultati ottenuti approssimando un cerchio con poligoni regolari di 6,8,12 e 16 lati sono paragonabili. Le simulazioni con prismi a base dodecagonale e esadecagonale sono pressoché uguali quindi si è scelto di approssimare i cilindri a prismi a basi dodecagonali poiché comporta tempi computazionali inferiori. Dall'uguaglianza dei risultati delle ultime due simulazioni si può concludere che è lecito approssimare un cilindro ad un prisma con basi a 12 o più lati in quanto l'aumento del numero di lati porta il poligono ad assomigliare sempre più ad un cerchio ma l'esito delle simulazioni rimane il medesimo.

Per il dodecagono, utilizzato da ora in avanti per simulare le punte cilindriche, si sono prelevati tutte le grandezze di interesse, al fine di confrontarlo con le punte analizzate in precedenza, sia per entrambe le due differenti inclinazioni:

Provino con cilindri inclinati verso il basso			
Von Mises stress [MPa]	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
58.84	11.39	0.0053	0.76e-04

Tab.2.13. Valori delle grandezze registrate per le punte cilindriche inclinate verso il basso

Provino con cilindri inclinati verso il basso			
Von Mises stress [MPa]	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
59.08	12.79	0.0052	0.74e-04

Tab.2.14. Valori delle grandezze registrate per le punte cilindriche inclinate verso l'alto

Al fine di determinare la geometria, caratterizzata dalle punte inclinate di 45°, che meglio possa garantire l'adesione del composito sul corpo metallico, si sono confrontati i risultati delle simulazioni delle prove effettuate, tramite realizzazione di istogrammi per ogni grandezza presa in esame.

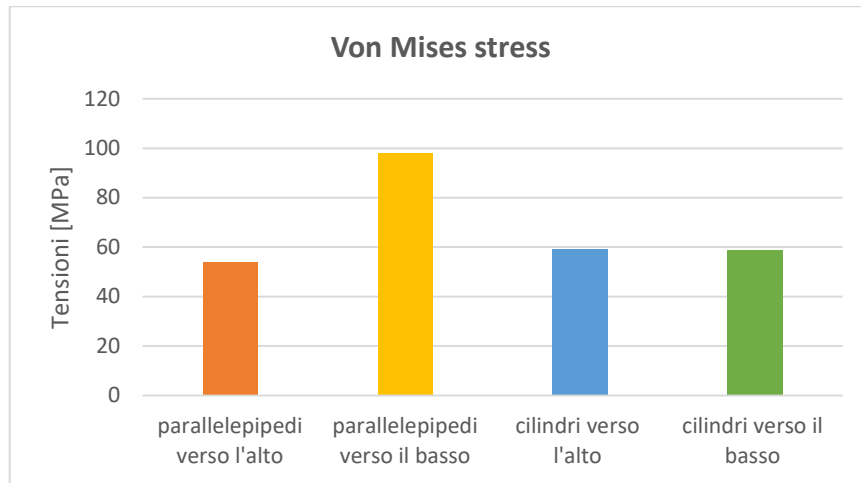


Fig.2.52. Istogramma di confronto delle tensioni di Von Mises dei modelli con punte inclinate

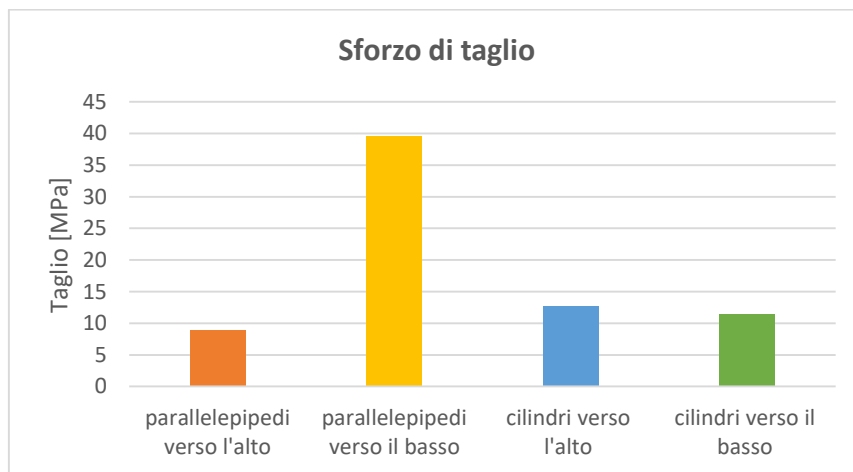


Fig.2.53. Istogramma di confronto dello sforzo di taglio dei modelli con punte inclinate

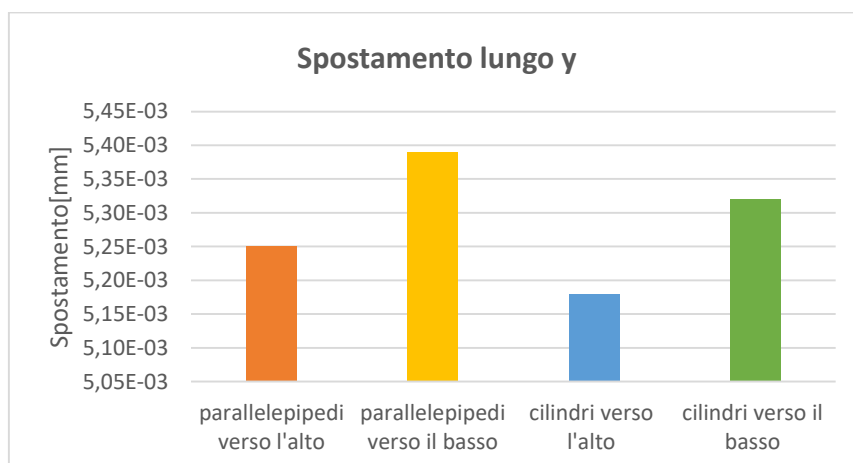


Fig.2.54. Istogramma di confronto dello spostamento lungo y dei modelli con punte inclinate

Per ottenere una buona tenuta, ci si aspetta che i valori di tensione per il materiale in esame siano bassi, in quanto ciò implicherebbe un profondo inserimento del composito tra le punte metalliche. Alto strumento di indagine importante è dato dallo sforzo di taglio, indice dello scorrimento relativo tra composito e provino metallico: alti valori suggeriscono uno scorrimento tra i due aderenti e quindi una scarsa tenuta del composito da parte delle punte metalliche.

A fronte di tali considerazioni, si passa all'analisi degli istogrammi sopra riportati: si nota che il provino con punte a forma di parallelepipedo verso il basso presenta valori decisamente superiori, di ciascuna delle caratteristiche considerate, rispetto a quelli degli altri provini. Da tale considerazione si deduce che tale geometria non è particolarmente adatta per garantire l'adesione del composito al metallo sottoposto a trazione pura. Si osservano, infatti, elevati sforzi di taglio e spostamenti nella direzione di trazione, segno del fatto che il composito scivola via dal metallo. Seguendo lo stesso ragionamento si è giunti ad affermare che il provino con punte a forma di parallelepipedo verso l'alto risulta il più adatto allo scopo. Anche le punte cilindriche, inclinate in entrambe le direzioni, presentano prestazioni buone, simili a quelle della geometria scelta.

2.3.4 Simulazioni FEM dei modelli con geometrie complesse

Al fine di comprendere la funzionalità delle punte e di confrontarle con quelle inclinate, si sono simulati i quarti di modelli con geometria complessa su Ansys. Il sistema di carichi e vincoli e la dimensione degli elementi solid92 sono gli stessi utilizzati per le altre geometrie. Ad ogni simulazione si registrano i valori massimi per le seguenti grandezze: tensione di Von Mises, sforzo di taglio sul piano YZ,

spostamento lungo la direzione del carico e deformazione. Tutti i dati si riportano in tabella, divisi per tipologia di punte.

Tipologia di punte	Von Mises stress [MPa]	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
Doppia piramide base 1.6 mm	94.93	10.24	0.0052	0.75e-04
Doppia piramide base 1 mm	57.36	12.36	0.0056	0.80e-04
Quattro uncini	111.52	19.89	0.0094	1.35e-04

Tab.2.15. Valori delle grandezze registrati per i provini a geometria complessa

Prima di procedere alla valutazione dei risultati appena ottenuti, è corretto sottolineare che, per effettuare le simulazioni delle punte a quattro uncini, si è dovuto tagliare il provino ulteriormente a metà, lungo la larghezza, così da poter impostare un mesh fitto, con elementi di 0.5 mm di lato, adeguato alla complessità della geometria. Il sistema di vincoli è rimasto il medesimo con l'unica variante sulla forza, divisa ulteriormente, che diventa di 125 N. È stato possibile effettuare questa semplificazione perché il provino tagliato è ulteriormente simmetrico lungo la larghezza.

Altra importante nota da aggiungere riguarda le geometrie non riportate in tabella, ovvero le punte con uncini doppi e quelle a forma di spirale. La motivazione risiede nel fatto che, per entrambi i modelli, la complessità geometrica delle punte è piuttosto elevata, tanto da poter essere simulata solo con un mesh così fitto che la licenza di Ansys non riesce a sostenere. Per tal motivo, non si è potuto procedere alla simulazione dei provini, ma si è deciso, comunque, di presentarli per dare far comprendere al meglio il ragionamento che sta dietro a questo lavoro di tesi. Dalla tabella è possibile notare come i valori registrati dalle

punte a 4 uncini si discostano molto dagli altri modelli probabilmente perché sono stati simulati per metà del modello, quindi ne deriva un confronto non propriamente esatto. Basandosi sempre sulle considerazioni fatte in precedenza sulle varie grandezze analizzate, si evidenziano delle prestazioni non ottimali anche per le restanti geometrie di punte complesse.

Per verificare queste basse prestazioni che affliggono le geometrie complesse, si è voluto subito mettere a confronto tali dati con quelli dei parallelepipedi inclinati verso l'alto, risultanti migliori fra i provini con punte inclinate. Si riportano, qui di seguito, due istogrammi, sullo sforzo di taglio e sullo spostamento lungo y, finalizzati a tale confronto:

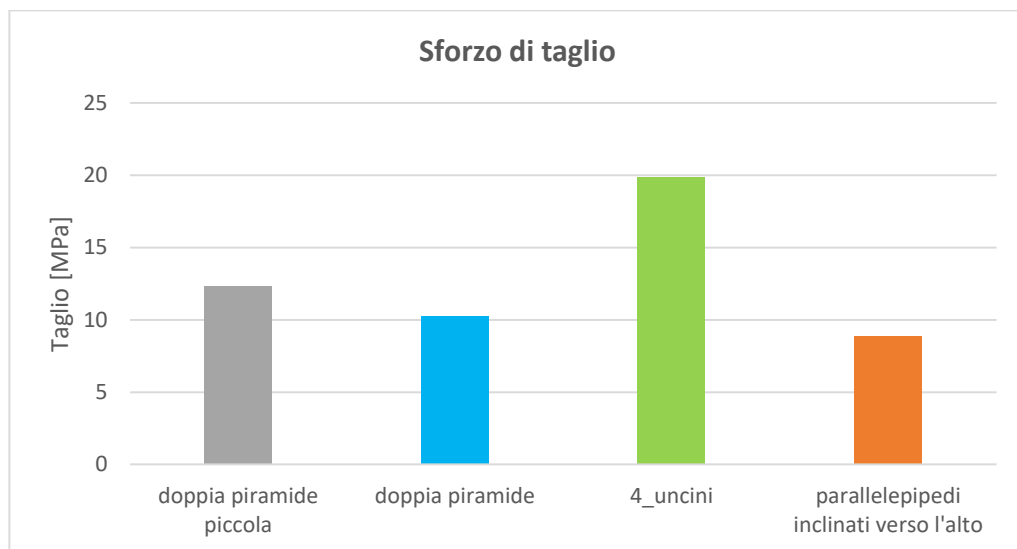


Fig.2.55. Istogramma di confronto dello sforzo di taglio tra le geometrie complesse

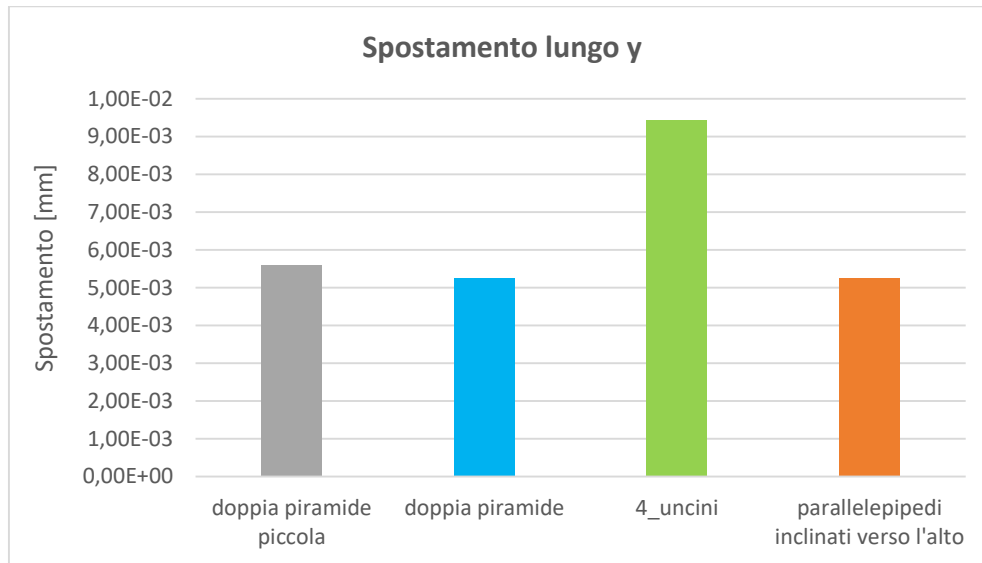


Fig.2.56. Istogramma di confronto dello spostamento lungo y tra le geometrie complesse

A conferma di quanto preannunciato sopra, anche dai grafici si nota come la complessità della geometria, alla fine, non ha prodotto i vantaggi e miglioramenti che hanno condotto alla sua progettazione iniziale. Di conseguenza, esse verranno escluse in quanto, si è visto che si possono ottenere risultati simili o, addirittura, migliori con punte di forme e produzione più semplici.

2.3.5 Confronto finale tra i modelli migliori

Anche se le punte inclinate sono già state analizzate separatamente per poi individuarne la forma più prestante, si è scelto di riprendere tutte le quattro tipologie e di metterle in confronto con le tre punte iniziali: parallelepipedo, piramidi e tronchi di piramide.

Come per i precedenti modelli, le simulazioni sono state prodotte con i modelli tagliati con le medesime condizioni di vincoli e carichi. Questi modelli, infatti, erano stati testati solo per la valutazione della tenuta della sola resina; vengono

quindi effettuate le dovute simulazioni con il composito e tracciati, nella seguente tabella, i dati relativi alle grandezze di interesse:

Tipologia di punte	Von Mises stress [MPa]	Stress YZ component [MPa]	Spostamento lungo Y [mm]	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
Tronco di piramide	44.53	6.28	0.0060	0.85e-04
Parallelepipedo	53.01	8.97	0.0060	0.85e-04
Piramidi	63.38	16.32	0.0070	1e-04

Tab.2.16. Valori delle grandezze registrati per le prime tre geometrie simulate con il composito

Osservando i grafici si può concludere che i provini con punte a forma di parallelepipedo inclinate verso l'alto risultano i più idonei al mantenimento della tenuta del composito sul metallo. Tale geometrie permettono infatti di avere sia bassi sforzi di taglio che spostamenti del composito sul metallo lungo la direzione di trazione, caratteristiche importanti per il mantenimento dell'adesione tra i due materiali.

Per il confronto, si sono realizzati due istogrammi, il primo per lo sforzo di taglio e il secondo per lo spostamento lungo y, finalizzati all'ottenimento di una visione più completa delle varie tipologie di punte progettate. I bordi dei rettangoli relativi ai modelli con punte inclinate vengono marcati per meglio distinguere questa categoria dalle restanti tipologie.

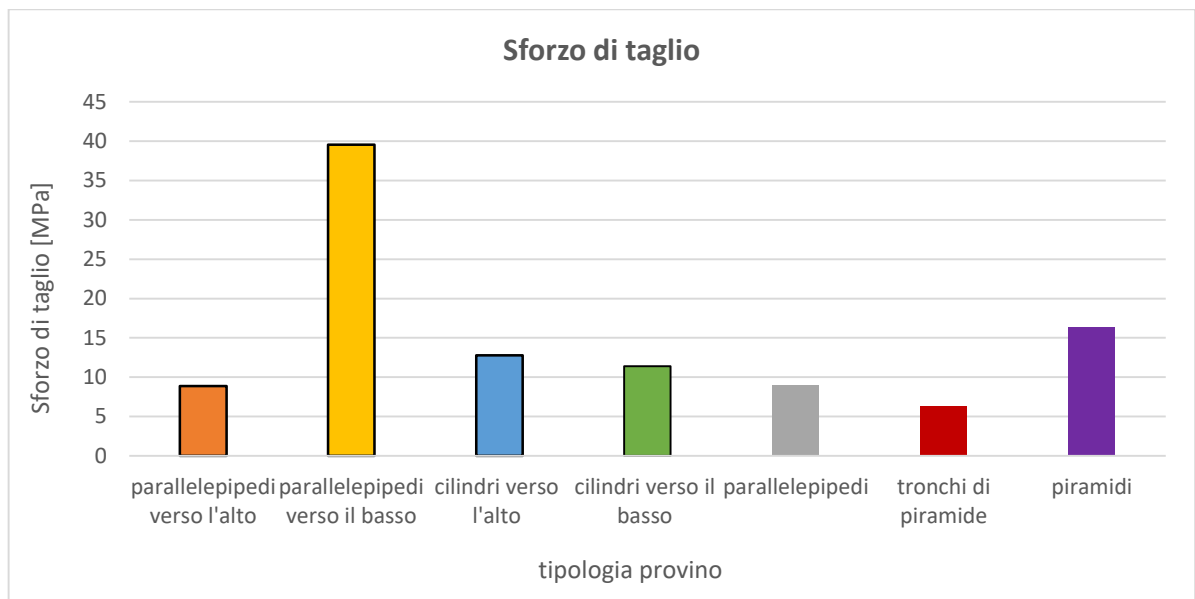


Fig.2.57. Istogramma di confronto dello sforzo di taglio tra i provini con punte inclinate e le tre geometrie semplici iniziali

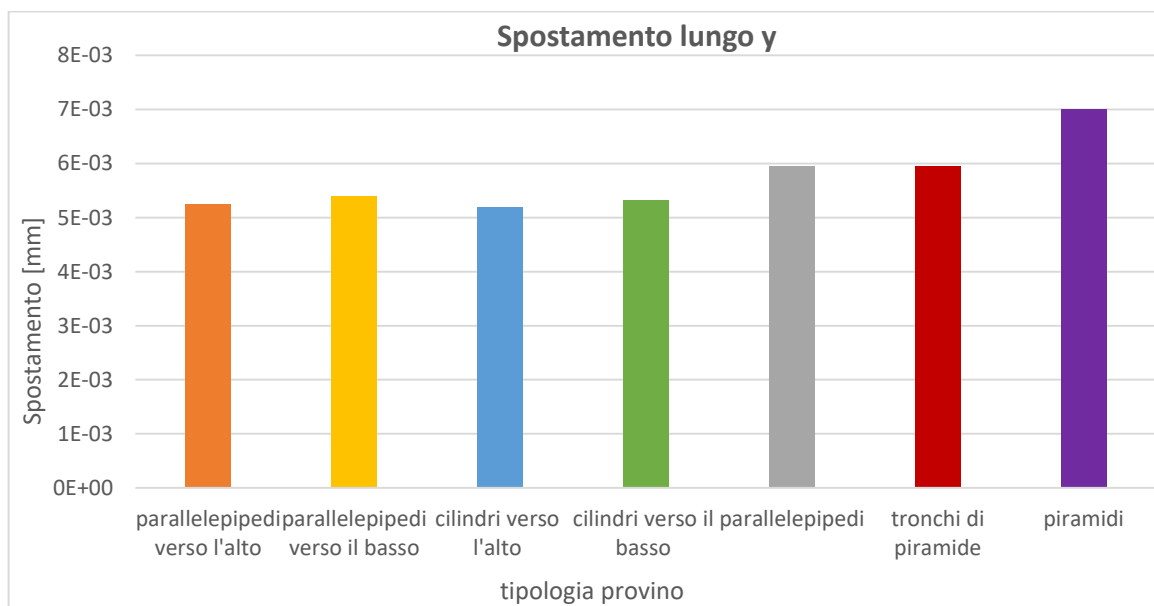


Fig.2.57. Istogramma di confronto dello spostamento lungo y tra i provini con punte inclinate e le tre geometrie semplici iniziali

Come già dimostrato in precedenza, le punte aventi parallelepipedo inclinati verso l'alto sono più adatti al trattenimento del solo composito e di conseguenza verranno isolati dagli altri modelli inclinati e inseriti nei prossimi istogrammi, così da avere un confronto più ravvicinato con le prime tre forme iniziali. Giunti al confronto finale, si può notare come i tronchi di piramide risultino i più idonei

allo scopo: essi registrano il valore più basso di sforzo di taglio, che suggerisce uno scorrimento del composito scarso rispetto al provino metallico e spostamenti lungo y, tra i più bassi, che confermano ancora una volta le sue buone prestazioni meccaniche. I dati raccolti fanno, dunque, credere che una tipologia di punte a forma di tronco di piramide possa, da una parte, penetrare a fondo nel composito, e dall'altra, trattenere bene le fibre al suo interno.

Giunti a questo punto dell'analisi, si potrebbe procedere con un confronto diretto della tenuta della sola resina sulle tre tipologie di punte descritte inizialmente e la tenuta del composito su tali provini. Si decide di non effettuare tale confronto in quanto, se per la resina si sono modellati correttamente tutti gli aspetti che descrivono tale materiale e che, dunque, possono conferire risultati soddisfacenti, per il composito si è ancora lontani da questa considerazione. Un materiale composito, così come già descritto nel Capitolo 1, non può essere considerato isotropo, così come viene impostato durante tutta questa prima fase di simulazione. Nei prossimi capitoli, questa proprietà meccanica verrà rivalutata, al fine di avvicinarsi sempre di più a un modello realistico, e solo a quel punto il confronto tra tenuta del composito e della sola resina sarà possibile.

Capitolo 3

Prove sperimentali

Questo capitolo si compone di una dettagliata presentazione dell'intero processo di stampa 3D dei provini metallici, finalizzati alle prove di trazione in laboratorio. Segue una descrizione delle procedure adottate per la costruzione del giunto metallo-composito, che prendono spunto dalla tecnica *co-cured*. A quel punto si passa alle prove in laboratorio che prevedono la trazione di lamine di materiale composito e, successivamente, dell'intera struttura provino-composito; i risultati ottenuti, da entrambi, si riportano su appositi diagrammi forza-spostamento, al fine di valutarne le prestazioni meccaniche e ricavarne il modulo elastico caratteristico.

3.1 Stampa 3D dei provini metallici

I componenti metallici della struttura sono stati realizzati con l'innovativa produzione additiva, in particolare mediante la tecnica PBF-LB/M (*Power Bed Fusion – Laser Beam / Metal*). Ciò è stato possibile grazie alla collaborazione con l'azienda Renishaw di Pianezza, produttrice di impianti per la stampa 3D di componenti metallici e fornitore di polveri metalliche di varia composizione, finalizzate alla progettazione di oggetti, anche di forma piuttosto complessa. [22]

La produzione dei provini metallici è avvenuta tramite polveri di Inconel625, una super-lega a base di Nichel con eccellenti proprietà meccaniche, resistenza alla corrosione e all'ossidazione, buona stabilità superficiale e buona resistenza alla deformazione termica.

Tale materiale, in genere, è composto da Nichel (61.0 wt%), Cromo (21.5 wt%) ed altri elementi di lega tra cui Ferro, Molibdeno e Niobio. È chiamata super-lega in quanto, anche in difficili condizioni ambientali, garantisce delle buone proprietà meccaniche di resistenza alla frattura e alla corrosione.

Per la stampa dei provini metallici adoperati è stata impiegata la macchina RenAM 500M, mostrata in Figura 3.1, la quale dispone di un unico laser per fondere gli strati di polveri. [22]

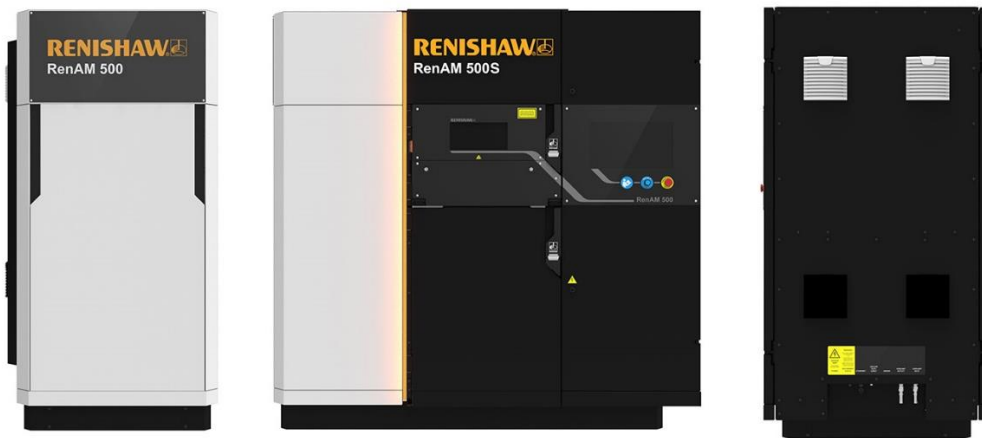


Fig.3.1. Macchina RenAM 500M usata per la stampa dei provini metallici [22]

La costruzione dei provini metallici, con le tecniche di AM, ha come punto di partenza lo sviluppo dei disegni, mediante il software SOLIDWORKS, proseguendo con il salvataggio del file in formato “.STEP”, il quale può essere letto dai programmi che si interfacciano con la macchina.

A quel punto, si procede con l’importazione nel software QuantAM, impiegato per posizionare il componente da stampare sul piano di lavoro, eseguire il *fixing* degli errori e decidere quale orientazione dovrebbe garantire il risultato migliore. Tale programma, inoltre, fornisce dei suggerimenti per quanto concerne la necessità o meno di supporti, durante il processo di produzione.

Poiché i pezzi vengono realizzati tramite fusione successiva di strati di polveri, alcune geometrie sono caratterizzate da superfici che non si possono considerare auto-sopportanti, come le superfici a sbalzo, perché il primo *layer* della sporgenza deve avere una base su cui poggiare per essere fuso. In questi casi, risulta fondamentale l’inserimento di appositi supporti, allo scopo di evitare che il laser bruci i vari strati o che le polveri, non fuse correttamente, comportino la sfaldatura del pezzo prodotto. I supporti sono dei parallelepipedi terminanti a tronco di

Prove sperimentali

piramide di cui si possono scegliere le dimensioni, l'inclinazione e il numero che serve per avere un'adeguata base d'appoggio per la deposizione e fusione delle polveri; ad esempio in prossimità delle punte dei provini si possono disporre dei supporti più fini.

Le superfici da supportare vengono identificate automaticamente dal software che le evidenzia con gradazioni di colore, che vanno dal giallo al rosso con l'aumento della criticità. Il colore giallo identifica le superfici che potrebbero causare delle problematiche durante la produzione ma che possono, comunque, considerarsi auto-supportanti.

Il primo lotto di provini, corrispondente ai provini con punte piramidali, a forma di tronchi di piramide e di parallelepipedi presenta superfici a sbalzo che hanno richiesto l'inserimento di supporti. Dalla Figura 3.3, si osserva infatti che i provini con punte piramidali presentano superfici evidenziate in giallo mentre i provini rimanenti hanno superfici evidenziate in rosso. Si è deciso quindi di considerare le superfici delle piramidi auto-supportanti e di inserire invece i supporti per le superfici dei parallelepipedi e dei tronchi di piramide come si osserva in Figura 3.3.

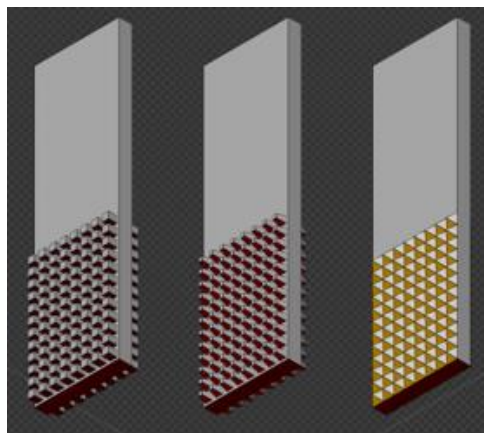


Fig.3.2. Schermata del software QuantAM per identificare le superfici da supportare [23]

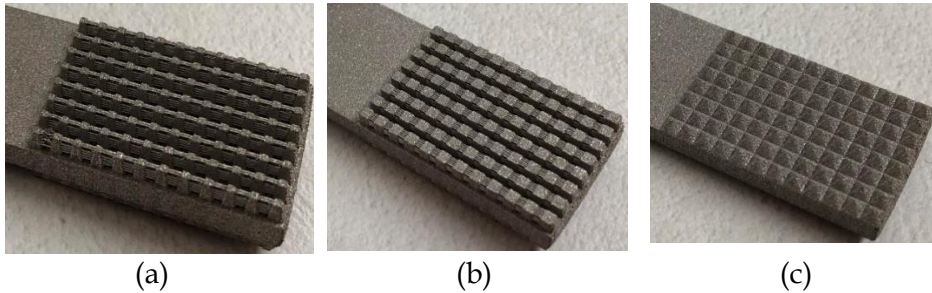


Fig.3.3. Stampa dei provini con supporti (a) tra le punte a forma di tronchi di piramide, (b) tra le punte a forma di parallelepipedi e (c) provini con punte piramidali senza supporti

Volendo evitare l'utilizzo dei supporti, si è cercato di progettare il secondo lotto di provini seguendo apposite regole dipendenti, anche, dal materiale reclutato per lo scopo, Inconel625. Per ciò che concerne i provini con punte inclinate, si è cercato di porre l'attenzione su alcuni aspetti:

- superfici inclinate di angoli minori o uguali a 45° permettono di ottenere buone finiture superficiali senza la necessità dei supporti;
- sottosquadra fino ad 1 mm possono essere costruiti senza supporti;
- i sottosquadra possono essere raccordati con raggio del raccordo fino a 10 mm o smussati con angoli di almeno 45° per renderli auto-supportanti;
- occorre lasciare una distanza maggiore o uguale a 0.3 mm tra due parti per evitare che si fondano una con l'altra.

Prendendo in considerazione tali accorgimenti, è stata necessaria una quantità inferiore di supporti, come viene mostrato in Figura 3.4. Il tentativo di diminuire, ove possibile, il numero di supporti o, addirittura, di non inserirli nasce dal fatto che essi devono essere poi eliminati con tecniche che potrebbero alterare il prodotto finale. Le superfici non supportate infatti presentano una finitura

superficiale diversa rispetto a quelle supportate, ma, per lo scopo di questo progetto di tesi, si pensa che questo aspetto sia trascurabile.

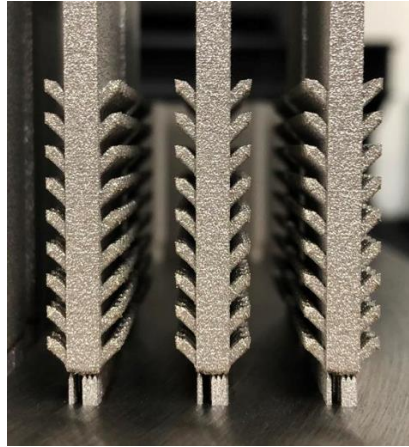


Fig.3.4. Stampa dei provini con punte inclinate senza l'ausilio di supporti

Dopo aver effettuato il *fixing* degli errori, deciso l'orientazione dei componenti sul substrato e aver inserito i supporti, si procede con la definizione del materiale. La fase successiva ha il compito di stabilire la stratificazione da adottare e i parametri della stampa, per poi salvare un file in formato .MTT. Importando questo file nuovamente in QuantAM è possibile verificare, tramite un'animazione, la corretta creazione dei *layer*, a partire dalla lastra di base; se le regole sono state correttamente soddisfatte, la stesura di un *layer* sull'altro viene mostrata in modo graduale, in caso contrario procede tutto simultaneamente e occorre aggiungere ulteriori supporti o pensare ad un nuovo design del componente. In aggiunta a ciò, il software consente di osservare la disposizione dei punti di fusione di ciascun *layer*. Il file .MTT è ora pronto per essere caricato in macchina e si può dare l'avvio alla stampa. Per semplicità, si schematizza il processo in Figura 3.5.

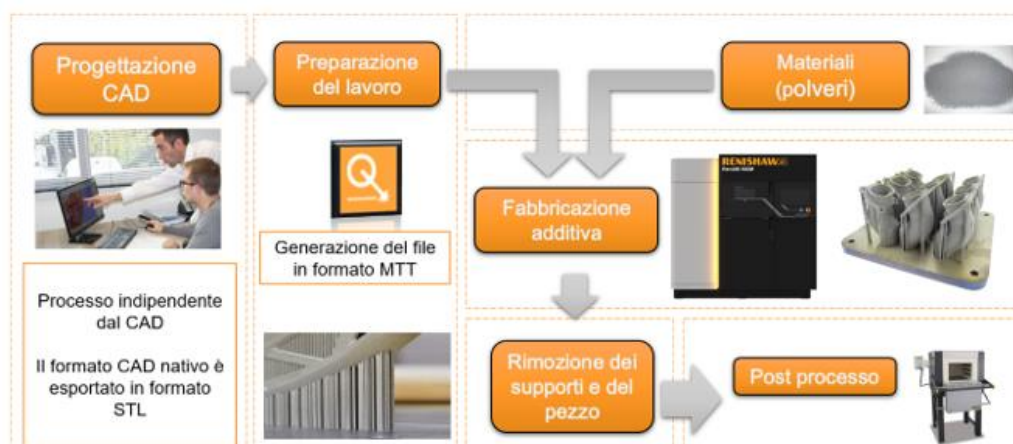


Fig.3.5. Processo seguito per la stampa dei provini, dal CAD alla macchina [23]

All'interno della macchina, per avviare la stampa, devono essere inserite nell'apposito vano le polveri di Inconel625, le cui caratteristiche vengono illustrate nella scheda tecnica riportata in appendice. Le polveri vengono setacciate in modo automatico all'interno della macchina, tutto in presenza di gas Argon. Le percentuali di gas necessarie vengono mantenute nei livelli stabiliti, grazie alla presenza di sensori che ne regolano il contenuto. Il setaccio garantisce che le polveri abbiano la distribuzione granulometrica desiderata; l'obiettivo è di ottenere granelli di polvere con dimensioni tra loro differenti per garantire il miglior impaccamento possibile e scorrevolezza adeguata al processo.

La macchina funziona in modo differente a seconda delle specifiche impostate dall'operatore, specifiche che riguardano in particolare il laser e la stesura delle polveri metalliche. In Tabella 3.1 vengono riportati i parametri principali che sono stati settati per la produzione dei provini metallici in esame.

Parametri principali settati sulla macchina		
Layer	Hatch	Border
Layer thickness: 40 μm	Power: 190 W Hatch distance: 110 μm Point distance: 90 μm Exposure time: 100 μs Hatch offset: -20 μm	Number of borders: 1 Power: 190 W Point distance: 90 μm Exposure time: 100 μs

Tab.3.1. Parametri di interesse impostati per la stampa 3D dei provini metallici [23]

È bene ricordare che le macchine Renishaw non hanno come parametro la velocità ma lo spazio tra un punto e l'altro di fusione, da cui è possibile ricavare la velocità media calcolando il rapporto tra spazio e tempo.

I pezzi vengono prodotti in un vano, mostrato in Figura 3.6, dove, attraverso l'utilizzo di appositi sensori, viene mantenuta un flusso omogeneo di gas Argon proveniente da fori di diversa inclinazione posizionati su ogni lato della camera di processo. La stampa ha inizio con la stesura sul substrato del primo strato di materiale per mezzo del *wiper* che dosa e distribuisce la polvere. Il laser fonde la polvere nella zona desiderata, il *wiper* torna indietro e il letto di polvere scende di uno strato verso il basso. Il processo si ripete fino al raggiungimento dell'intero pezzo.

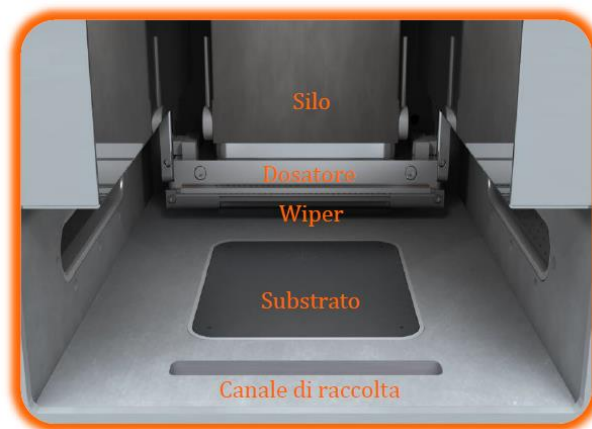


Fig.3.6. Interno della camera di processo [23]

Al termine della stampa, un operatore, con un pennello, manda le polveri non fuse verso un canale connesso ad un vano della macchina, all'interno del quale si trovano un setaccio e un filtro che permettono di riutilizzare le polveri non fuse per un secondo processo. Una volta rimossa la polvere in eccesso, si può prelevare

Prove sperimentali

dalla camera di processo il substrato su cui giacciono i provini stampati, come mostra la figura qui di seguito.

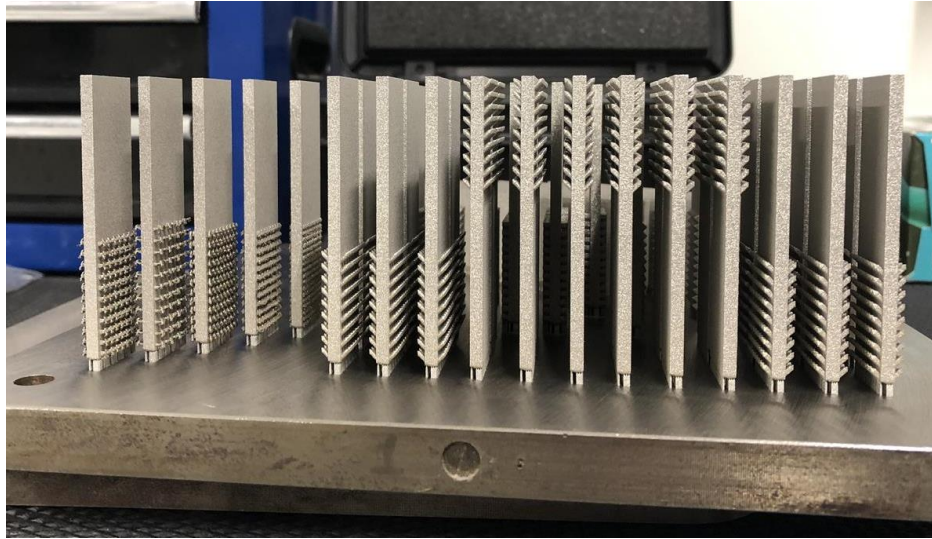


Fig.3.7. Provini appena estratti dalla camera di processo, ancora connessi al substrato mediante i supporti

Il passaggio successivo è dato dalla rimozione del substrato e degli eventuali supporti utilizzati, tramite la tecnica della sabbiatura. Anche in assenza di supporti, si è, comunque, deciso di sabbiare interamente i provini per migliorarne la rugosità superficiale; una foto di tale risultato è inserita qui di seguito.

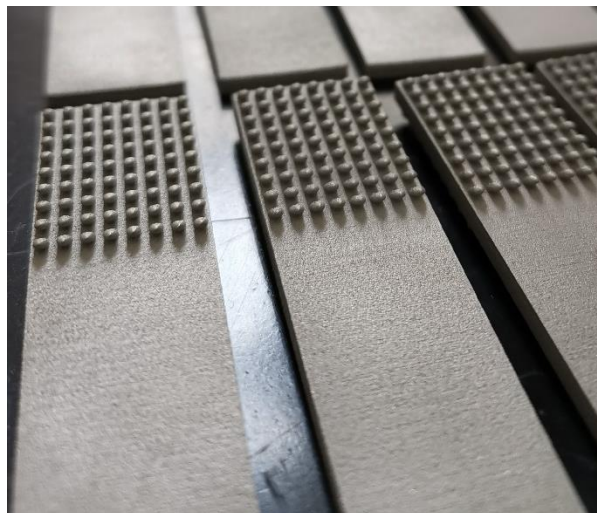


Fig.3.8. Foto di alcuni provini sabbiati

I provini con punte piramidali, a forma di parallelepipedo, a forma di tronchi di piramide e quelli con punte inclinate hanno prodotto i risultati desiderati e i

Prove sperimentali

supporti sono stati rimossi senza lasciare alcuna traccia di residui. Le punte di geometria complessa, invece, costruite senza l'utilizzo di supporti, presentano zone bruciate, geometrie distorte, parti che si staccano, zone in cui si hanno residui di polvere o polvere fusa male e solo alcune delle loro superfici positive sono accettabili. Ciò è riscontrabile dall'immagine in figura 3.9. Di conseguenza, si è deciso di non stamparli.

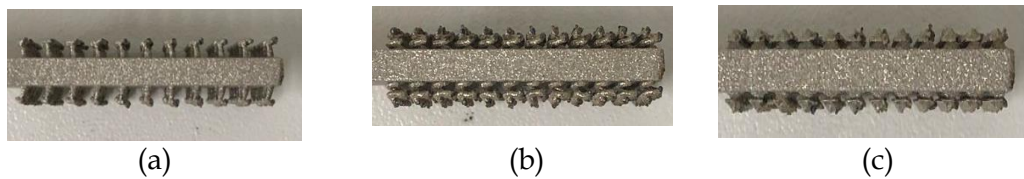


Fig.3.9. Stampa dei provini con punte di geometria complessa; (a) distorsione degli uncini, (b) punte a spirali bruciate e (c) doppie piramidi si sfaldano

Per le punte a spirale, si potrebbe provare a distanziare maggiormente le punte lasciando, mantenendo le stesse dimensioni oppure provando a sviluppare la spirale lungo un piano inclinato di 45° . Per ciò che concerne i provini con punte a doppia piramide, i risultati migliori si hanno con le punte di dimensioni maggiori ($h=1.7$ mm) ma, anche in questo caso, si dovrebbero distanziare maggiormente così da poter eventualmente inserire i supporti. I provini con punte a forma di uncini rotondi e i quattro uncini, infine, sono da escludere poiché non si può agire in alcun modo.

Tutti i provini vengono mostrati in Figura 3.10. In totale sono stati stampati 47 provini, 6 per ciascuna tipologia di punte realizzate, così da poter effettuare più prove a trazione per ogni giunzione e rendere i risultati analizzabili. Non sarebbe, infatti, corretto affidare l'intera analisi solo su un provino per forma di punte. Nella figura che segue, in alto a destra, si sono raggruppati i provini, non andati a buon fine dopo la stampa, caratterizzati da punte con geometria complessa; essi

Prove sperimentali

saranno utilizzati come prova per affinare la tecnica e il settaggio della macchina di trazione.

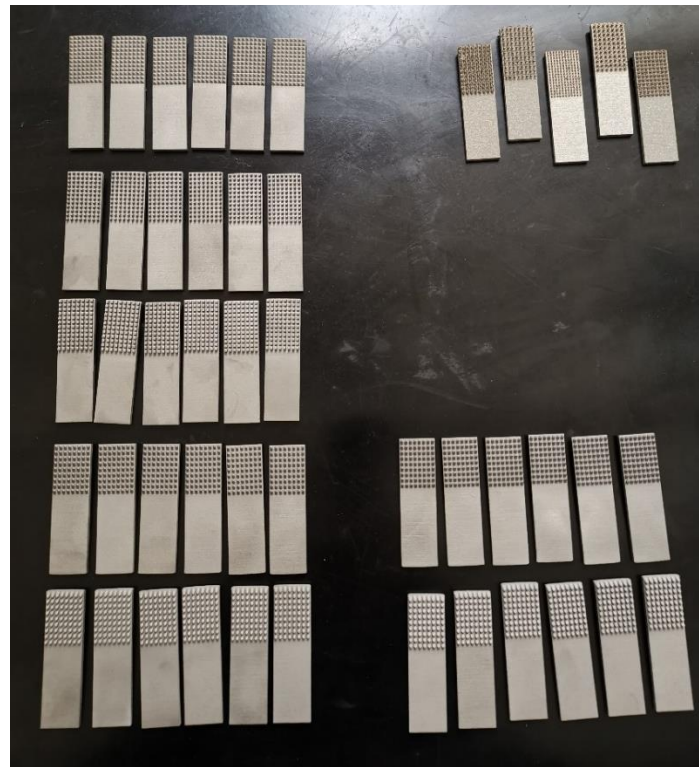


Fig.3.10. Provini stampati e sabbiati

C'è anche la possibilità di effettuare trattamenti termici successivi alla stampa e, generalmente, si eseguono con il semplice scopo di diminuire la rugosità del pezzo finito; si distinguono in base alla funzione che possiede il singolo componente. In questo caso si sono utilizzati provini non trattati, ma risulterebbe, comunque, interessante osservare l'influenza di tali trattamenti sull'aderenza. [23]

3.2 Banco di prova e procedura di esecuzione

In seguito alla stampa dei provini metallici, si è proceduto con la realizzazione della giunzione *co-cured* tra metallo e composito. L'idea alla base è che la giunzione tra i due materiali avvenga simultaneamente alla creazione del materiale composito. Nelle prime fasi di progetto, si pensava di realizzare dei provini doppi,

Prove sperimentali

ovvero con due strati di composito, allo scopo di evitare l'insorgenza di un momento flettente tra forza applicata e vincoli alla base. Si è giunti alla conclusione che fosse più semplice analizzare i diagrammi forza-spostamento riferiti ad un'unica giunzione, ottenendo, tra le altre cose, la possibilità di effettuare un numero doppio di prove.

Si è ideata, dunque, una procedura ripetibile che garantisca l'ottenimento di lastre di composito il più possibile planari e dello spessore di 3 mm, uguale a quello dei provini metallici. Il composito prevede l'impiego di una matrice di resina epossidica e di un rinforzo in tessuto, dato dall'intreccio in due direzioni ortogonali di fibra di carbonio. La resina epossidica è formata dalla miscela di un sistema epossidico parte A che, unito al sistema di parte B, permette la stesura e l'indurimento della resina; il tessuto in fibra di carbonio è di tipologia twill. Si riportano delle immagini di tutti i materiali utilizzati, qui di seguito. In appendice, nelle schede tecniche relative, è possibile, invece, analizzare le specifiche proprietà dei due componenti del composito.



Fig. 3.11. Sistema epossidico parte A e parte B da miscelare per formare la resina e distaccante polivinilico che permette di staccare la resina dal piano di lavoro

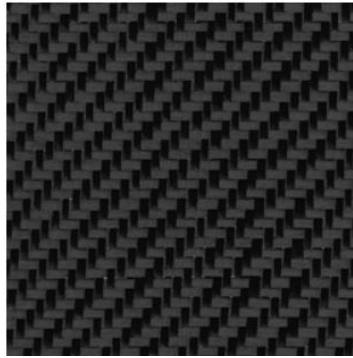


Fig. 3.12. Tessuto in fibra di carbonio di tipo twill

I passaggi del processo di costruzione del giunto prevedono di:

- tagliare dei rettangoli di tessuto in fibra di carbonio delle dimensioni di circa 100 mm x 60 mm con l'ausilio di un paio di forbici;
- pesare, mediante bilancia di precisione, la resina parte A e parte B ricordando che i quantitativi per l'ottenimento del risultato desiderato prevedono una proporzione di 100:26 tra le due parti. Per la creazione completa di due giunzioni sono state in media utilizzati 80 g di parte A e 20.8 g di parte B;
- preparare il set up sperimentale (Fig. 3.13) che richiede l'impiego di supporti in plastica, per ottenere planarità, adagiati su un piano di lavoro anch'esso di materiale plastico. È importante stendere su queste superfici uno strato di distaccante polivinilico per agevolare la rimozione della resina una volta che si è asciugata;



Fig. 3.13. Materiale utilizzato per realizzare le giunzioni

- avvolgere la zona dei provini metallici opposta a quella su cui si vuole lavorare con nastro adesivo per non far penetrare la resina nelle parti che devono essere mantenute pulite;
- posizionare i provini all'interno della finestra ritagliata sui supporti in plastica con il lato coperto dall'adesivo verso il basso;
- unire in un bicchiere e mescolare per alcuni minuti la parte A e B della resina. A partire da questo momento la resina inizia ad indurirsi;
- al fine di permettere un miglior posizionamento delle fibre tra le punte, si incastrano manualmente singole fibre di carbonio impregnate di resina tra le punte del provino in direzioni ortogonali tra loro (Fig. 3.14) e si stende al di sopra uno strato di resina per fissarle, utilizzando un pennello;



Fig. 3.14. Inserimento singole fibre manualmente impregnate di resina tra le punte

- posizionare poi un rettangolo di tessuto di fibra di carbonio e stendere uno strato di resina (Fig. 3.15). Ripetere questo passaggio fino a creare 12 strati;

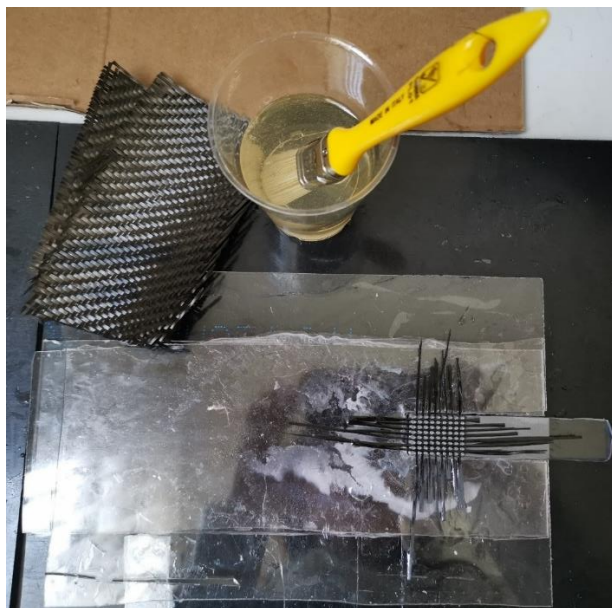


Fig. 3.15. Posizionamento dei rettangoli di tessuto

- posizionare un foglio di plastica con strato di distaccante sopra l'ultimo strato di resina (Fig. 3.16) e ricoprire il tutto con una lastra di plastica o metallo che permette la distribuzione dei pesi;

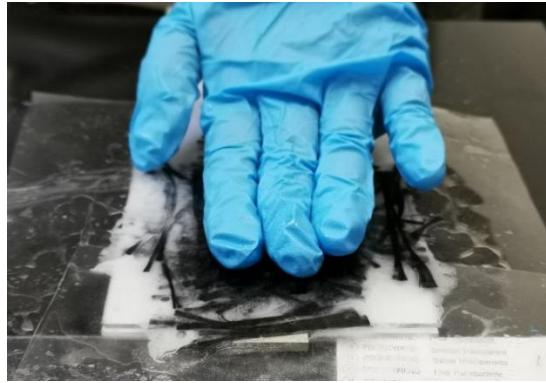


Fig. 3.16. Posizionamento di un foglio di plastica sull'ultimo strato di resina

- posizionare dei pesi per ogni provino, in particolare 6 kg permettono di ottenere compositi di 3 mm di spessore (Fig. 3.17);

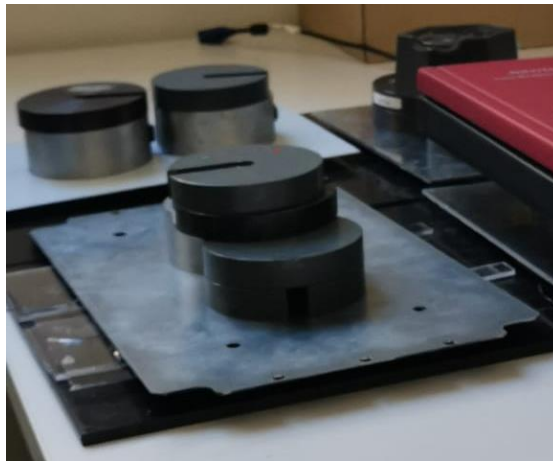


Fig. 3.17. Posizionamento dei pesi (6 kg)

- lasciare asciugare per almeno 24 ore e distaccare poi la struttura indurita dal piano di lavoro. Il risultato che si ottiene viene mostrato in Figura 3.18;



Fig. 3.18. Provino asciutto rimosso dai supporti in plastica

- tagliare infine i compositi con una sega a nastro per ottenere le dimensioni desiderate (Fig. 3.19).

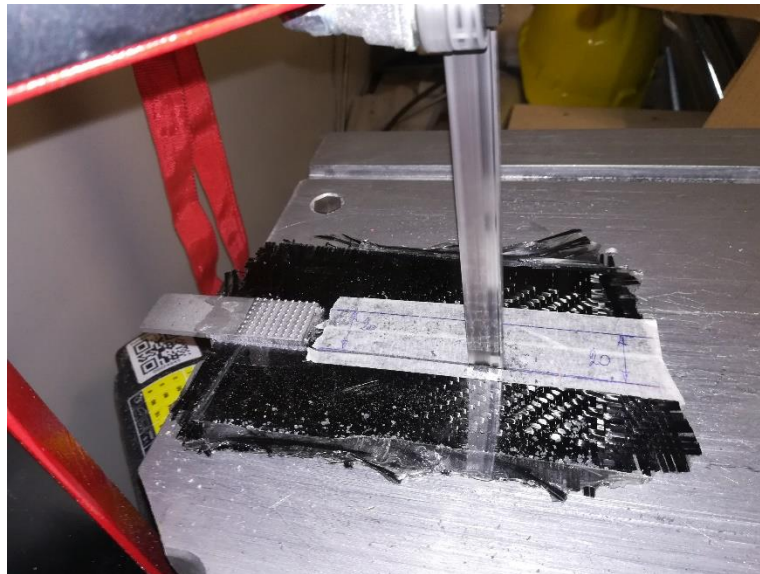


Fig. 3.19. Taglio della parte di composito in eccesso

Il procedimento è stato ripetuto per il numero di provini metallici stampati, 42 in totale, divisi a gruppi di sei per tipologia di punte. È bene precisare che per il provino con punte piramidali non è stato possibile inserire le singole fibre manualmente in due direzioni ortogonali a causa della mancanza di una

Prove sperimentali

spaziatura tra una punta e quella adiacente, quindi si sono adagiate soltanto le fibre in direzione perpendicolare alla direzione di applicazione del carico.

Per una migliore distinzione, tutti i provini sono stati, in seguito, etichettati, tramite lo stesso numero sul composito e sul metallo al fine di poter distinguere le varie strutture sia prima che dopo la rottura del giunto, come mostrato in Figura 3.20. È importante infatti correlare i risultati della prova a trazione con la modalità di rottura del giunto e con la sua produzione.

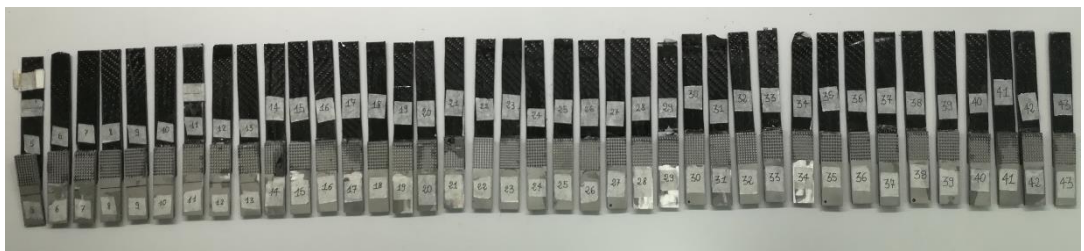


Fig. 3.20. Provini finiti ed etichettati

È ora possibile procedere con le prove a trazione per testare la tenuta a taglio della giunzione metallo-composito.

3.3 Prove di trazione su macchina

Una volta realizzati ed etichettati tutti i provini, l'obiettivo è quello di valutare il comportamento sforzo-deformazione dei vari giunti, che, solitamente, viene caratterizzato mediante prova a trazione in macchina. A tal scopo, è stata utilizzata la macchina a trazione Instron 8801, avente capacità di carico di 100 kN, disponibile nel laboratorio di Ingegneria meccanica del Politecnico.

Le prove che si possono realizzare con tale macchina sono: test di tipo statico, dinamico, di meccanica della frattura e di fatica, sia con basso che con alto numero di cicli.

Prove sperimentali

La configurazione e la taratura della macchina vengono effettuate tramite il software Console, il quale fornisce un controllo completo in remoto della trazione. In aggiunta si può evidenziare una vasta gamma di dispositivi, morse e accessori, utili alle varie prove; tra questi si ha una cella di carico il cui scopo è quello di compensare carichi di tipo inerziale.

Si riporta un'immagine relativa al modello di macchina a trazione utilizzata per le varie prove, al fine di comprendere al meglio la sua struttura e i suoi componenti.



Fig. 3.21. Macchina a trazione utilizzata per le prove sperimentali in laboratorio

La trazione avviene in controllo di spostamento e tramite un'apposita cella di carico, è possibile risalire alla forza necessaria ad ottenere uno spostamento simile sul provino. Queste due grandezze sono fondamentali per l'analisi che segue la trazione, ovvero la realizzazione di appositi diagrammi forza-spostamento; da

essi sarà possibile risalire al valore di modulo di Young tipico di ogni tipologia di punte, obiettivo, questo, principale delle prove sperimentali.

3.3.1 Prove di trazione del materiale composito

Le simulazioni numeriche sono state, fino a questo punto, effettuate attribuendo ai materiali le caratteristiche riportate in letteratura. È risaputo però che, in particolare modo per il composito, esse dipendono molto da come è stato prodotto il materiale, pertanto, per rendere il modello più conforme alla realtà risulterebbe più corretto l'utilizzo del modulo di Young specifico del composito, realizzato manualmente in laboratorio. Al fine di determinarne il modulo elastico, necessario per eseguire delle nuove simulazioni numeriche più accurate, si sono effettuati dei test di trazione su lamine di composito di dimensioni: 20 mm di larghezza, 130 mm di lunghezza e 3 mm di spessore. Queste lastre sono state ricavate dai ritagli di materiale che eccedevano la zona della giunzione nei provini. Dopo aver tagliato le lastre di composito, come mostrato in figura 3.10, si sono levigati i bordi con la carta vetro per rendere i provini il più possibile dritti e simili l'uno all'altro. Gli afferraggi della macchina sono stati posizionati nei primi e negli ultimi 20 mm di lunghezza della lamina lasciando quindi 90 mm liberi, come schematizzato in Figura 3.22.



Fig. 3.22. Taglio dei provini con l'ausilio di una sega a nastro

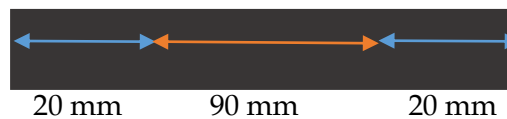


Fig. 3.23. Schema illustrative del posizionamento degli afferraggi della macchina a trazione

Tutte le prove sono state condotte in controllo di spostamento, imponendo una velocità di trazione pari a 1 mm/min, e ricavando per ogni spostamento la relativa forza fino al raggiungimento del carico di rottura. È importante impostare correttamente i valori di minimo e massimo della corsa della macchina poiché, da una scelta errata di tali parametri, si può incorrere in un eccessivo precarico di compressione o rischiare una trazione continua anche dopo lo scollamento totale del giunto.

Un precarico di compressione troppo elevato può portare ad una condizione di instabilità elastica, che comprometterebbe la buona riuscita della prova. Durante l'esecuzione si sono riscontrate delle difficoltà, comuni a tutte le sei lastre di composito. L'ostacolo più grande è legato al fatto che ognuna di esse sia caratterizzata da un assottigliamento dello spessore su entrambe le due estremità,

Prove sperimentali

superiore ed inferiore. Inoltre, la non perfetta linearità, comune a tutti i compositi, genera un momento flettente, ovviamente non desiderato, che va a influenzare fortemente i risultati ottenuti a fine prova. L'afferraggio superiore della macchina presenta una geometria "a trapezio" tale per cui si ha un allargamento alla sua base rispetto alla parte superiore, nella quale il provino risulta più afferrato; ne risulta quindi una forza di presa distribuita in modo non omogeneo sul provino. Di seguito, viene riportato il grafico forza-spostamento contenente gli andamenti dei sei volumi di composito, registrati durante le prove di trazione.

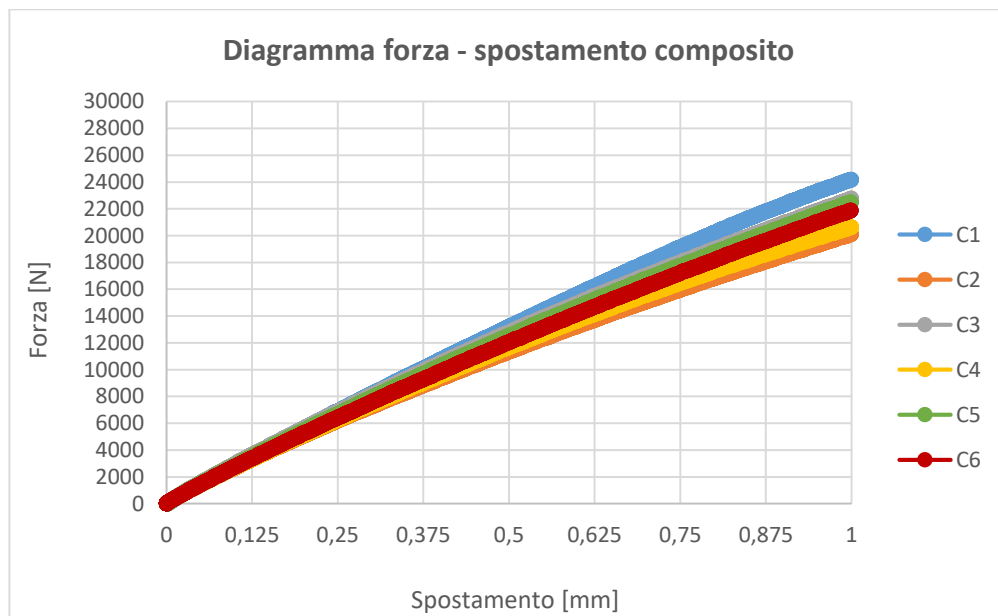


Fig. 3.24. Diagramma forza-spostamento relativo alla messa in trazione dei sei provini di composito

Dal grafico, si nota come gli andamenti di tutti i provini di composito siano pressoché simili con comportamento pressoché lineare per tutti i compositi fino a rottura. Di conseguenza, si può trattare tale composito come un materiale lineare isotropo, come è stato supposto nelle prime simulazioni numeriche del Capitolo 2. In aggiunta a ciò, una così spiccata similitudine tra i risultati è conferma del lavoro manuale svolto durante la fabbricazione dello stesso materiale composito; la procedura, seppure affetta da ovvie imperfezioni, poiché derivante da una

lavorazione manuale, mostra una discreta ripetibilità. Vengono riportati in una tabella i valori dei carichi massimi raggiunti da ogni singolo provino da cui si è calcolato il carico medio di rottura che è risultato essere di 33833 N.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Carico massimo [N]	38674	29182	38500	33348	32905	30391

Tab.3.2. Carichi massimi a trazione raggiunti dai provini di composito

Al fine di calcolare il valore del modulo elastico, si è proceduto con un'operazione di *fitting* degli andamenti, sopra riportati. Tramite l'utilizzo del metodo dei minimi quadrati, *least-squares linear fit*, si sono ottenute sei rette, passanti per l'origine, derivanti da una regressione lineare delle curve sperimentali. Tale metodo consiste nel rappresentare le distribuzioni delle coppie di dati misurati con una funzione matematica, spesso con una retta della forma: $Y = ax+b$. L'obiettivo è il calcolo dei coefficienti a e b della retta che meglio interpola i dati; viene utilizzato, dunque, il metodo dei minimi quadrati anche detto regressione lineare. Per ciascuna coppia di dati (x_i, y_i) misurati, si può ottenere, dall'equazione della retta, un valore $Y_i = a x_i + b$ e si può stimare l'errore e il quadrato dell'errore:

$$e_i = Y_i - y_i$$

$$e_i^2 = (Y_i - y_i)^2 = (ax_i + b - y_i)^2$$

da cui si ricava che la somma dei quadrati degli errori di tutte le n coppie di dati rispetto alla retta interpolante è:

$$E = \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2$$

Per determinare i coefficienti della retta di fitting si impongono le derivate di E rispetto ad a e b pari a zero così da trovare a e b che minimizzano l'errore:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 = \sum 2(ax_i + b - y_i)x_i$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 0 = \sum 2(ax_i + b - y_i)$$

Risolvendo il sistema contenente queste due equazioni si ottiene:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

ovvero si determina la retta $Y = ax + b$ che meglio rappresenta i dati raccolti.

Nel caso in esame, poiché tutte le curve ottenute sperimentalmente passano dall'origine, si è deciso di eseguire un *fitting* con rette aventi l'intercetta nulla ($b = 0$) pertanto si hanno rette di equazione $Y = ax$ e il coefficiente a si può calcolare come:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Per la stima della bontà del fitting di ogni curva, si è soliti calcolare il coefficiente di determinazione R^2 come segue:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (ax_i + b - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\text{devianza di } y \text{ rispetto alla retta}}{\text{devianza totale di } y}$$

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

dove $\bar{y}$ è la media dei valori y_i .

Tale coefficiente assume valori di almeno 0.99 per tutte le curve per cui è stata eseguita la regressione lineare; la vicinanza all'unità è il segno che la retta ottenuta fitta bene i dati di partenza. [24] Successivamente, al fine di avere un'unica retta che potesse rappresentare l'andamento forza-spostamento generale del materiale composito, si è calcolata il valor medio dei coefficienti angolari, il quale diventerà il coefficiente angolare della retta interpolante finale.

La retta ha equazione $Y = 23262.81x$ e viene identificata con il colore blu in figura 3.25.

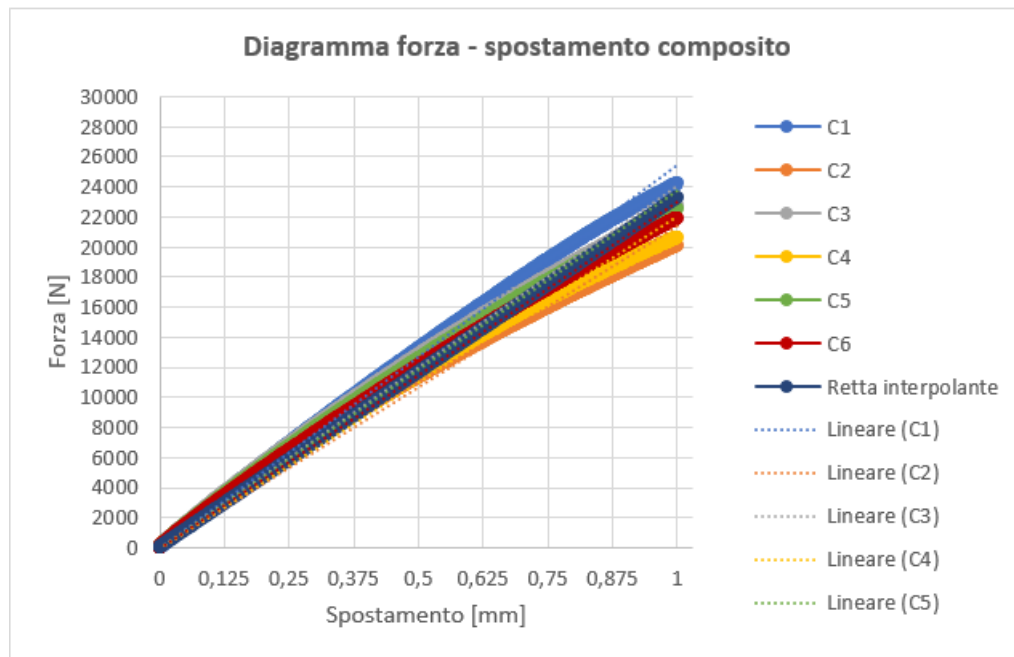


Fig. 3.25. Operazione di fitting lineare degli andamenti forza-spostamento dei provini di composito

Dal grafico, si nota come la retta interpolante riesce a fittare bene tutti gli andamenti del materiale composito e risulta quindi molto rappresentativa. A questo punto, è possibile ricavare il valore di modulo elastico del materiale composito, motivo per cui è stata realizzata tutta questa analisi. Inizialmente si è preso un punto casuale della retta interpolante, si è divisa la sua ascissa per 90 mm, ovvero la lunghezza iniziale del provino di composito e la sua ordinata per 60 mm², cioè la superficie su cui agiscono le forze distribuite di trazione della macchina. Dal rapporto tra forza e superficie si ottiene il valore di tensione, misurato in MPa, e dal rapporto tra spostamento e lunghezza iniziale si ottiene il valore di deformazione adimensionale.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{23,262}{60} = 0,39 \text{ MPa}$$

Prove sperimentali

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{0,001}{90} = 1,11 * 10^{-5}$$

Avendo preso tali valori di forza e spostamento dal tratto lineare elastico, è possibile sfruttare la legge di Hooke:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Dal rapporto tra tensione e deformazione si è ricavato il valore di modulo di Young del materiale composito:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$

$$E = \frac{0,39}{1,11 * 10^{-5}} = 34984,21 \text{ MPa}$$

Il modulo elastico ottenuto rientra nel range di valori proposto in diversi articoli scientifici, in cui si descrivono le proprietà dei materiali elastici; ciò fa ben sperare che i calcoli, i metodi e la lavorazione stessa del materiale composito siano stati effettuati correttamente, potendo così considerare tale valore valido. La variabilità del modulo elastico di un materiale composito è molto elevata perché dipende da una grande quantità di fattori, quali, ad esempio, la percentuale in volume delle fibre di carbonio rispetto alla resina epossidica, il tipo di trama del tessuto di fibre e della loro alta o bassa densità, dalla quantità di resina utilizzata per il composito, dal peso usato per comprimerlo durante la fase di asciugatura in cui matrice e fibre si compattano diventando un unico componente e tanti altri. Per stimare, infatti, il modulo di Young, del composito nella direzione parallela alle fibre si potrebbe utilizzare la seguente formula:

$$E_1 = E_f \varphi + E_m (1 - \varphi)$$

Dove φ è la percentuale in volume di fibra, E_m il modulo elastico della matrice e E_f il modulo elastico della fibra. In questo lavoro di tesi si sono utilizzati 12 strati di tessuto di fibra di carbonio di dimensioni 130 mm * 20 mm * 0,2 mm, la fibra ha

Prove sperimentali

un modulo elastico di 141 GPa e la resina ha un modulo di Young di 3 GPa.

Pertanto:

$$\varphi = \frac{\text{volume strati di fibra}}{\text{volume finale composito}} = \frac{12 * 0,2 * 130 * 20 \text{ mm}^3}{130 * 20 * 3 \text{ mm}^3} = 0,8$$

$$E_1 = E_f \varphi + E_m(1 - \varphi) = 231000 * 0,8 + 3000 * (1 - 0,8) = 185400 \text{ MPa}$$

Aumentando la percentuale in volume di resina si ha un aumento della duttilità e un decremento delle proprietà meccaniche del composito, come mostrato in figura 3.26, poiché la resina ha un comportamento duttile mentre il rinforzo è caratterizzato da un comportamento fragile.

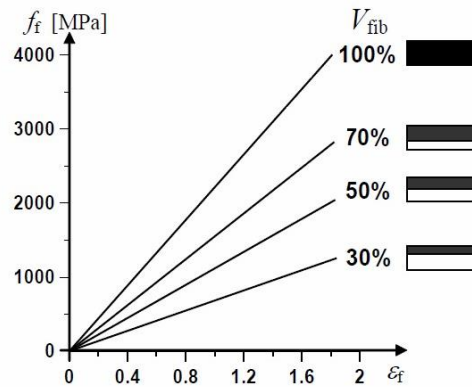


Fig. 3.26. Influenza della percentuale in volume delle fibre sulle proprietà meccaniche del materiale composito. [25]

Inoltre, nei materiali compositi le proprietà meccaniche dipendono dall'orientazione delle fibre in base alla direzione di applicazione dei carichi a da come queste sono posizionate per la formazione del tessuto. Si è osservato infatti che con fibre orientate parallelamente al carico si raggiunge la massima resistenza, resistenza che decresce aumentando l'angolo di inclinazione [24].

Questo valore risulta più del doppio di quello ricavato sperimentalmente probabilmente a causa delle imperfezioni e dei difetti dovuti alla lavorazione manuale e nella prova di trazione. È giusto, quindi, tenere conto di ognuno di questi fattori per poter concludere che il modulo elastico di circa 35000 MPa è

Prove sperimentali

strettamente legato al materiale composito che realizzato in laboratorio in questo specifico caso. Pertanto, utilizzando tale modulo elastico nelle simulazioni numeriche si dovrebbero ottenere risultati più simili a quelli rilevati con le prove sperimentali.

3.3.2 Prove di trazione del modello completo

Portate a termine le prove sulle lastre di materiale composito, si è preso in considerazione l'intero modello, al fine di stimare le tenute delle varie tipologie di giunto metallo-composito.

A differenza di quanto simulato a livello numerico su Ansys, il modello posto in trazione in macchina non contiene i due strati di composito paralleli al provino, ma soltanto uno di essi. La scelta di realizzare, inizialmente, lo strato di materiale composito sulle punte di una sola faccia del metallo nasce dalla considerazione che il momento flettente, generato dalla forza applicata sull'estremità superiore del modello e la base incastrata del provino, può facilmente essere gestito con l'inserimento di uno spessore metallico. Questo ultimo viene posto tra la porzione superiore del composito e l'afferraggio della macchina, così da annullare il braccio che si verrebbe a creare tra forza e reazione vincolare alla base.

Oltre alla motivazione principale per cui si è scelto di inserirla, tale lastra metallica consente al composito di non giungere a una probabile rottura, causata dalla forza di compressione esercitata dall'afferraggio stesso. Di seguito, si riporta un'immagine relativa agli strati metallici inseriti durante le prove di trazione.



Fig.3.27. Foto degli spessori metallici utilizzati per le prove di trazione dell'intero modello

Uno degli aspetti su cui si è posta maggiore attenzione, durante la realizzazione del composito, è la sua planarità, la quale evita spiacevoli curvature del modello durante la trazione. Prima di avviare la prova, si sono testati diversi tipi di afferraggi al fine di trovare quello più adatto alla tenuta delle due estremità, i cui materiali, ricordiamo, sono di origine ben differente. Successivamente, si è stimata la lunghezza minima del composito per un corretto inserimento all'interno dell'afferraggio; durante la sua realizzazione, infatti, si erano appositamente tagliati degli strati di tessuto in fibra di carbonio lunghi, così da poterne, in seguito, sceglierne la dimensione utile alla prova.

Non essendo certi che il *setting* della macchina fosse adatto alla prova, si sono presi quattro modelli di prova per la valutazione della trazione. In questa prima fase, si è deciso di afferrare il provino metallico ad una distanza di 30 mm dalla sua base e il composito a 60 mm dalla prima fila di punte più in alto. Essendo i compositi dei modelli di prova di lunghezze differenti, si è andata a variare la distanza sul tale materiale per adattare al meglio l'intero modello tra i due afferraggi della macchina di trazione.

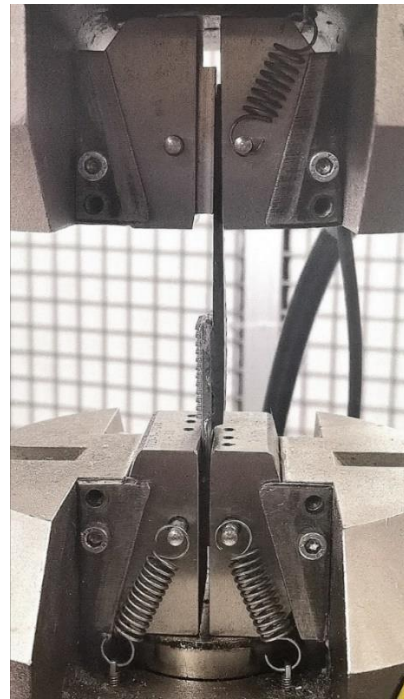
L'inserimento del modello prevede una procedura costante: si afferra, come prima parte, il provino metallico e solo in seguito, abbassando quanto necessario l'afferraggio superiore, si procede con l'incastro dell'estremità superiore del

Prove sperimentali

composito. È in questo preciso istante, quando si chiude l'afferraggio superiore, che nel modello si genera un pre-carico in compressione, derivante dall'assestamento degli afferraggi con il provino; è un aspetto, questo, che non può essere evitato totalmente, ma può essere gestito per evitare che si giunga a rottura ancora prima dell'inizio della trazione. Una volta gestito questo fattore, la sollecitazione indotta dal pre-carico viene velocemente recuperata dall'azione di trazione della macchina stessa. Per completezza vengono inserite delle foto, scattate in laboratorio, che illustrano un modello intero collocato all'interno della macchina, qualche minuto prima che venisse azionata.



(a)



(b)

Fig.3.28. Foto di un modello intero afferrato all'interno della macchina di trazione (a) e di un suo zoom sugli afferraggi (b)

Nell'immagine sopra, Fig.3.28 (b), è visibile lo spessore metallico che viene usato all'interno dell'afferraggio superiore, a contatto con l'estremità del materiale composito.

Prove sperimentali

L'impostazione della trazione sul modello avviene in modo graduale: si impone un carico via via crescente e, tramite una cella di carico posta sulla parte superiore della macchina, se ne rileva il modulo della forza necessaria a ottenere tale spostamento. Il controllo avviene in remoto mediante un software, con il quale si possono scegliere valori come la velocità di trazione, impostata a 1 mm/min per tutte le prove effettuate.

Come già preannunciato sopra, si sono scelti quattro provini, tra i primi ad essere stati realizzati e che presentano il maggior numero di imperfezioni, per le prime prove di trazione, al solo scopo di trovare il *setting* adatto alle prove da svolgere.

I modelli reclutati comprendono: un provino metallico con punte a forma di parallelepipedo, la cui trazione è risultata fallimentare in quanto l'afferraggio superiore della macchina ha rotto, comprimendola, l'estremità del composito; il secondo modello è caratterizzato da punte piramidali con uno strato di composito non propriamente parallelo ad esso; il terzo con punte a tronco di piramide e un composito pressoché dritto ma troppo corto; per ultimo si è preso un provino metallico con punte a spirale, bruciate durante la fase di SLM, avente però doppio strato di composito. Si riporta per completezza una foto scattata ai modelli di prova, in seguito allo scollamento con i loro rispettivi compositi.

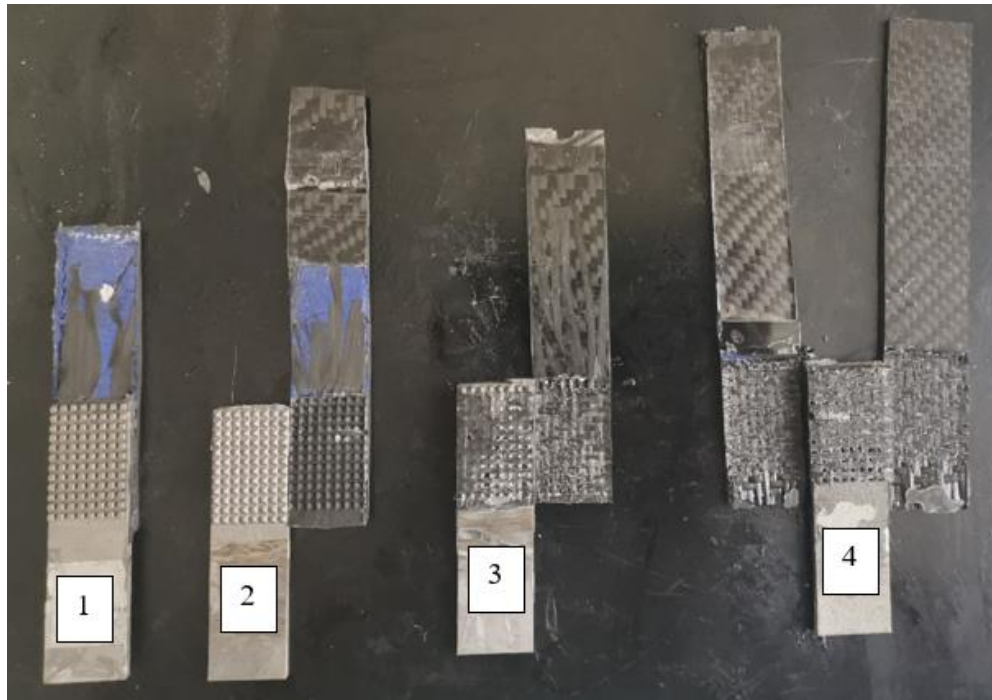


Fig.3.29. Foto dei modelli di prova in seguito alla trazione in macchina

Giunti a rottura del giunto e, quindi, a totale scollamento tra metallo e composito, si sono registrati differenti fenomeni che hanno causato la fine della prova. Escludendo il primo provino in quanto non si è potuto giungere allo scollamento per rottura del composito all'interno dell'afferraggio stesso, si può notare che nel caso delle piramidi, il materiale a contatto con esse non abbia subito alcuna rottura; le fibre, infatti, sono visibilmente intatte suggerendo una scarsa tenuta di esse da parte delle punte. Sotto questo aspetto, invece, risulta più interessante il risultato ottenuto dal modello successivo, con tronchi di piramide, nel quale alcune fibre sono rimaste incastrate tra le punte ed altre risultano spezzate e giacenti sulla rispettiva faccia del composito. Medesimo fenomeno, relativamente alle fibre in carbonio, si può evidenziare anche per il provino doppio.

Per quanto concerne i carichi massimi, si sono inseriti in una tabella, qui di seguito, i valori approssimativi che hanno portato allo scollamento totale del giunto:

Modelli di prova	
Tipologia di punte	Carico massimo [N]
Parallelepipedo	Rottura del composito
Piramide	3000
Tronco di piramide	8000
Spirale con doppio composito	25000

Tab.3.3. Carichi massimi raggiunti dai modelli di prova

I valori di forza massima sopportata dalla giunzione, in generale, risultano accettabili a fronte delle già ben note imperfezioni di tutti i modelli di prova. Per il caso del provino con doppio strato di composito, per una questione di simmetria, ci si aspetta almeno il doppio del carico sopportato dal modello singolo; il raggiungimento di un carico di 25 kN conferma quanto le aspettative, andando addirittura ben oltre.

Si vuole porre maggiore attenzione su tale modello e riportare una foto relativa all'istante successivo allo scollamento totale del giunto, il quale ha determinato la fine della prova.

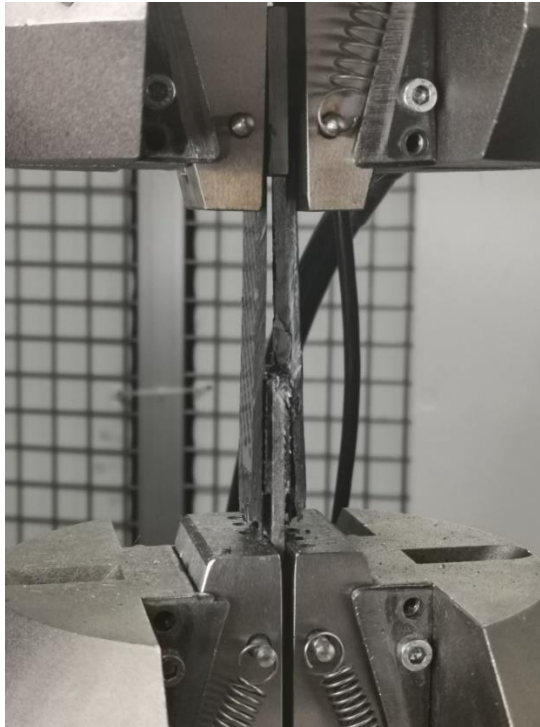


Fig.3.30. Foto dello scollamento del giunto del provino con doppio composito
Dall'immagine si possono osservare le zone di scollamento lungo l'interfaccia punte-composito, a partire dall'ultima fila in basso fino all'estremità superiore del provino. Durante la prova si è potuto notare come le prime zone in cui è venuta meno la tenuta tra i due materiali siano quelle relative alle file di punte in basso del provino.

Per completezza si riporta il grafico contenente l'andamento forza-spostamento del provino doppio, relativo all'intera trazione.

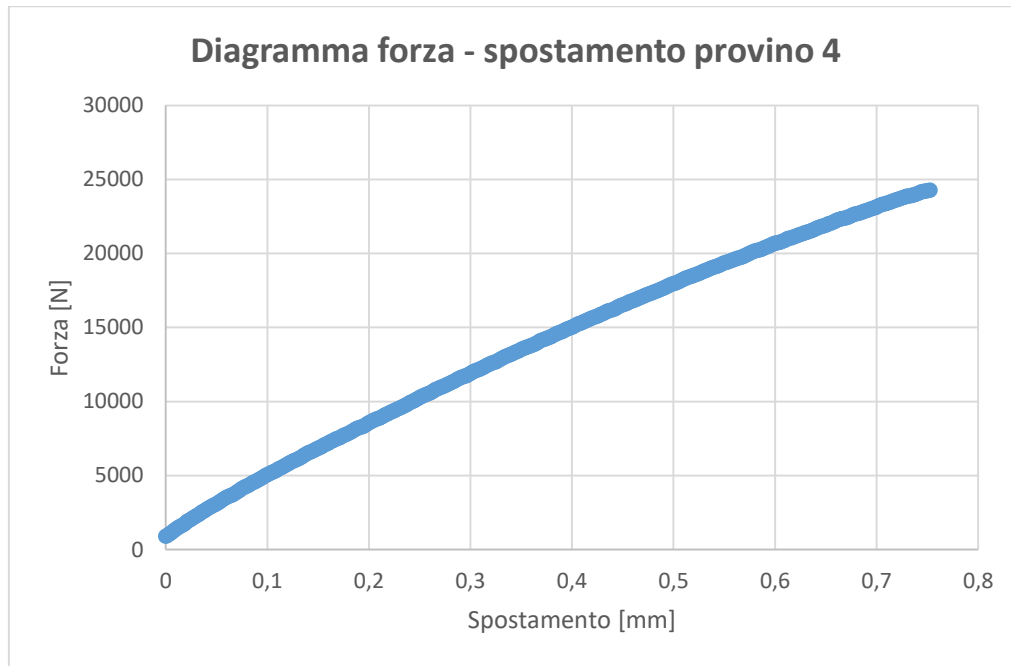


Fig.3.31. Grafico forza-spostamento del modello con doppio composito

Dal grafico, come previsto, si può osservare un tratto lineare tra le due variabili in esame; tra linearità si mantiene fino al carico massimo sopportato dal modello, 25000 N, che lo porterà al totale scollamento dell'interfaccia metallo-composito.

3.3.3 Diagrammi forza-spostamento sperimentali

Come già anticipato in precedenza, l'elaborazione dei dati derivanti dalla trazione in macchina viene eseguita da un software in grado di raccogliere, in una tabella su Excel, tutti i valori di forza e spostamento registrati durante la prova; si ottengono così tanti file Excel quanti sono i provini messi in trazione, ovvero sei per ognuno dei giunti.

A questo punto, per ogni tipologia di punte, si è proceduto con la realizzazione di un grafico che contenesse al suo interno gli andamenti registrati durante le prove dei sei provini, seguiti da relativi commenti.

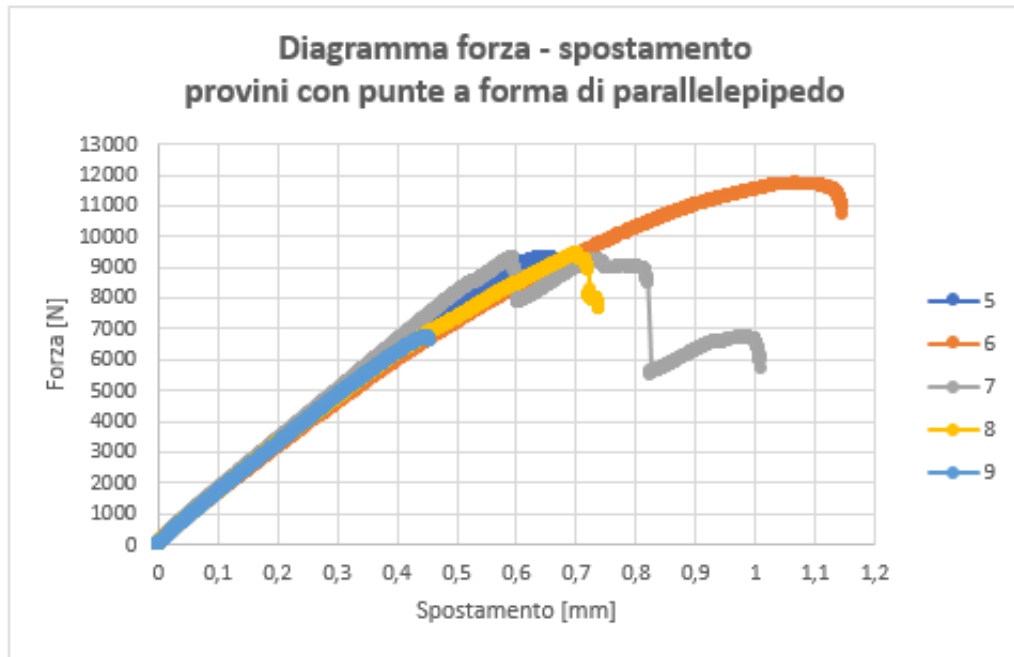


Fig.3.32. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punta a parallelepipedo

Prima di procedere alle considerazioni sugli andamenti relativi a questa tipologia di punta, è giusto ricordare che sono stati analizzati solo 5 provini in quanto il provino 1, ha subito la rottura del solo composito, durante la fase di presa degli afferraggi. Tale provino, quindi, non è stato posto in trazione ma è servito a capire che è necessario l'utilizzo di spaziatori, tra composito e afferraggio della macchina, per annullare l'effetto del momento rispetto alla base del provino metallico.

Per quanto concerne gli andamenti, sono visibili dei punti in cui il grafico crolla, in alcuni provini anche più di una volta durante l'intera prova, probabilmente coincidenti con dei distacchi di punta dal composito, generando durante la trazione dei veri e propri scricchiolii.

Dal grafico, si nota subito come il tratto lineare elastico sia presente in tutti gli andamenti e che sia ben sovrapposto nei diversi provini.

Prove sperimentali

Si osserva, inoltre, che il provino 6 mostra una zona pressoché lineare elastica decisamente più ampia degli altri provini; giunge, dunque, a snervamento per valori di spostamenti e forze superiori.

Entrando nel dettaglio dell'analisi, il motivo per cui il provino 9 raggiunge un carico di rottura così basso, rispetto a tutti gli altri, è molto probabilmente legato al fatto che le sue punte risultano le meno penetrate nel composito, in confronto agli altri provini. In aggiunta a ciò, si è visto che, nella parte inferiore delle punte, sull'ultima fila, il composito non ricopre tali punte e la medesima imperfezione è presente nella prima fila in alto. Dalle riprese video delle prove, si nota che il composito, in prossimità del carico di rottura, tende a staccarsi prima dalle punte presenti nelle file inferiori; di conseguenza, il distacco è avvenuto per carichi inferiori. Di seguito, vengono inserite due foto del provino 9, per evidenziare l'imperfezione:

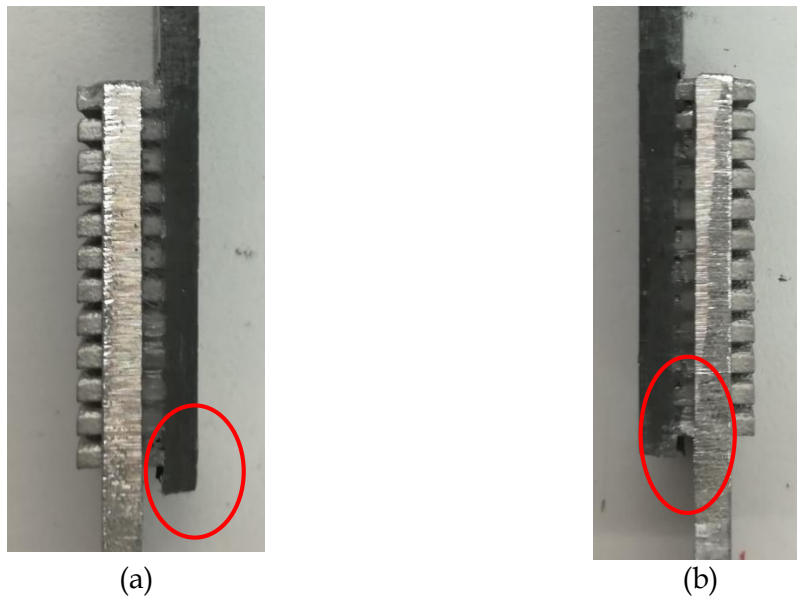


Fig. 3.33. Foto del lato destro (a) e di quello sinistro (b) del provino 9 con punta a parallelepipedo

I provini 5,7 e 8 mostrano un carico di rottura alquanto simile, sui 9000 N; infatti tutti e tre hanno delle punte parzialmente penetrate nel composito.

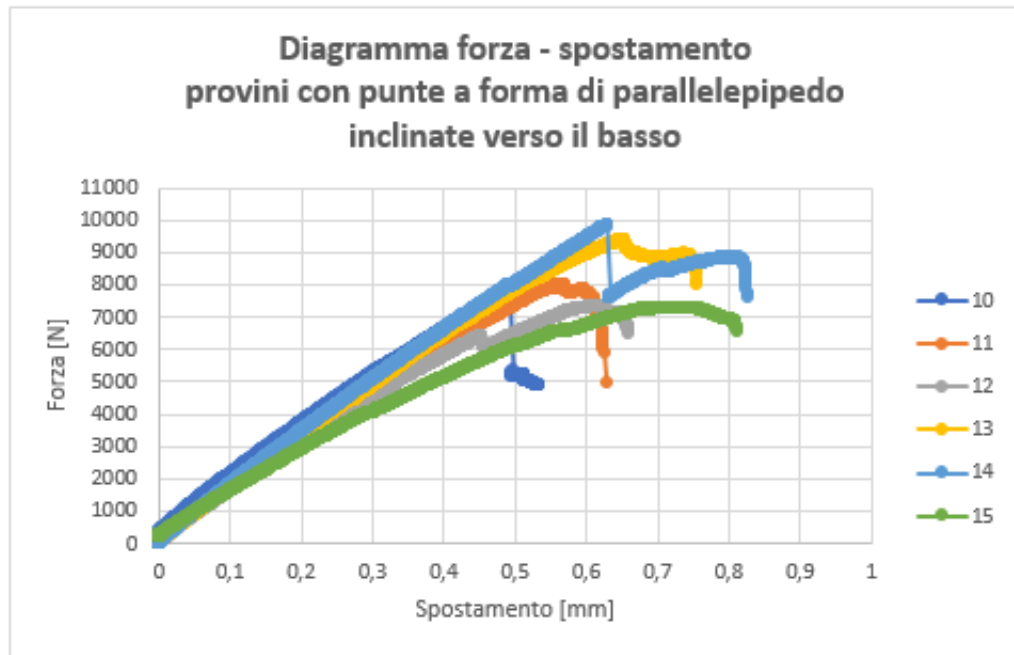


Fig.3.34. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a parallelepipedo inclinate verso il basso

Dal grafico, notiamo che il tratto lineare elastico è abbastanza sovrapposto nei differenti provini. Presentano tutti delle zone di snervamento differenti, successive al tratto lineare.

Nel dettaglio, si è visto come il provino 15 abbia il carico di rottura più basso e ciò è probabilmente dovuto al fatto che le sue punte sono quasi del tutto non penetrate nel composito.

Per quanto riguarda, invece, l'andamento migliore, questo è dato dal provino 14; esso raggiunge il carico di rottura più alto, forse, perché presenta, erroneamente, uno strato di resina sulle punte sulla prima fila di punte della controparte; ciò potrebbe aver contribuito a rinforzare la rigidità del giunto stesso.

Infine, il provino 13 mostra anche esso un alto carico di rottura perché presenta le file inferiori ben penetrate nel composito.

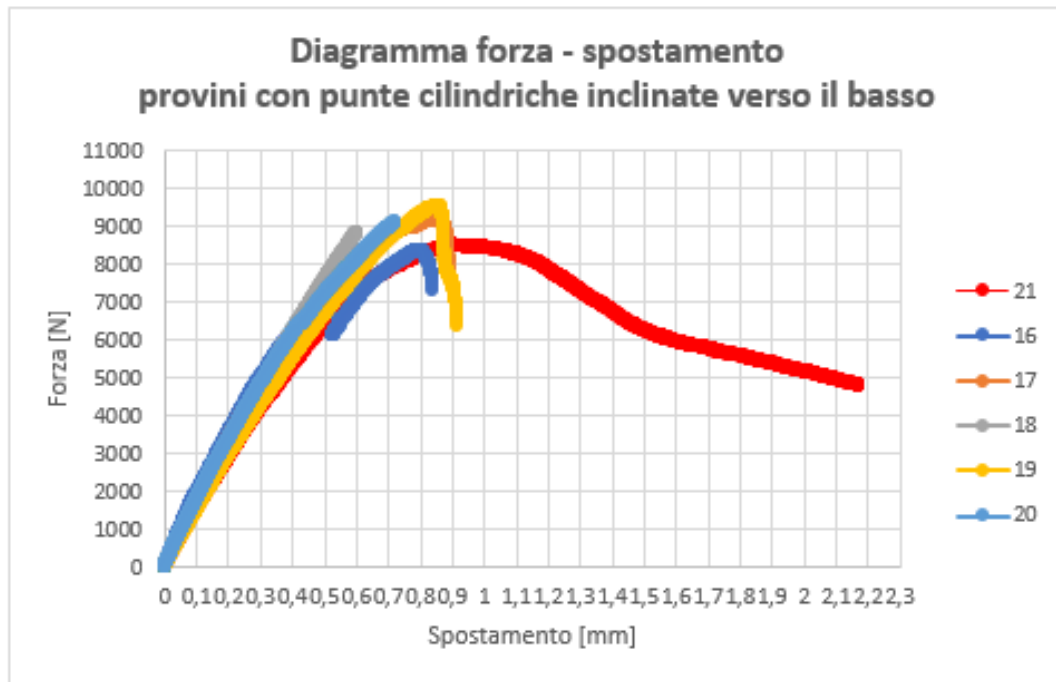


Fig.3.35. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a cilindro inclinate verso il basso

Prima di procedere all'analisi degli andamenti ottenuti, è giusto precisare che il provino 21 non è giunto a rottura perché, una volta messo in trazione, gli afferraggi sono scivolati sul composito, non riuscendo, così, a portarlo a rottura. Si decide di prenderlo comunque in considerazione poiché lo scivolamento è avvenuto in seguito alla zona elastica e, quindi, solo essa verrà conteggiata per l'analisi dei dati sperimentali. Si aggiunge, qui di seguito, uno zoom relativo al solo tratto elastico lineare del diagramma:

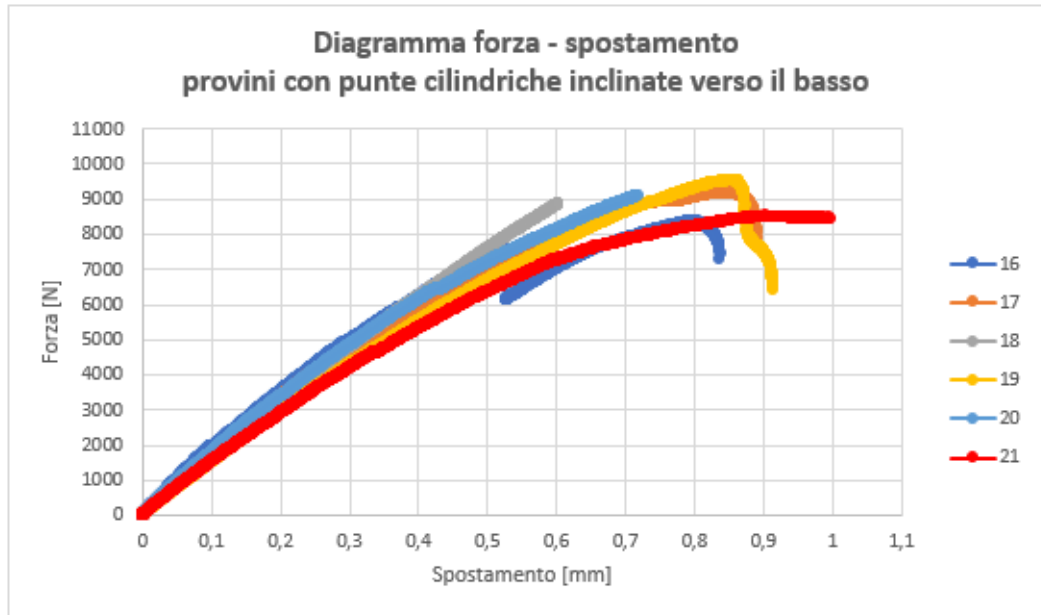


Fig.3.36. Zoom sul tratto lineare del diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punta a cilindro inclinate verso il basso

Dal grafico, si nota come il tratto lineare sia abbastanza sovrapponibile nei vari provini; per quanto, invece, concerne la zona di snervamento, i provini presentano andamenti differenti tra di loro.

Volendo analizzare nel dettaglio ogni singolo provino, si è visto che la differenza tra il carico di rottura minimo e quello massimo registrato è pari a circa 1000 N; ciò è dovuto probabilmente al fatto che, in questo caso specifico di tipologia di punta, i provini presentano tutti una penetrazione parziale all'interno del composito.

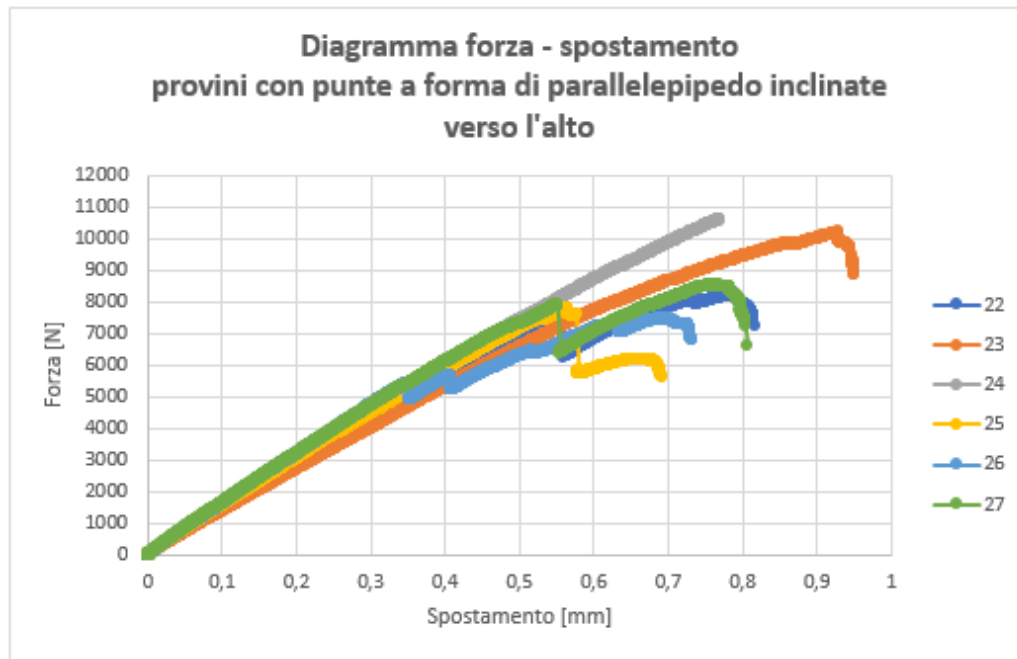


Fig.3.37. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punta a parallelepipedo inclinate verso l'alto

Dal grafico, si nota che il tratto lineare elastico è molto sovrapponibile tra i vari provini. Tra tutti spicca l'andamento registrato dal provino 23, in cui la zona lineare risulta decisamente più ampia; esso raggiunge valori di spostamento più elevati rispetto agli altri. I picchi di forza, invece, sono raggiunti dal provino 24.

Entrando nello specifico, il provino 23, avente carico di rottura più alto, in realtà, non presenta caratteristiche come penetrazione delle punte o planarità del composito che lo fanno spiccare rispetto agli altri provini; è probabile che le buone prestazioni meccaniche del suo giunto siano legate ad aspetti che si verificano a livello microscopico o in zone non raggiungibili a occhio nudo.

L'andamento peggiore tipico del provino 26 è legato, probabilmente, a delle imperfezioni come un composito storto e non parallelo al provino e una bassa penetrazione delle punte, che giustificano il suo basso carico di rottura.

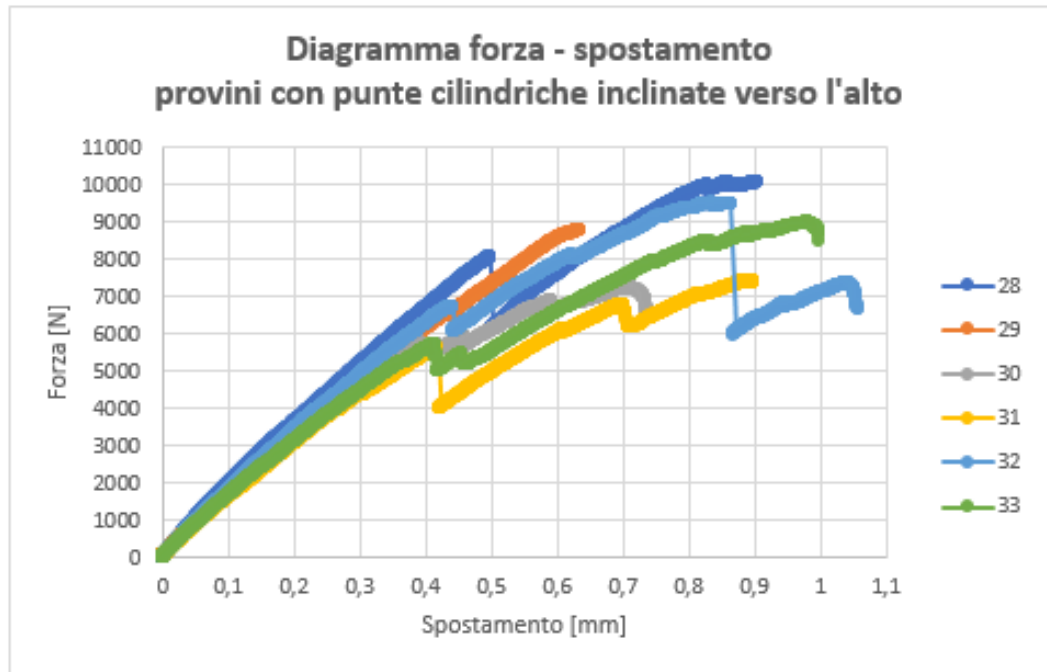


Fig.3.38. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a cilindro inclinate verso l'alto

Dal grafico è possibile notare che gli andamenti sono piuttosto simili tra di loro; nessun provino ha mostrato un comportamento che si distacchi molto dagli altri e quindi non è stato necessario escluderne alcuno. Presentano tutti un primo tratto lineare che lega forza e spostamento; segue poi una zona di snervamento e di deformazione plastica, nella quale si registrano valori di carico che aumentano e diminuiscono continuamente. La causa di ciò risiede nel possibile distacco, nell'interfaccia del giunto, di alcune punte dal composito che fanno crollare il modulo della forza anche ad alti valori di spostamento.

In particolare, si è visto che il provino 28 ha la migliore planarità del composito accompagnata da un'ottima penetrazione delle sue punte; motivi questi, probabili, per cui il suo andamento risulta il migliore tra tutti.

La planarità del composito rispetto al provino metallico influisce molto, soprattutto nei provini 30 e 31 dove si evidenzia un composito parecchio storto, che fa calare le prestazioni meccaniche, come si può notare nel grafico stesso.

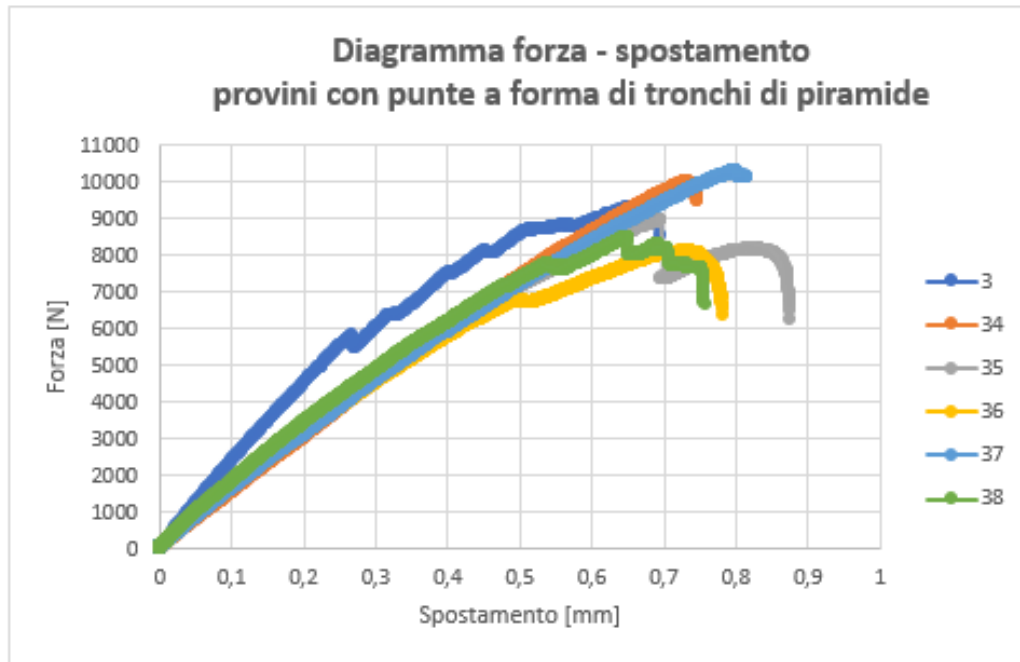


Fig.3.39. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a tronco di piramide

Dal grafico, si può subito notare la spiccata differenza nell'andamento del provino 3 rispetto a quello degli altri. La motivazione risiede nel fatto che, per tale prova, sono stati utilizzati degli spaziatori di materiale e spessore differenti rispetto a quelli, successivamente, adottati per tutti gli altri provini; il provino 3, infatti, fa parte di quei quattro provini utilizzati nella prima fase di prova. A causa della sua diversità, questa prova non verrà, pertanto, usato nell'analisi complessiva.

I restanti provini, invece, presentano un tratto lineare elastico molto simile, che si sovrappone molto bene; tutti registrano una piccola zona di snervamento che si colloca per valori di carichi e spostamenti differenti.

Anche in questa tipologia di punte, sebbene ci siano carichi di rottura differenti per ogni provino, non ci sono visivamente delle imperfezioni così marcate da far pensare a un provino che possa spiccare rispetto agli altri; infatti, dal grafico, gli andamenti sono parecchio sovrapponibili nel tratto lineare elastico, nella zona di snervamento un po' meno.

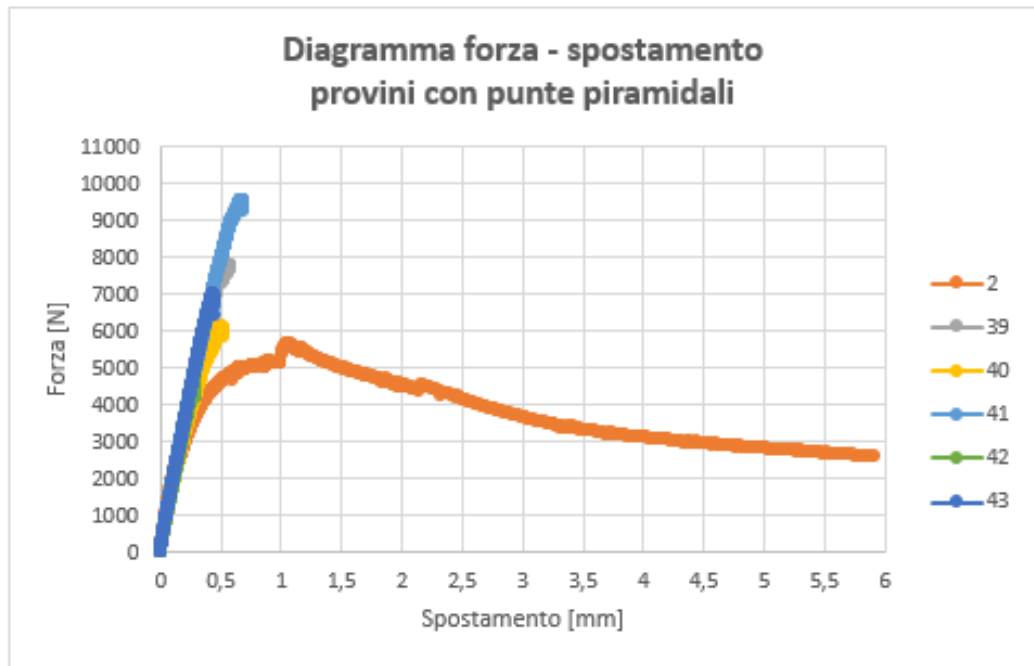


Fig.3.40. Diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a piramide

Dal grafico, si nota una spiccata similitudine nella zona elastica; solo un provino, il numero 2, presenta un andamento differente nella zona successiva a quella lineare elastica, evidenziando le zone di snervamento, deformazione plastica fino a rottura. Nei restanti provini, invece, si registrano valori negativi di carico successivi ad una brevissima zona di snervamento, che segue a quella lineare. Per visualizzare meglio gli andamenti dei provini, è stato realizzato un secondo grafico in cui è stato eseguito uno zoom relativo alla sola zona lineare elastica.

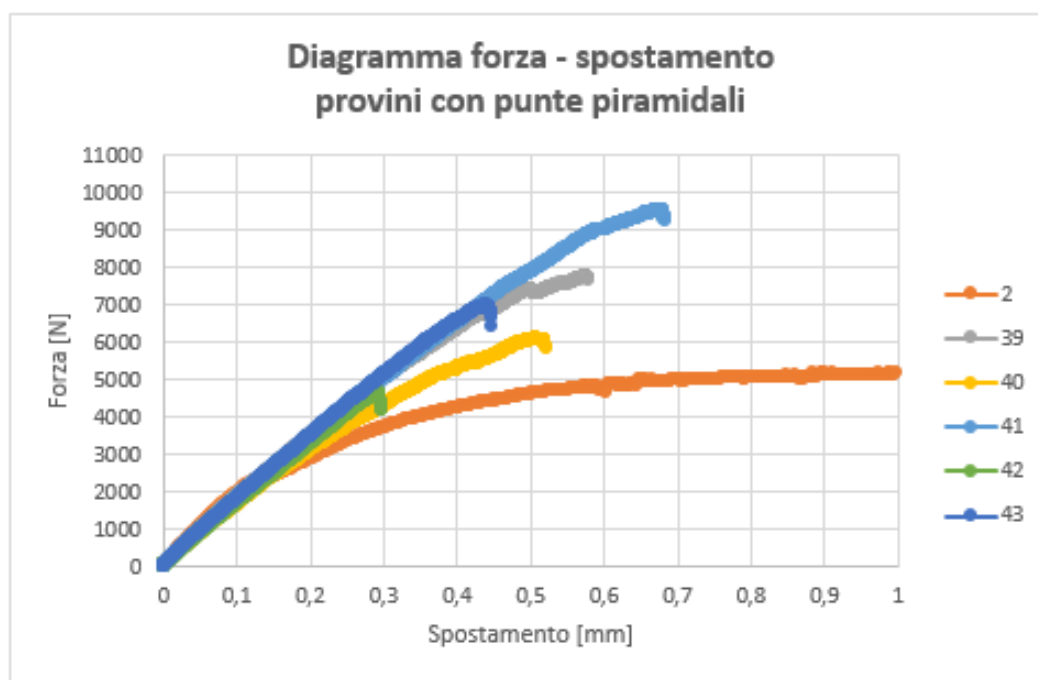


Fig.3.41. Zoom sul tratto lineare del diagramma forza-spostamento sperimentale del provino con punte a piramide

Facendo particolare attenzione al modulo del carico di rottura massimo raggiunto da ogni provino, si nota che, in media, tale valore si aggira intorno ai 6000 o 7000 N; è probabile che un valore così basso, rispetto a quelli raggiunti dalle altre tipologie di punte, sia legato al fatto che, durante la realizzazione del composito, si siano inserite a mano solo le fibre in direzione perpendicolare a quella del carico; la motivazione di tale scelta è legata all'enorme difficoltà di posizionamento delle fibre in entrambe le direzioni causata dalla mancanza di vuoti tra le punte stesse. Terminata l'analisi di tutti i provini, basata sia sui risultati ottenuti dal software durante le prove di trazione, sia sulle peculiarità fisiche di ogni provino, è stato possibile evidenziare delle variabili che influenzano le prestazioni meccaniche finali del giunto:

- Planarità del composito rispetto al provino metallico: alcuni compositi risultavano storti e hanno portato a valori di carichi di rottura più bassi;

Prove sperimentali

- Livello di penetrazione delle punte sul composito: carichi maggiori si sono riscontrati in punte che fossero almeno penetrate parzialmente;
- Possibili distacchi tra composito e punte precedenti la trazione: si sono notati soprattutto in prossimità delle file inferiori dei provini;
- Imperfezioni o imprevisti durante la creazione del composito e la sua successiva trazione;
- Come si vede dai grafici le simulazioni numeriche non approssimano in maniera accurata ciò che accade nella realtà, si proverà dunque a realizzare un modello meno semplificato.

Al fine di confrontare tra di loro i carichi raggiunti da ogni tipologia di punte, si è realizzato una tabella, contenente i carichi massimi di ogni provino, raggruppati a seconda della forma caratteristica.

Tipologia di punte	Carichi massimi raggiunti dai provini [N]					
Para-alto	8233	10204	10613	7826	7492	8540
Para-basso	7668	7999	7366	9379	9838	7303
Cili-alto	10094	8801	7238	7446	9517	8990
Cili-basso	8373	9198	8861	9543	9103	0
Parallelepipedo	0	9358	11730	9333	9477	6738
Piramide	5667	7775	6107	9567	4652	6998
Tronchi	10008	8954	8126	10303	8489	9352

Tab.3.4. Carichi massimi registrati in macchina di trazione per tutti i provini

Si è pensato, inoltre, di mediare i carichi massimi relativi ad ogni punta così da poter meglio confrontare tra loro le vari tipologie. I dati ottenuti sono mostrati nel seguente istogramma, inserendo anche la varianza relativa:

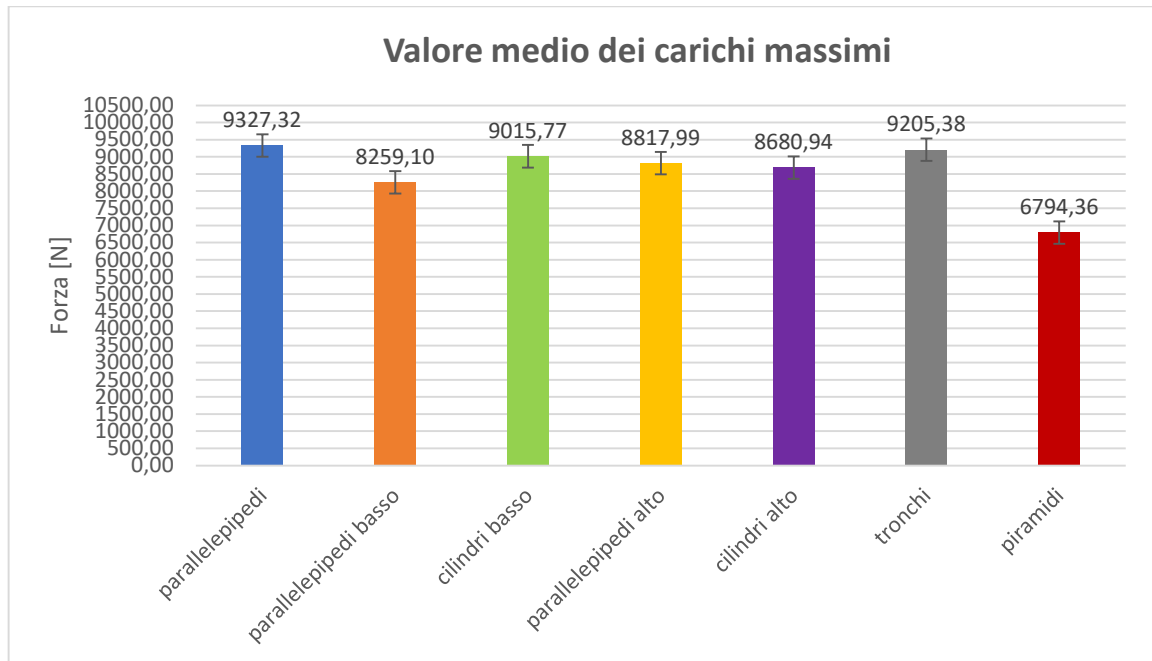


Fig.3.42. Istogramma del valore medio dei carichi massimi dei provini

Dall'istogramma è immediato il confronto dei carichi mediamente registrati sulle varie forme di punte testate: le piramidi, come già descritto in precedenza, si pongono in una posizione più bassa in quanto non presentano le fibre, disposte a mano, in entrambe le direzioni; i valori più alti di carico si ottengono con i parallelepiped, seguiti da cilindri inclinati verso il basso e i tronchi di piramide.

Al fine di eseguire un confronto tra le diverse tipologie di giunzioni, si sono calcolati i moduli elastici utilizzando i diagrammi forza - spostamento ottenuti con le prove di trazione.

Si è proceduto, come per le lastre di composito, applicando il metodo della regressione lineare o dei minimi quadrati, tramite il quale si è ricavata la retta, passante per l'origine, che meglio interpola i dati per ciascuna tipologia di provino.

Per tutte le curve è stato stimato il coefficiente di determinazione, il quale è risultato molto vicino all'unità, con valori non inferiori a 0.98, a conferma della buona riuscita dell'operazione di fitting.

Prove sperimentali

Successivamente si è determinato il coefficiente angolare medio tra le rette interpolanti dei sei provini, al fine di trovarne soltanto una che rappresentasse l'andamento del tratto lineare elastico.

Si riportano, si qui di seguito, i diagrammi forza-spostamento, suddivisi per tipo di giunto, contenenti gli andamenti dei singoli provini, le relative rette interpolanti e quella derivante dalla media dei loro coefficienti angolari.

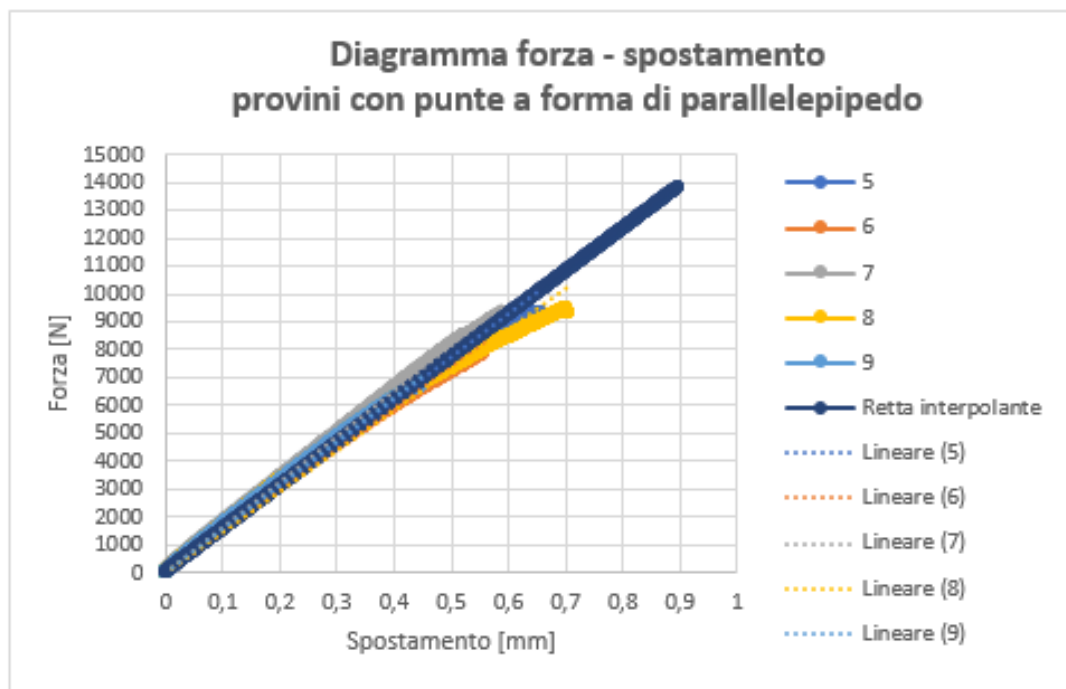


Fig.3.43. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con parallelepipedi

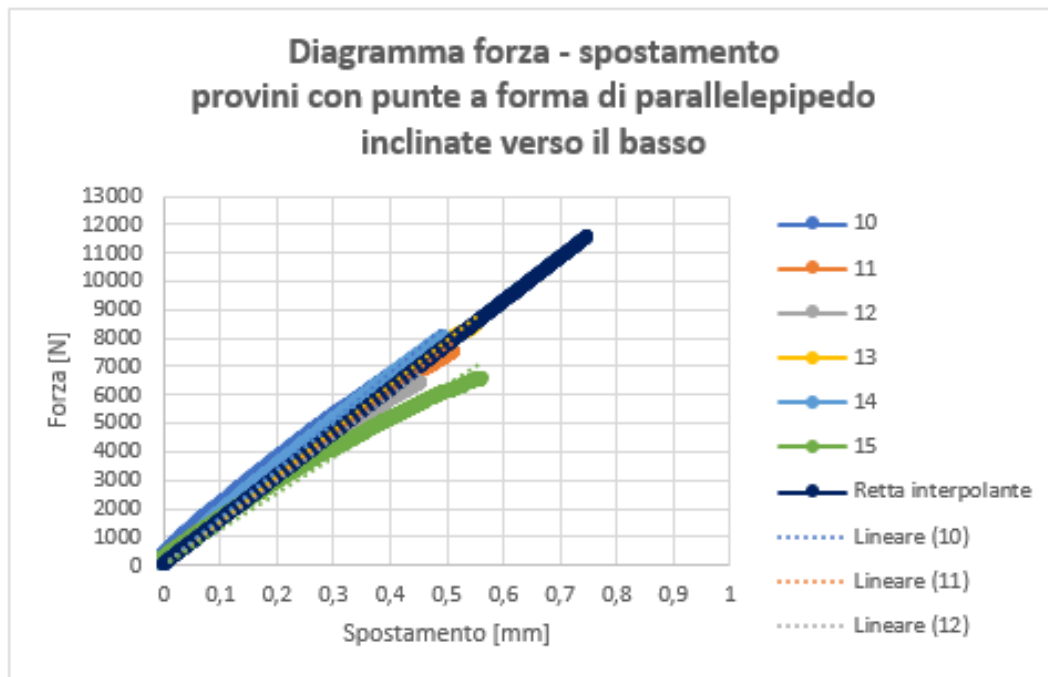


Fig.3.44. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con parallelepipedi inclinati verso il basso

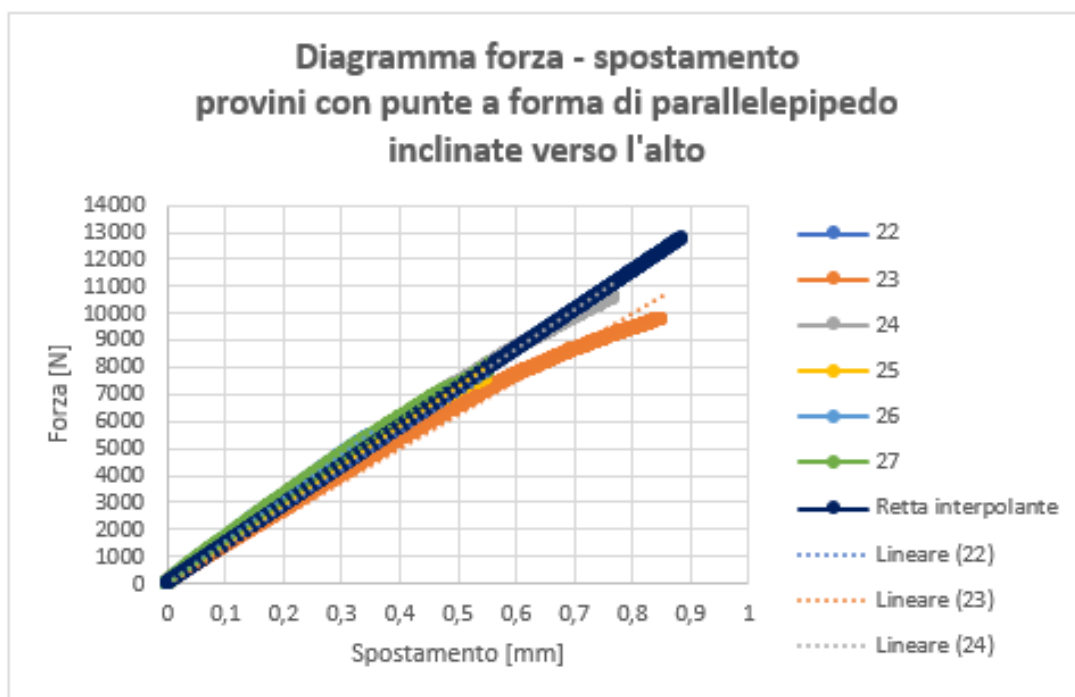


Fig.3.45. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con parallelepipedi inclinati verso l'alto

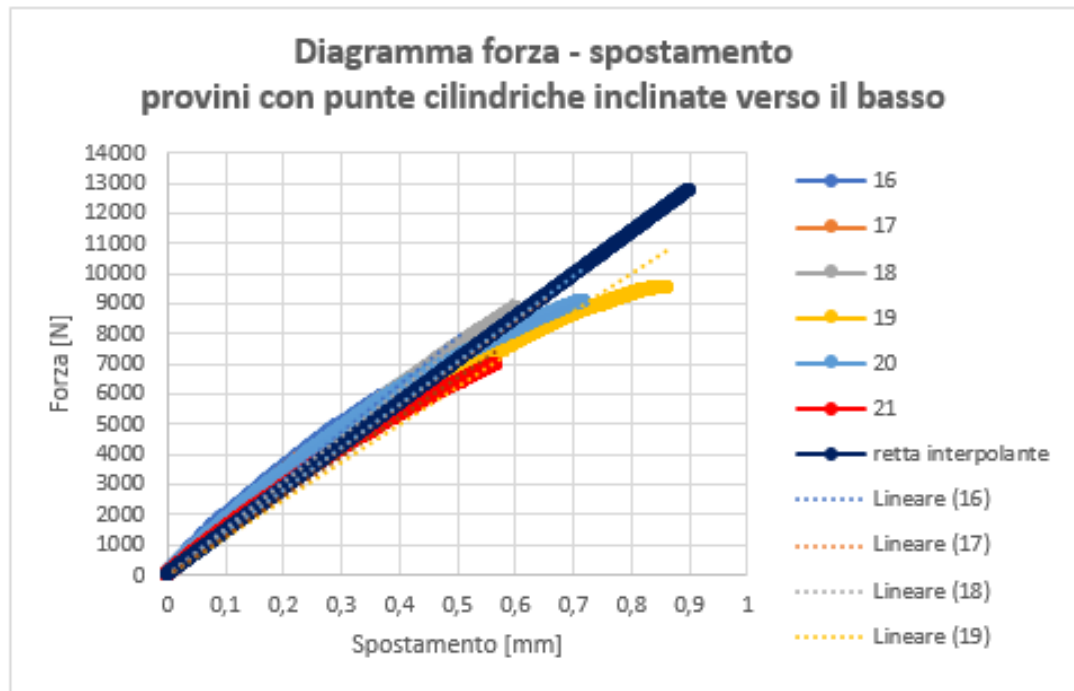


Fig.3.46. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con cilindri inclinati verso il basso

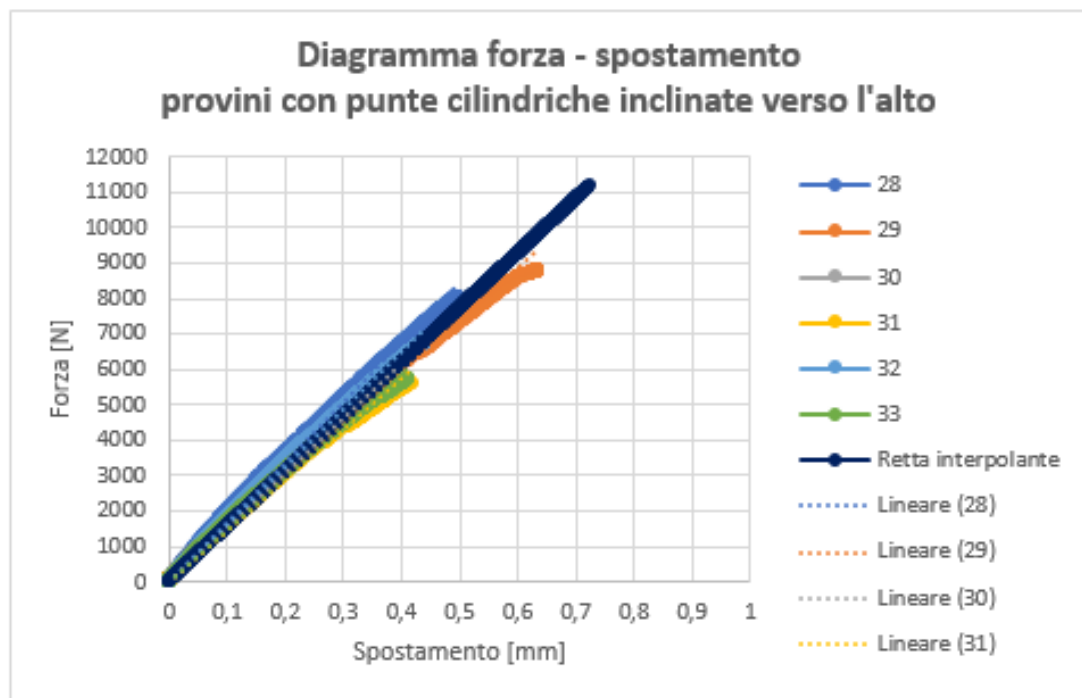


Fig.3.47. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con cilindri inclinati verso l'alto

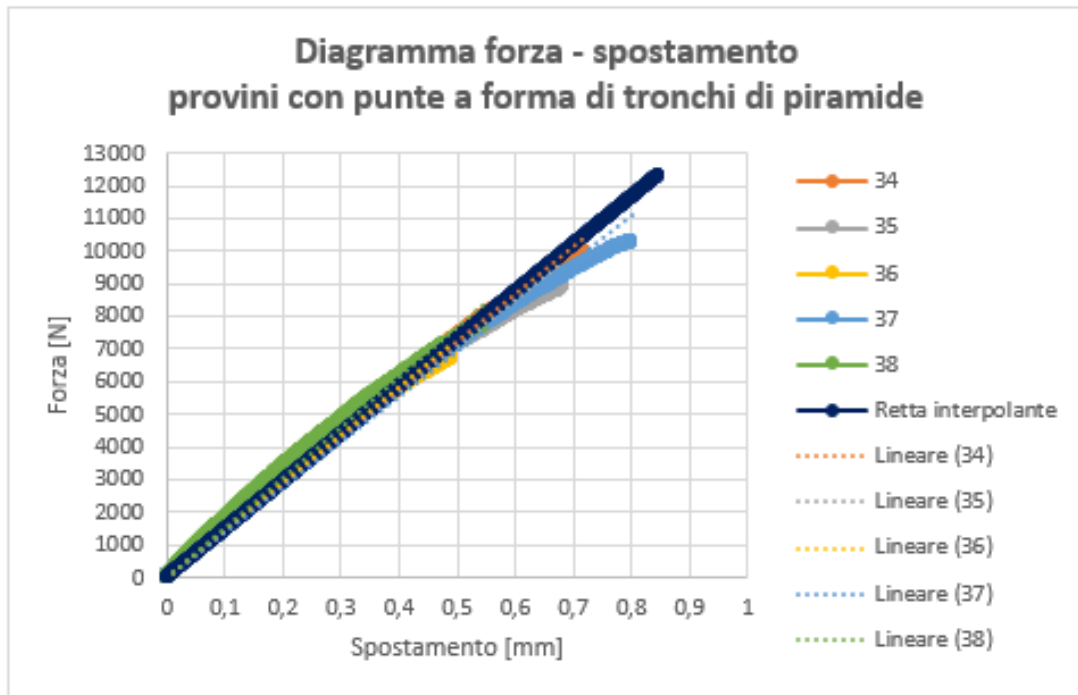


Fig.3.48. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con tronchi di piramide

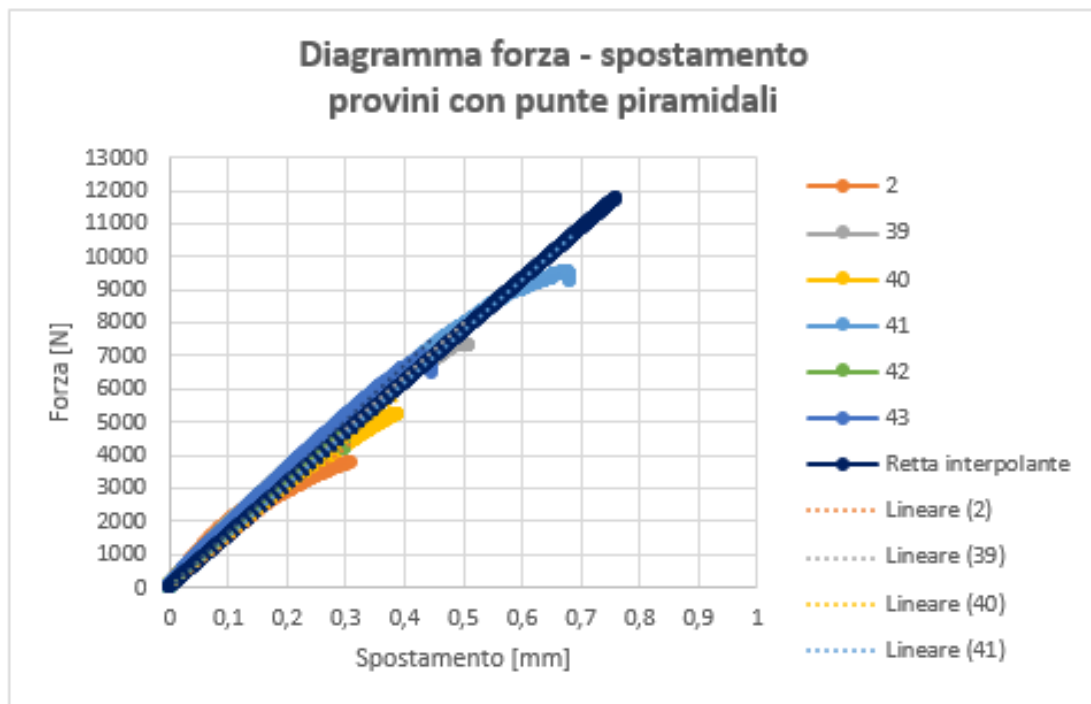


Fig.3.49. Diagramma forza-spostamento con retta interpolante del provino con piramidi

Prove sperimentali

Nel diagramma, sotto riportato, è possibile osservare tutte le rette interpolanti ottenute dalle varie tipologie di giunzione, al semplice scopo di rendere il confronto più immediato.

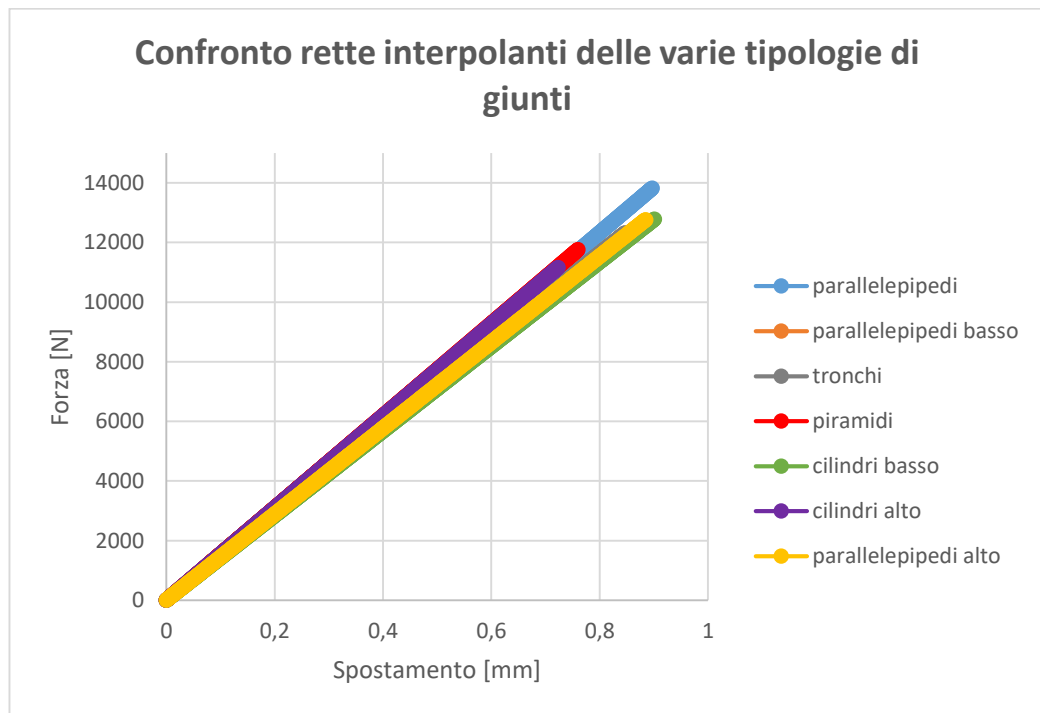


Fig.3.50. Diagramma forza-spostamento di confronto tra varie le rette interpolanti

Da grafico si nota che le rette interpolanti sono molto sovrapposte poichè presentano dei coefficienti angolari tra loro parecchio simili.

Come previsto, la pendenza del tratto lineare elastico non differisce in modo così evidente a seconda della geometria delle punte utilizzate per la costruzione del giunto. Al fine di osservare meglio le differenze tra le rette viene proposto uno zoom del precedente diagramma.

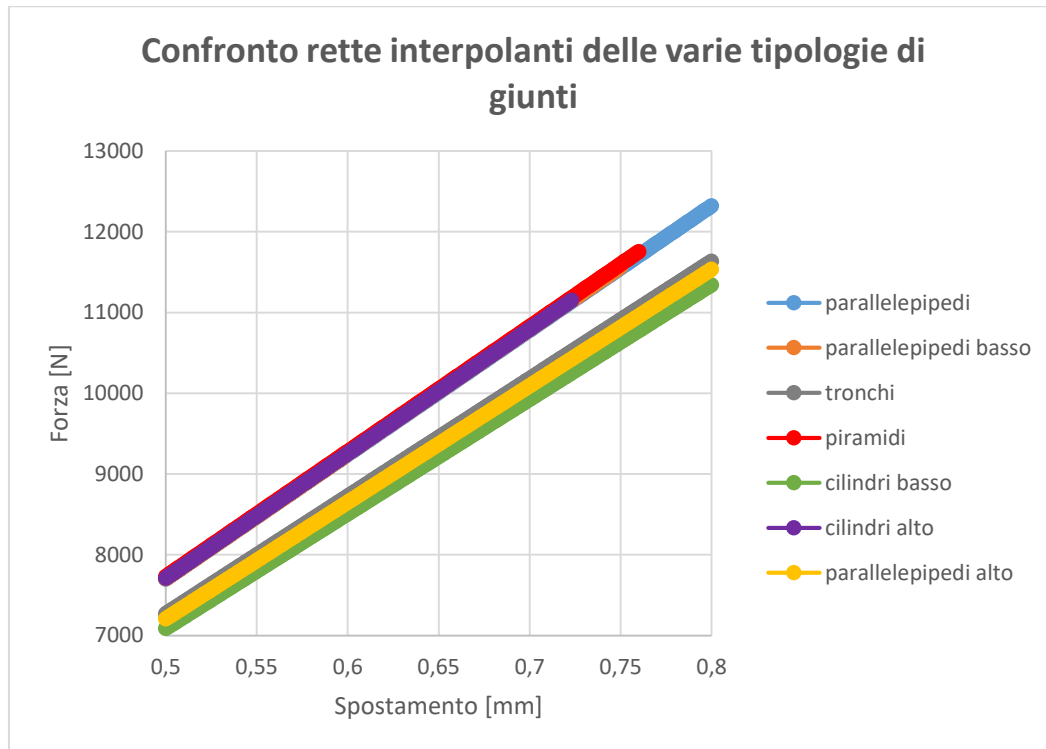


Fig.3.51. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra le varie rette interpolanti

Si può notare una divisione che comprende, da una parte, le punte cilindriche verso il basso, i tronchi di piramide e i parallelepipedo rivolti verso l'alto e, dall'altra, le restanti tipologie. A fronte di una cosiffatta spartizione, non ci si aspettava che: i tronchi di piramide si distanziassero dalle sue geometrie più simili, ovvero piramidi e parallelepipedo, e che si manifestasse una similitudine tra i cilindri verso il basso e i parallelepipedo verso l'alto.

Si può inoltre porre un'ulteriore attenzione sulle punte piramidali, le quali mostrano il coefficiente angolare maggiore e le punte con cilindri rivolti verso il basso che, al contrario, risultano quelli con l'inclinazione più bassa.

Una volta ottenuta l'equazione delle suddette rette è possibile, scegliendo un punto qualunque appartenente ad esse, calcolare i valori di tensione e deformazione. In particolare, si calcola il rapporto tra la coordinata y del punto scelto, che è un valore di forza, e l'area su cui è distribuito il carico, ovvero 60 mm²,

Prove sperimentali

e si calcola il rapporto tra la coordinata x del punto scelto, che è un valore di spostamento, e la lunghezza iniziale della lastra di composito ovvero 110 mm. Si ottengono così i valori di tensione e deformazione. Dal rapporto tra queste due grandezze si ricava il modulo di Young indicativo della rigidità della giunzione. È stato realizzato un istogramma rappresentante le rigidità dei vari giunti, così da poter eseguire un confronto.

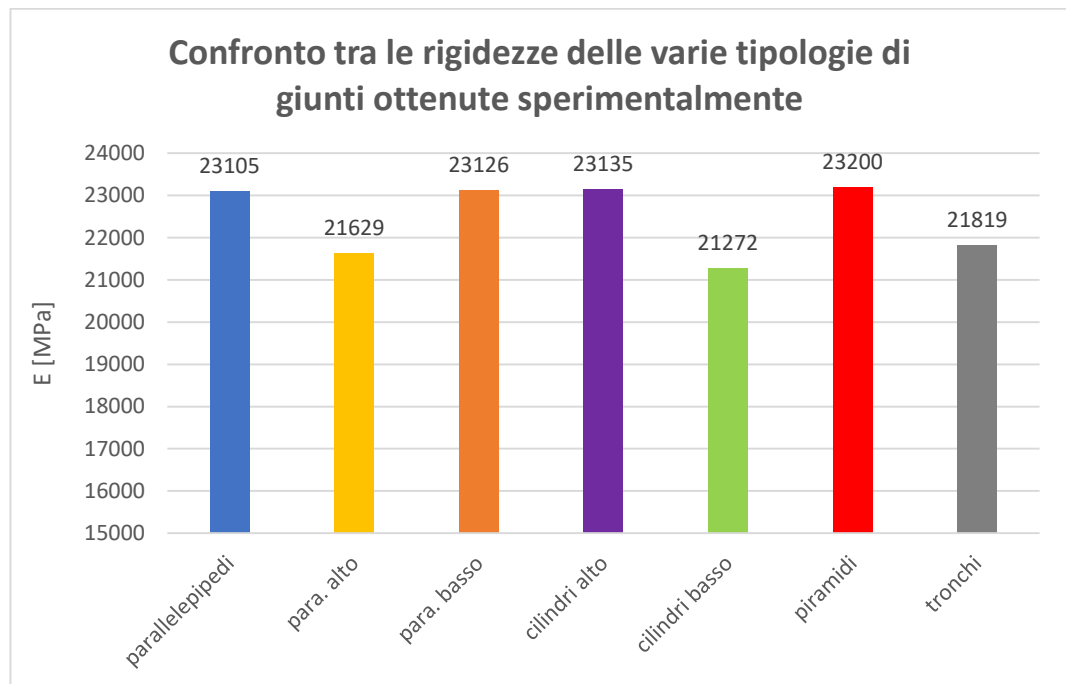


Fig.3.52. Istogramma di confronto delle rigidità dei vari giunti

A primo impatto, si può notare come le rigidità siano pressoché tutte simili fra di loro, come ordine di grandezza; le punte piramidali mostrano la più alta rigidità del giunto. Ciò è inaspettato in quanto le piramidi sono le uniche ad avere le fibre disposte a mano solo lungo la direzione perpendicolare al carico; una così elevata rigidità del giunto è, probabilmente, da ricondurre alla migliore penetrazione di punte sul composito che si è riscontrata tra tutti i provini. Si suppone, dunque, che tra le punte fossero presenti, non solo le fibre disposte

manualmente, ma anche quelle derivanti dagli strati di tessuto, costituenti il composito sovrastante.

3.3.4 Considerazioni finali sulle prove sperimentali

È importante sottolineare che, dall'osservazione dei grafici, si possono effettuare solamente delle supposizioni, in quanto non si ha la certezza che i valori di rigidezza, riportati ad esempio in Fig. 3.52, siano davvero rappresentativi del giunto in questione. Volendo, comunque, osservare più da vicino i valori ricavati dalle prove, è stato realizzato un istogramma che riassume i carichi massimi di rottura di tutti i provini con accanto i valori di rigidezze calcolate.

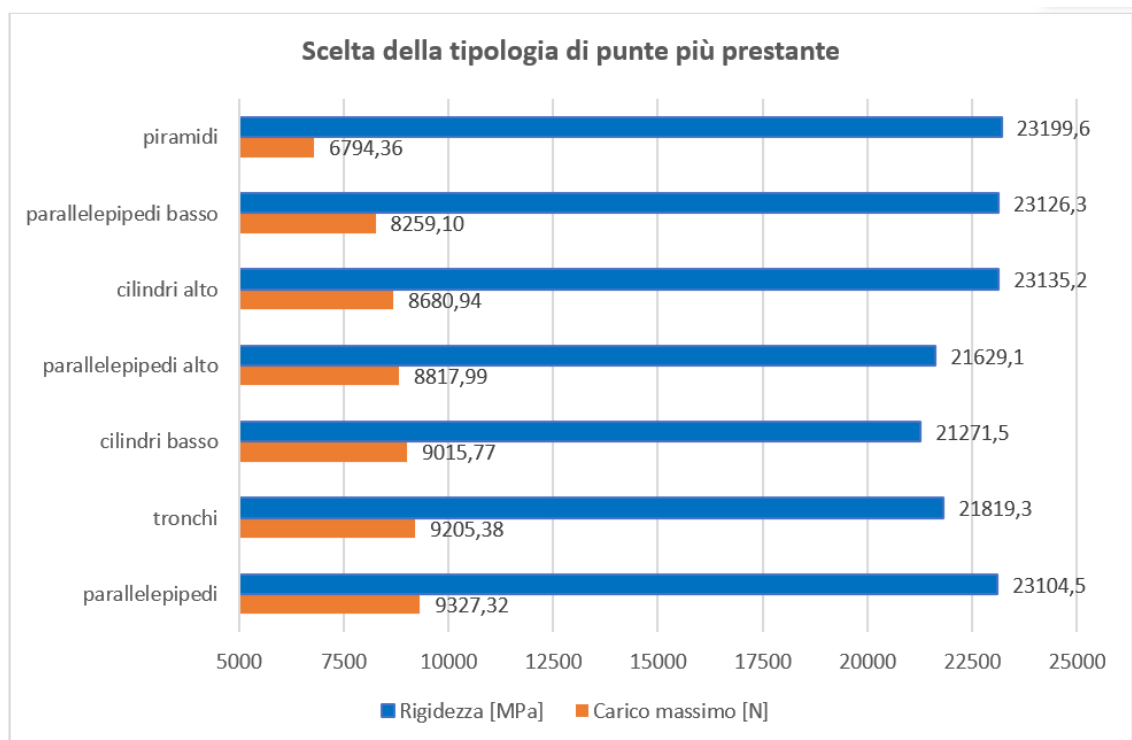


Fig. 3.53. Istogramma di confronto dei carichi massimi e delle rigidezze di tutti i provini

Osservando tale grafico, si potrebbe dedurre che i provini con punte a forma di parallelepipedo siano quelli più prestanti in quanto caratterizzati dal carico massimo di rottura più elevato e da una rigidezza che si colloca tra le maggiori.

Prove sperimentali

I dati ottenuti, però, come già preannunciato in precedenza, sono affetti da una serie di fattori, tipici dell'ambito sperimentale, che portano a un certo grado di incertezza; tra questi si può, sicuramente, menzionare la causa più forte fra tutte: la non ripetibilità del processo manuale. Come già descritto nei primi paragrafi di questo capitolo, infatti, sia la realizzazione del composito sul provino metallico e che quella della resina epossidica, costituita da percentuali differenti dei suoi componenti A e B, è stata effettuata tramite lavorazione manuale in laboratorio. Ciò ha portato a dei comportamenti, talvolta, differenti tra provini della medesima categoria di punte, determinando un andamento medio dell'intero modello poco rappresentativo.

La soluzione ad un'imperfezione di questo genere è, sicuramente, l'automatizzazione del processo di produzione del materiale composito e della resina epossidica.

Soffermandoci maggiormente sui valori di rigidezze ottenute, inoltre, si è giunti a pensare che i valori effettivi di rigidezza dei vari giunti sarebbero stati ancora più alti se non si fosse tagliato il composito della stessa larghezza del provino. Come si può vedere nell'immagine qui di seguito, le fibre di carbonio, introdotte a mano tra le varie punte, si estendono per una lunghezza decisamente superiore alla larghezza del provino.

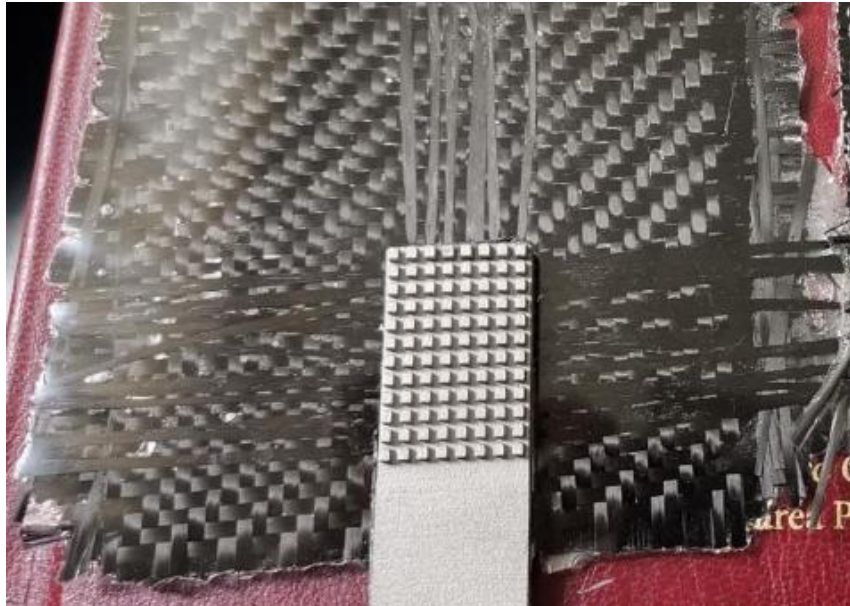


Fig. 3.54. Foto del provino con punte a parallelepipedo con composito non ancora tagliato

Ovviamente quelle che giocano un ruolo più deciso nella tenuta, sono le fibre ortogonali alla direzione del carico longitudinale di trazione; una volta tagliate, queste non possono esercitare la stessa forza di tenuta che avrebbero se sfruttate per tutta la larghezza delle lastre di composito originali. Si deduce, dunque, che probabilmente in caso di applicazione reale di un giunto così fatto, la rigidezza risulterà superiore, per via delle fibre non tagliate, rispetto ai valori riportati in Figura 3.52.

Dopo aver preso coscienza dei limiti di un lavoro sperimentale di questo tipo, si è passati alla verifica dei valori di rigidezza, ricavati da ogni singolo modello, allo scopo di comprendere la loro effettiva validità nel campo meccanico.

In seguito ad una approfondita ricerca bibliografica, si è scelto come strumento di paragone il lavoro svolto da A. Pramanik, Yu Dong, A.K. Basak e Prabir Kumar Sarker, nel loro articolo intitolato “*Joining of carbon fibre reinforces polymer (CFRP) composites and aluminum alloys-A review*”, pubblicato nel giugno del 2017. Esso mostra un confronto diretto tra i carichi massimi a rottura ottenuti da diverse

Prove sperimentali

tipologie di giunto alluminio-materiale composito rinforzato con fibre di carbonio; si evidenziano le prestazioni meccaniche di giunti rivettati, giunti adesivi e, infine, ibridi delle due tipologie precedenti.

Si vogliono, adesso, valutare le prestazioni meccaniche relative alle precedenti prove a trazione tramite un confronto con i risultati trovati in tale articolo; per lo scopo, si è realizzato un istogramma contenente i carichi massimi relativi ai giunti, citati nell'articolo, e il valore medio di tutti i carichi massimi a rottura caratteristici delle diverse tipologie di punte di provino metallico.

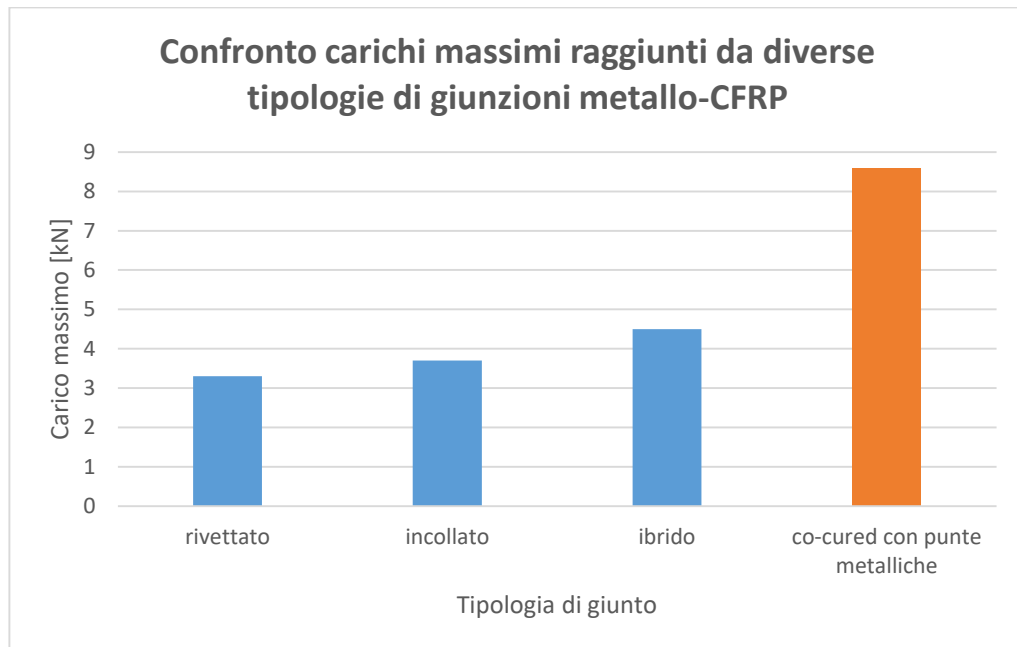


Fig. 3.55. Istogramma di confronto dei carichi massimi di diverse tipologie di giunti metallo-CFRP

Come mostrato in Figura 3.54, il valore medio di carico massimo dei giunti *co-cured* con punte metalliche è nettamente superiore agli altri tipi di giunzione.

Un risultato del genere, per quanto si tratti di progetti differenti, conferma la validità dei giunti *co-cured* con punte metalliche, aprendo loro un ampio campo di applicazioni.

Prove sperimentali

Per concludere, si può aggiungere che un processo automatizzato potrebbe aumentare ulteriormente i valori di carico massimo a rottura, trovati tramite lavorazione a mano.

Capitolo 4

Simulazioni numeriche

Questo capitolo si incentra, inizialmente, sulle simulazioni numeriche effettuate su un nuovo modello a due volumi, realizzato quanto più possibile simile ai provini posti in trazione nel capitolo precedente. Ponendo come riferimento l'andamento delle prove sperimentali, si effettua un'analisi di sensitività su spessore, lunghezza e modulo elastico del composito al fine di ottenere risultati migliori. Trovate le caratteristiche e le dimensioni ottimali del materiale composito ortotropo, si procede con la realizzazione di un secondo modello, avente tre volumi; in questo caso lo scopo è quello di calibrare il volume centrale di giunzione, composto da una percentuale in volume di metallo, data dalle punte, e da un'altra rappresentante il composito. Tramite analisi di sensitività si ricavano le dimensioni ottimali di tale volume di giunzione, le proprietà meccaniche ad esso correlate e si effettua un confronto tra le varie tipologie di punte.

4.1 Modello a due volumi

In quanto, a differenza del pensiero originario, si sono eseguite prove a trazione con un solo volume di composito, è necessario costruire un modello che non presenti più due componenti in CFRP, come invece è stato descritto nel capitolo 2, ma che rispecchi maggiormente la realtà sperimentale. Da qui deriva la necessità di realizzare dei nuovi CAD per le sette diverse giunzioni, come quello mostrato a livello esemplificativo in Figura 4.1, relativo al provino con punte piramidali. Il modello ora adoperato, definito, per semplicità, “modello a due volumi”, è appunto costituito da due differenti componenti: il primo è il provino metallico dotato di punte e il secondo corrisponde al composito. A causa dell'assenza di simmetria e per rendere le simulazioni immediatamente confrontabili con i risultati sperimentali, si è deciso ora di simulare interamente il modello e non più la sua quarta parte. Ciò produce un innalzamento dei tempi computazionali che risultano comunque accettabili.

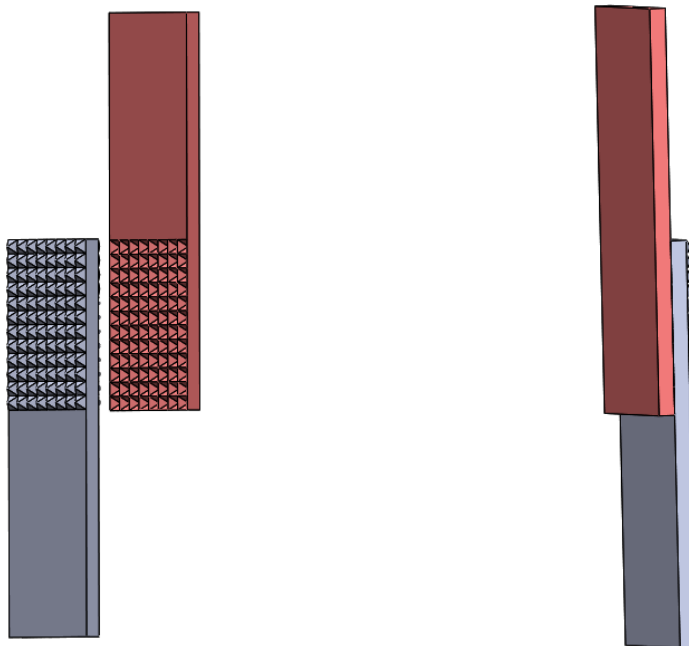


Fig. 4.1. Modello CAD a due volumi dei provini con punte piramidali

Dalle registrazioni video dei test a trazione si è inoltre osservata la presenza di una componente di momento flettente; l'utilizzo di uno spessore di materiale plastico all'interno dell'afferraggio quindi ne diminuisce l'entità ma non lo elimina completamente. È importante dunque tenere in considerazione la presenza del momento flettente nelle simulazioni numeriche per rimanere fedeli a ciò che realmente accade. Si è pertanto modificato il sistema di vincoli, si sono eliminati i carrelli sulle facce laterali del metallo e del composito, precedentemente inseriti per simulare una trazione pura. Ora la struttura risulta incastrata alla base inferiore del provino metallico e caricata con una forza distribuita sulla faccia superiore del composito (Fig. 4.2). Le caratteristiche del mesh sono rimaste inalterate ovvero si sono impiegati elementi solid92 di lato 0.75 mm.

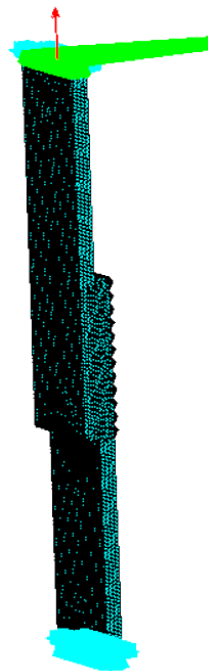


Fig. 4.2. Sistema di carichi e vincoli

Si è apportato un ulteriore miglioramento che riguarda i moduli elastici del materiale composito. Grazie alle prove di trazione dei componenti in composito in fibra di carbonio, si è ricavato il modulo elastico relativo allo specifico materiale realizzato in laboratorio. È risaputo che le proprietà dei compositi dipendono

fortemente da come essi vengono realizzati e dai componenti che li formano, pertanto utilizzare i valori di moduli di Young riportati in letteratura potrebbe portare a risultati affetti da elevati errori. In questo caso il modulo elastico del composito prodotto è risultato essere circa la metà di quello che normalmente si trova in letteratura.

A questo punto si sono eseguite le simulazioni numeriche per valutare se il modello ideato potesse produrre risultati simili a quelli sperimentali. Inizialmente si è considerato il metallo e il composito come materiali elastici, lineari e isotropi attribuendogli un modulo di Young pari rispettivamente a 180000 MPa e 35000 MPa ed un coefficiente di Poisson pari a 0.3. Si sono confrontati i valori di spostamento, lungo la direzione di applicazione del carico, delle varie tipologie di giunzioni ottenute dalla modellazione FEM con quelli ricavati dalla messa in trazione ad un carico di 250 N come visibile in Tabella 4.1. È stato considerato come valore di spostamento quello dell'intera struttura poiché la macchina a trazione fornisce, come valore di spostamento, la differenza di posizione tra i due afferraggi e perché sia il metallo sia il composito subiscono lo spostamento.

Confronto spostamenti con composito isotropo ($E_c=35000$ MPa)		
Tipologia ponte	U_y sperimentale [mm]	U_y simulazioni [mm]
Parallelepipedo	0.016231	0.016188
Piramidi	0.016164	0.016272
Tronchi di piramide	0.017187	0.019278
Parallelepipedo verso l'alto	0.017338	0.017396
Parallelepipedo verso il basso	0.016215	0.017432
Cilindri verso l'alto	0.016209	0.016856
Cilindri verso il basso	0.017629	0.017298

Tab. 4.1. Confronto spostamenti lungo Y delle prove sperimentali con le simulazioni numeriche con composito isotropo e $F=250$ N

Dalla tabella è semplice verificare che i valori di spostamento risultino simili e pertanto il modello realizzato è una valida base da cui partire per ricavarne uno utilizzabile al posto delle prove distruttive.

Si vuole ora tenere anche in considerazione un aspetto che, in precedenza, è stato ignorato: l'anisotropia dei materiali compositi. In questo caso specifico, però, si può assumere che il composito abbia natura ortotropa, ovvero caratterizzato da due moduli di Young E_x ed E_y di uguale valore e un terzo, E_z , con valore differente. Lungo le direzioni X e Y sono infatti presenti le fibre intrecciate in direzioni tra loro perpendicolari per formare il tessuto mentre lungo Z , ovvero in profondità, è prevalente la presenza della matrice in resina. Lungo X e Y , pertanto il modulo elastico verrà assunto pari al modulo elastico ricavato sperimentalmente e lungo Z si imporrà il modulo di Young della resina, ricavato dalle specifiche schede tecniche riportate in appendice. Quando si trattano materiali ortotropi è necessario conoscere anche i moduli a taglio G . I moduli a taglio si devono ricavare sperimentalmente con apposite prove che in questo caso non è stato possibile eseguire. Poiché, come già precedentemente affermato, le proprietà dei materiali compositi sono fortemente influenzati da come essi vengono prodotti, non sarebbe opportuno utilizzare i moduli G presenti in letteratura. Si è pertanto preferito ricavare i valori dei moduli a taglio a partire dai valori di modulo elastico e di coefficiente di Poisson con la formula che si applica in caso di materiali lineari elastici isotropi, riportata di seguito.

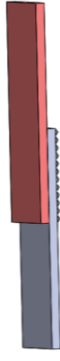
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Da cui si ricava:

$$G_{xy} = \frac{E_x}{2(1 + \nu)} = \frac{35000}{2(1 + 0.3)} = 13461 \text{ MPa}$$

$$G_{xz} = G_{yz} = \frac{E_z}{2(1 + \nu)} = \frac{3000}{2(1 + 0.3)} = 1154 \text{ MPa}$$

Per riassumere, le dimensioni e le proprietà dei materiali utilizzati vengono inseriti nella tabella 4.2.

Componente	Materiale	E [MPa]	G [MPa]	ν	Dimensioni [mm]	
Grigio	Inconel625 non trattato termicamente	180000	-	0.3	70x20x3	
Marrone	Composito di fibra di carbonio con matrice di resina epossidica	$E_x=E_y=35000$ $E_z=3000$	$G_{xy}=13461$ $G_{xz}=G_{yz}=1154$	0.3	70x20x3	

Tab. 4.2. Proprietà meccaniche del modello a due volumi con composito ortotropo

Importando su ANSYS questo modello in formato IGES, impostando le proprietà dei materiali descritti in tabella ed imponendo il sistema di carichi e vincoli stabilito, si è ottenuto il diagramma forza-spostamento per il provino con punta a forma di parallelepipedo da confrontare con la curva sperimentale e con quella relativa al modello con composito isotropo (Fig. 4.3). Poiché nel tratto lineare elastico esiste una relazione di diretta proporzionalità tra forza e spostamento, le rette dei diagrammi sono state ricavate moltiplicando N volte il valore di forza e il corrispondente valore di spostamento.

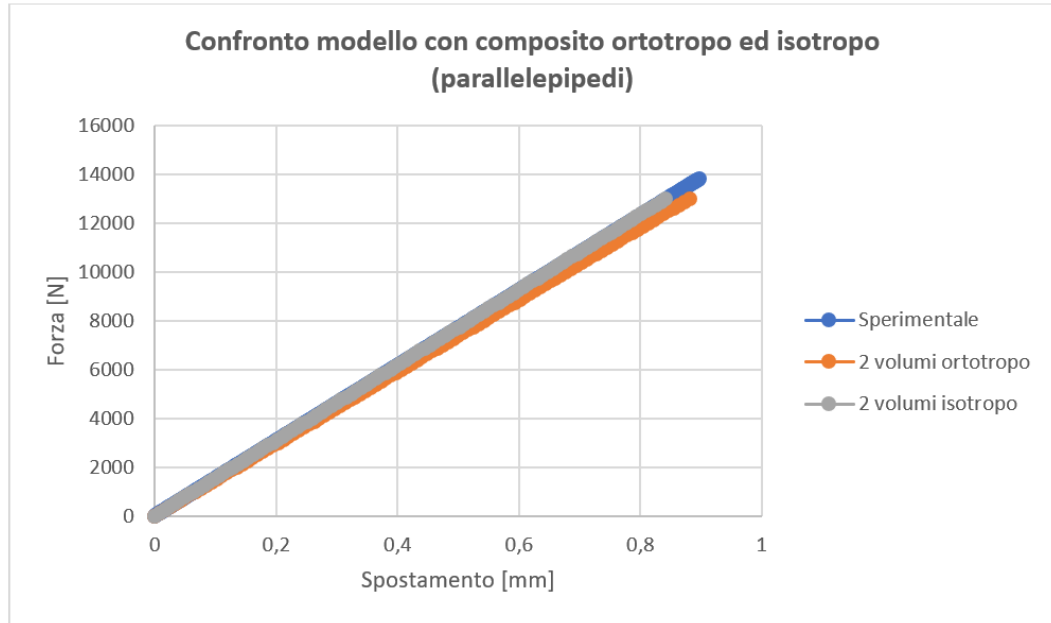


Fig. 4.3. Confronto diagrammi forza-spostamento con composito ortotropo

Come previsto la modifica delle proprietà del composito non altera eccessivamente i risultati a causa della modalità con cui è stata eseguita la prova. Nella simulazione viene analizzata una sollecitazione uniassiale che è principalmente influenzata dalle caratteristiche del materiale lungo X e Y e meno da quelle lungo Z. È importante però realizzare un modello con composito ortotropo perché in tutti i casi applicativi la giunzione sarà sollecitata anche lungo la profondità e perché i materiali compositi non sono isotropi. Si cercherà quindi di calibrare un modello con composito ortotropo.

4.1.1 Analisi di sensitività del modello a due volumi

Dalle precedenti simulazioni si è osservato che i risultati delle simulazioni FEM sono fortemente influenzate dal valore di modulo elastico lungo le direzioni X e Y. Tale valore è stato ricavato da prove a trazione su lastre di composito realizzate manualmente e dunque affette di diverse imprecisioni. In particolare, per il calcolo del modulo elastico è importante conoscere la lunghezza iniziale del provino e la

sua sezione. A causa della presenza di errori, normalmente presenti nei processi sperimentali, non vi è la certezza sul valore assunto da questi due parametri. Si è deciso quindi di verificare quanto la modifica di tali valori influenzasse i risultati delle simulazioni mediante un'analisi di sensitività. Si è pensato appunto che il discostamento delle curve realizzate a partire dai modelli numerici da quella sperimentale potesse essere dovuto al valore assunto da $E_x=E_y=35000$ MPa. Tale valore è stato infatti ricavato dalle prove sperimentali su lastre di composito con lunghezza di interesse considerata pari a 90 mm (50 mm liberi +20 mm nell'afferraggio superiore, 20 mm in quello inferiore e 40 mm incastrati dall'afferraggio). Non conoscendo realmente fin dove la lastra risulta incastrata si è variata la lunghezza iniziale della lastra di composito che subisce la sollecitazione nel caso di provino con punte a forma di parallelepipedo mantenendo uno spessore del provino pari a 3 mm. La variazione della lunghezza iniziale del provino comporta una variazione del modulo elastico e a taglio attribuito al composito lungo X e Y (tab. 4.3) e dunque una modifica del diagramma forza-spostamento (fig. 4.4). Si è deciso invece di lasciare inalterato il coefficiente di Poisson pari a 0.3.

Lunghezza utile per il calcolo di E [mm]	E [MPa]	G [MPa]
70	27139.94	10438.44
80	31017.08	11929.65
90	34894.21	13461
95	36832.78	14166.45
100	38771.35	14912.06
110	42648.48	16403.26

Tab. 4.3. Variazione dai moduli elastico e a taglio a causa della modifica della lunghezza iniziale della lastra di composito

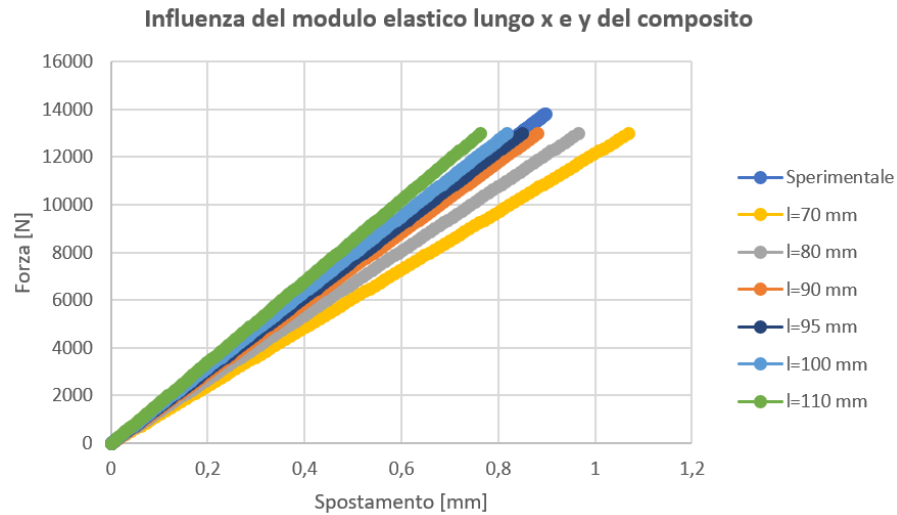


Fig. 4.4. Confronto rette forza-spostamento al variare della lunghezza iniziale della lastra di composito

Si deduce quindi che la variazione della lunghezza iniziale delle lastre di composito è decisamente influente nell'andamento forza-spostamento. Al fine di determinare la lunghezza permette di avvicinarsi maggiormente ai risultati sperimentali si è calcolata la variazione percentuale delle inclinazioni delle curve, al variare della lunghezza iniziale della lastra di composito, rispetto alla retta sperimentale (Tab. 4.4). La scelta di variare la lunghezza tra 70 mm e 110 mm deriva dall'osservazione di come è stato posizionato il provino negli afferraggi.

Lunghezza [mm]	Variazione percentuale dell'inclinazione della retta forza-spostamento rispetto alla curva sperimentale
70	-21,02%
80	-12,50%
90	-4,19%
95	-0,50%
100	+3,31%
110	+10,66%

Tab. 4.4. Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare della lunghezza iniziale della lastra di composito

Si nota (Fig. 4.5) che la variazione di lunghezza, essendo strettamente legata al valore di modulo di Young che si ricava, può influenzare parecchio i risultati e la lunghezza di 95 mm è quella che mostra un'ottima somiglianza con i risultati

sperimentali. Il modulo elastico è però influenzato anche dallo spessore del provino che ne modifica la sezione. Poiché un processo manuale non permette di ottenere provini tutti dello stesso spessore si è analizzata l'influenza della variazione dello spessore sul modulo elastico del composito lungo X e Y mantenendo una lunghezza di 90 mm (Tab 4.5) e una larghezza di 20 mm.

Area utile per il calcolo di E [mm ²]	E [MPa]	G [MPa]
20*2.8=56	37386.66	14379.48
20*2.9=58	36097.46	13883.64
20*3=60	34894.21	13461
20*3.1=62	33768.59	12987.92
20*3.2=64	32713.32	12582.05

Tab. 4.5. Variazione dei moduli elastico e a taglio a causa della modifica della sezione della lastra di composito

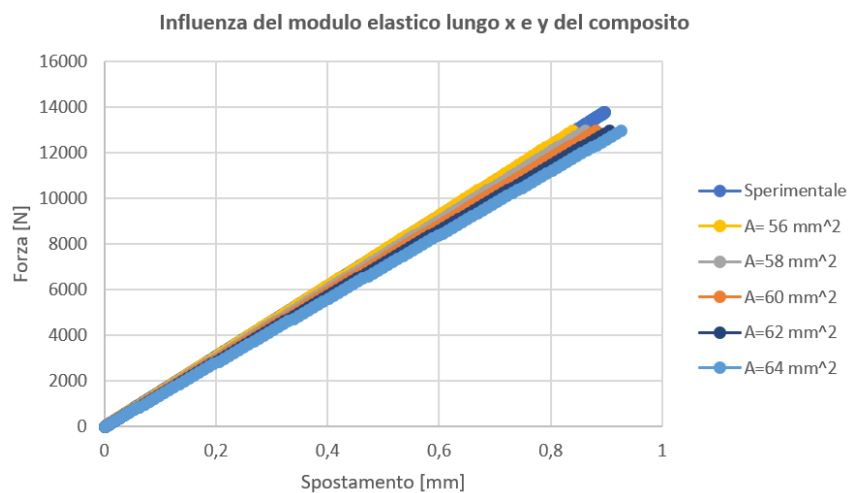


Fig. 4.5. Confronto rette forza-spostamento al variare della sezione della lastra di composito

Anche la sezione, come prevedibile, modifica il diagramma forza-spostamento. Come effettuato per lo spessore, si è calcolata, anche in questo caso, la variazione percentuale dell'inclinazione della curva forza-spostamento al variare della sezione rispetto al diagramma sperimentale (Tab. 4.6).

Area [mm ²]	Variazione percentuale dell'inclinazione della retta forza-spostamento rispetto alla curva sperimentale
20*2.8=56	+0,60%
20*2.9=58	-1,96%
20*3=60	-4,19%
20*3.1=62	-6,71%
20*3.2=64	-8,90%

Tab. 4.6. Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare della sezione della lastra di composito

Si evince che una sezione di 56 mm² permette di raggiungere la distanza percentuale minima dalla retta sperimentale. Considerare uno spessore di 2.8 mm delle lastre di composito al posto dei 3 mm ipotizzati è plausibile in quanto si è evidenziata una diminuzione dello spessore del provino alle sue estremità.

Dopo aver valutato l'influenza del modulo $E_x=E_y$ sui risultati, derivante dalle prove a trazione delle lastre di composito, si vuole ora valutare la dipendenza dei risultati dallo spessore del volume di composito formante la giunzione. Le proprietà del materiale da attribuirgli sono riportate in tabella 4.7 e sono riferite ai valori inizialmente considerati prima dell'analisi di sensitività.

Materiale composito ortotropo		
$E_x=E_y=35000$ MPa	$\nu_{xy}=0.3$	$G_{xy}=13461$ MPa
$E_z=3000$ MPa= E resina	$\nu_{xz}=\nu_{yz}=0.3$	$G_{xz}=G_{yz}=1154$ MPa

Tab. 4.7. Proprietà del materiale composito attribuite per valutare l'influenza dello spessore

Come consuetudine, si sono paragonate le rette forza-spostamento con quella sperimentale, sempre nel caso di provino con punte a forma di parallelepipedo (Fig. 4.6) e si è valutata la variazione percentuale nell'inclinazione di tali curve (Tab. 4.8).

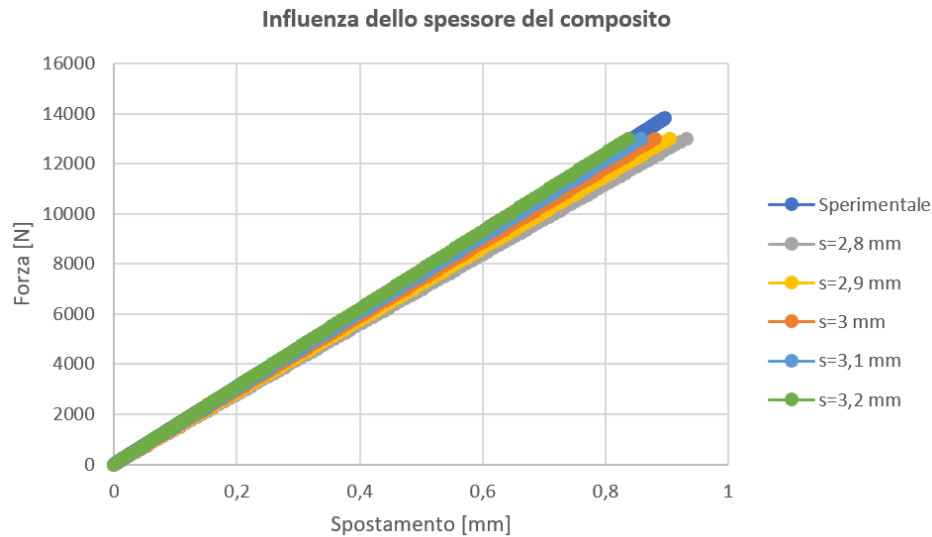


Fig. 4.6. Confronto rette forza-spostamento al variare dello spessore del volume di composito

Spessore [mm]	Variazione percentuale dell'inclinazione della retta forza-spostamento rispetto alla curva sperimentale
2.8	-9,42%
2.9	-6,73%
3	-4,19%
3.1	-1,69%
3.2	+0,89%

Tab. 4.8. Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare dello spessore del volume di composito

Alla luce dei risultati sulla variazione di spessore del volume del composito, anche nel caso peggiore, spessore pari a 2.8, si registra una variazione massima del 10% rispetto al caso sperimentale di riferimento. Non si sono valutati ulteriori spessori, sia in difetto sia in eccesso rispetto ai 3 mm di riferimento, perché dalle misurazioni dei volumi di composito dei provini, effettuate tramite calibro, non risultano valori al di sotto di 2.8 mm e al di sopra di 3.2 mm. Si continuerà comunque a considerare uno spessore di tale volume pari a 3 mm perché nella media i provini presentano questo spessore. L'analisi in questo caso mira a valutare quanto questo parametro influenzi i risultati più che ad effettuare una calibrazione del modello.

Simulazioni numeriche

A questo punto, si è pensato di incrementare il valore di modulo elastico lungo la direzione Z in quanto non è presente solo la resina ma, anche se in minima parte, vi sono anche fibre di carbonio dei vari strati di tessuto. Si è preso come modello quello con punte a parallelepipedo e partendo dal valore prefissato di 3000 MPa, si è aumentato E_z a passi di 1000 MPa.

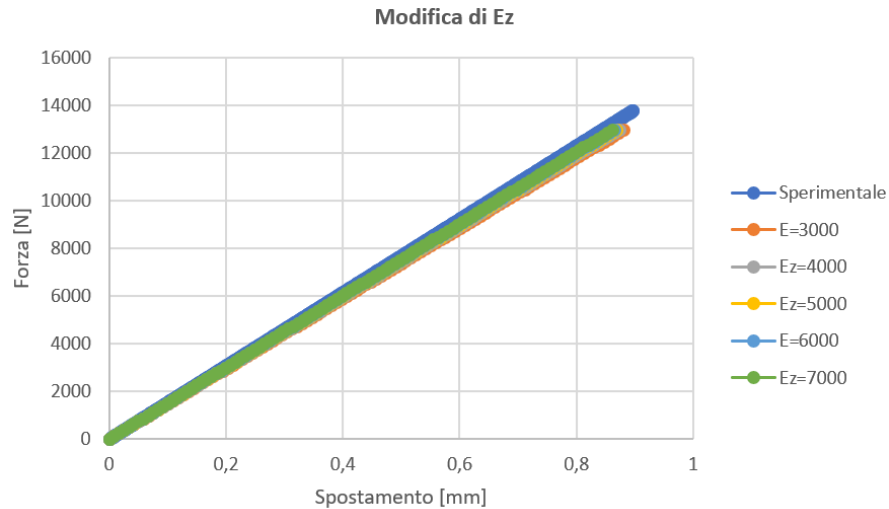


Fig. 4.7. Confronto rette forza-spostamento al variare del modulo elastico E_z

E_z [MPa]	Variazione percentuale dell'inclinazione della retta forza-spostamento rispetto alla curva sperimentale
3000	-4,19%
4000	-3,32%
5000	-2,76%
6000	-2,37%
7000	-2,05%

Tab. 4.9. Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento al variare di E_z

Dalla figura 4.7 e dalla tabella 4.9 si verifica che la differenza nei risultati non è così sostanziale. Poiché inoltre non si può sapere quanto la presenza delle fibre influenzi il modulo elastico in direzione Z, in prima approssimazione, si sceglie di lasciare E_z pari a 3000 MPa ovvero pari al modulo elastico della sola resina.

L'analisi di sensitività ha permesso di valutare, non solo l'influenza di alcuni parametri sui risultati delle simulazioni, ma anche di calibrare e scegliere i valori,

conformi alle osservazioni dei provini, da attribuire al modello a due volumi, che permettono di ricavare rette forza-spostamento simili a quella sperimentale. Si è scelto una sezione delle lastre di composito di 56 mm² che fornisce la minima variazione dei risultati rispetto a quelli sperimentali e che è più realistica poiché i provini presentano un assottigliamento alle estremità. Benché la lunghezza migliore delle lastre è risultata essere 95 mm, si è scelto di considerare una lunghezza di 90 mm che fornisce risultati simili. Di conseguenza, il composito ora presenterà le caratteristiche riassunte in tabella 4.10.

Caratteristiche materiale CFRP		
E [MPa]	G [MPa]	ν
$E_x=E_y=37387$ $E_z=3000$	$G_{xy}=14380$ $G_{xz}=G_{yz}=1154$	0.3

Tab. 4.10. Caratteristiche del materiale CFRP

Dopo aver calibrato il valore di modulo di Young del composito utilizzando il provino con punte a forma di parallelepipedo, occorre verificare che esso sia adatto anche per le restanti geometrie. Si sono quindi determinati i diagrammi forza-spostamento per tutte le tipologie di giunzione andando a confrontare i risultati del modello originario con composito di spessore di 3 mm (area 60 mm²) e del modello derivante dall'analisi di sensitività avente composito spesso 2.8 mm (area di 56 mm²) con il caso sperimentale di riferimento. In questo caso le aree di interesse sono le sezioni delle lastre di composito utilizzate per la determinazione del modulo elastico in direzione X e Y.

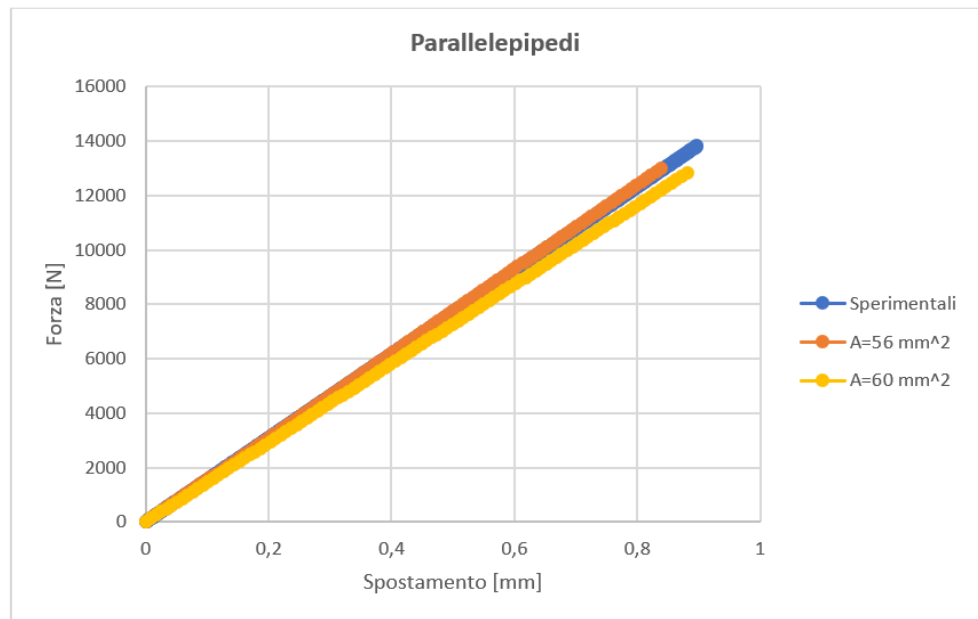


Fig. 4.8. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punta a forma di parallelepipedo

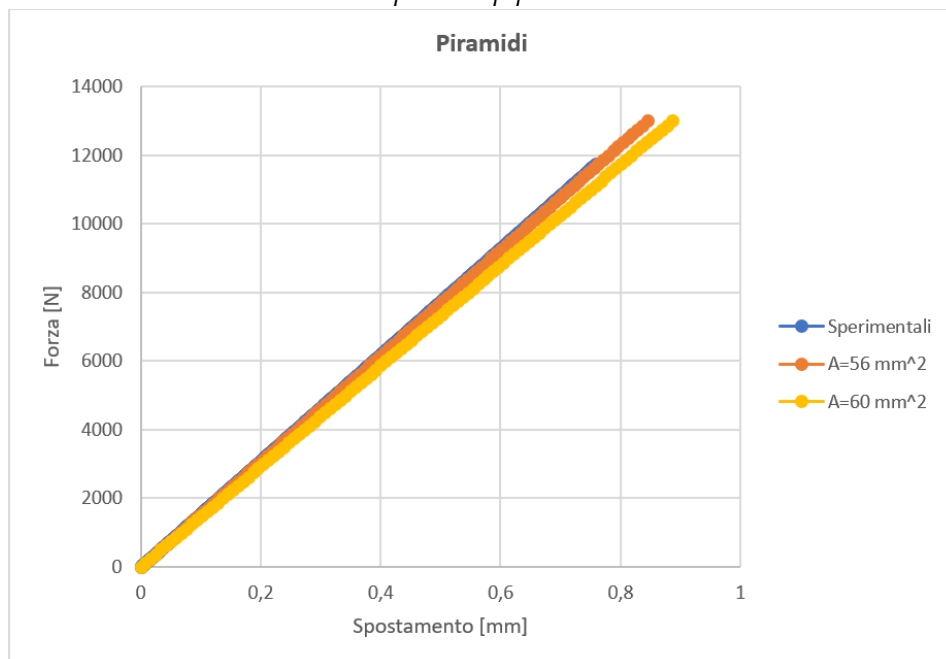


Fig. 4.9. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punta piramidali

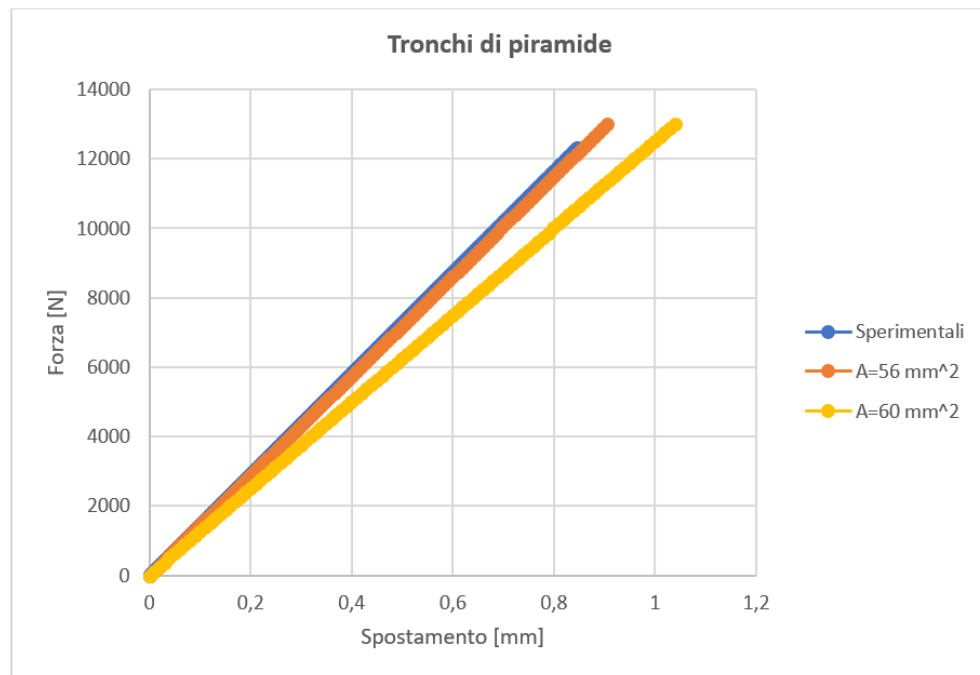


Fig. 4.10. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punta a forma di tronchi di piramide

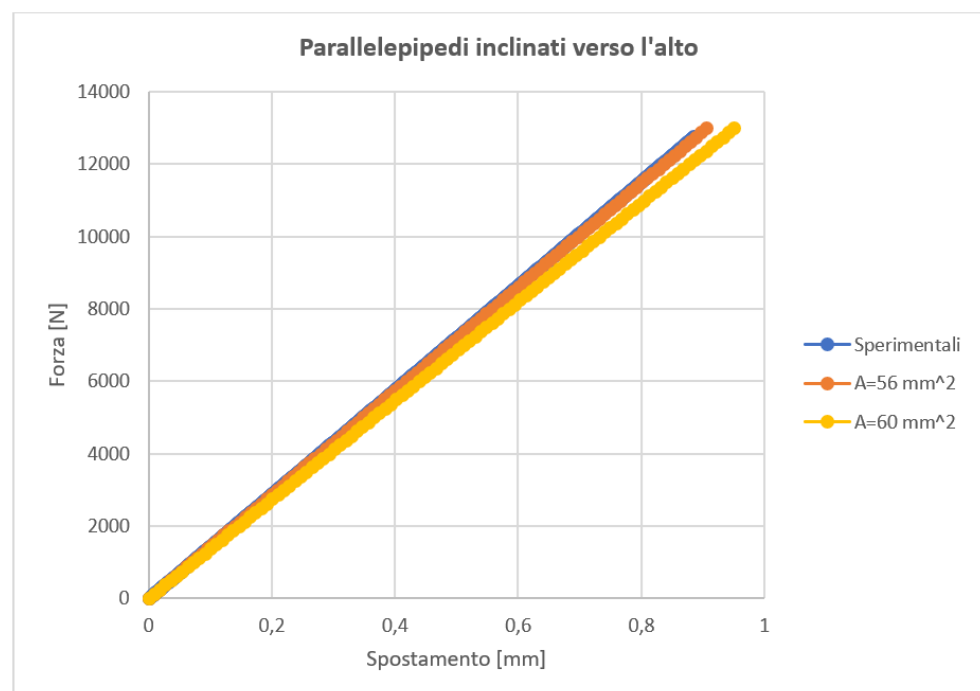


Fig. 4.11. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punta a forma di parallelepipedo inclinati verso l'alto

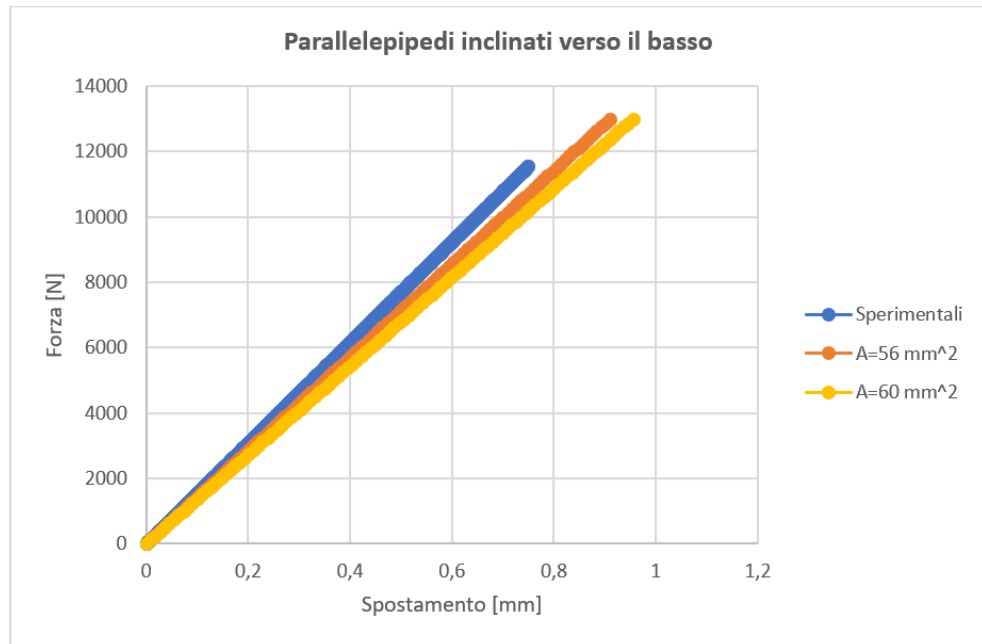


Fig. 4.12. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punta a forma di parallelepipedo inclinati verso il basso

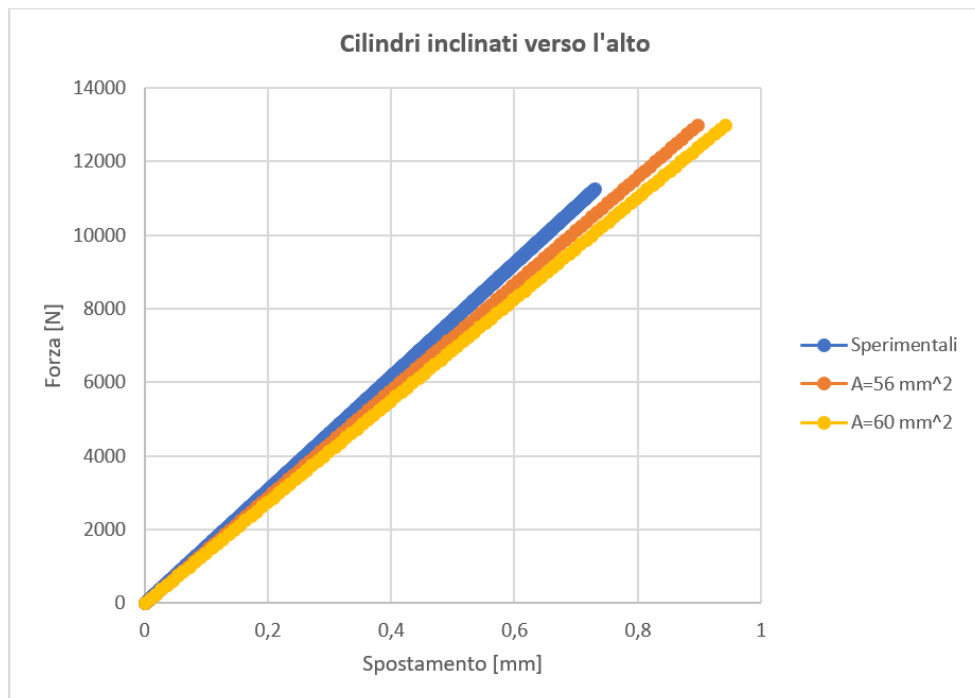


Fig. 4.13. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte cilindriche inclinate verso l'alto

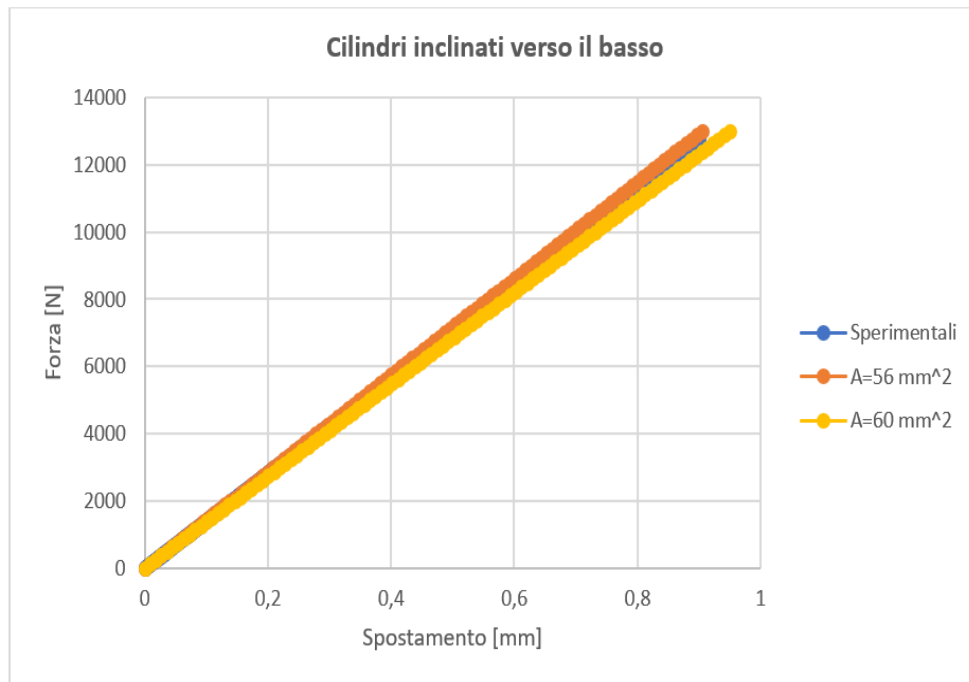


Fig. 4.14. Verifica delle proprietà del CFRP con provino con punte cilindriche inclinate verso il basso

Si riportano in tabella 4.11 le variazioni percentuali dell'inclinazione delle rette forza-spostamento rispetto al caso sperimentale sia per il modello precedente (area 60 mm²) sia nel caso aggiornato (area 56 mm²).

Tipologia di punte	Variazione % con A=60 mm ²	Variazione % con A=56 mm ²
Parallelepipedo	-5,55	+0,60
Piramidi	-5,15	-0,46
Tronchi di piramide	-14,00	-9,58
Parallelepipedo verso l'alto	-5,13	-0,43
Parallelepipedo verso il basso	-11,75	-7,35
Cilindri verso l'alto	-10,50	-6,06
Cilindri verso il basso	-3,52	+1,32

Tab. 4.11. Variazione dell'inclinazione della retta forza-spostamento per tutte le tipologie di provino con le nuove proprietà del composito

Osservando i valori di variazione rispetto al caso sperimentale ed i grafici, per tutti i modelli si nota che, conferendo al materiale composito le proprietà ricavate

considerando le lastre spesse 2.8 mm, si ha un avvicinamento netto al caso sperimentale rispetto alle simulazioni effettuate con E_x ricavato da sezioni pari a 60 mm². A fronte degli ottimi risultati riscontrati, il composito ortotropo del modello a tre volumi verrà quindi caratterizzato nelle simulazioni numeriche dalle proprietà descritte dalla tabella 4.10.

4.2 Modello a tre volumi

Al fine di alleggerire le future simulazioni, si è pensato di costruire un nuovo modello in grado di simulare la giunzione tra metallo e composito senza la necessità di inserire le punte sulla parte metallica; queste, infatti, sono la principale causa di incremento della complessità del modello numerico e dei tempi computazionali.

Tale modello si compone di tre differenti volumi: il primo per il provino metallico, il secondo, raffigurante la giunzione, dato dalla combinazione delle percentuali in volume delle punte metalliche e del materiale composito e, infine, il terzo rappresentante il materiale composito testato in macchina. Viene inserita, qui di seguito, la vista esplosa e l'assieme del modello a tre volumi:

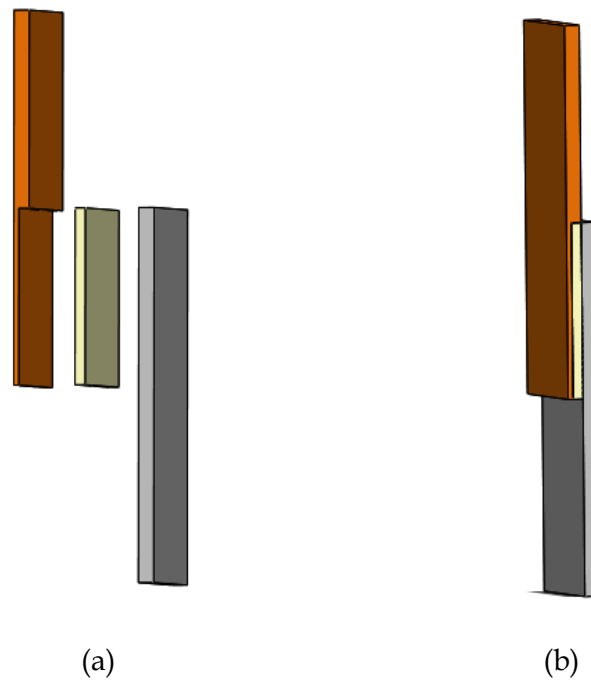


Fig. 4.15. Schermata su Solidworks della vista esplosa (a) e dell'assieme (b) del modello a tre volumi

Come già anticipato, il volume della giunzione metallo-composito viene ricavato da un calcolo basato sulle percentuali in volume delle punte metalliche, differente per ogni geometria, e sulla porzione di materiale composito; per maggiore completezza vengono riportati i passaggi relativi all'ottenimento delle proprietà meccaniche, modulo elastico e a taglio, relative al volume di giunzione.

$$V_{punta} = \text{volume della singola punta geometrica}$$

$$V_{metallo} = n.ro \text{ punte} * V_{punta}$$

$$V_{totale} = \text{volume del parallelepipedo della giunzione}$$

$$V_m = \frac{V_{metallo}}{V_{totale}}$$

$$V_c = 1 - V_m$$

$$G_m = \text{Modulo a taglio del metallo} = \frac{E_m (\text{Modulo elastico del metallo})}{2 * (1 + \nu)}$$

$$E_x = E_y = \frac{E_m * E_c}{E_m * V_c + E_c * V_m}$$

$$E_z = \frac{E_m * E_c}{E_m * V_c + E_c * V_m}$$

$$G_{xy} = \frac{G_m * G_c}{G_m * V_c + G_c * V_m}$$

$$G_{xz} = G_{yz} = \frac{G_m * G_c}{G_m * V_c + G_c * V_m}$$

$$\nu_{xy} = 0,3$$

$$\nu_{xz} = \nu_{yz} = 0,3$$

Come è possibile notare dalle formule appena descritte, il materiale rappresentante la giunzione viene considerato come ortotropo, caratterizzato da moduli uguali nelle direzioni x e y e valori diversi lungo la sua profondità. Essendo un materiale composto da due porzioni differenti, combinate insieme, non era pensabile definirlo e trattarlo come isotropo. Per quanto, invece, concerne il volume di solo materiale composito, si sfruttano le proprietà meccaniche di ortotropia ricavate nei paragrafi precedenti. Tali caratteristiche vengono riassunte nella seguente tabella:

Componente	Materiale	Tipologia	Dimensioni [mm]	ν	
Grigio	Inconel625 non trattato termicamente	Isotropo	70x20x3	0.3	
Bianco	Giunzione (combinazione di materiale composito e punte metalliche)	Ortotropo	30x20x2	0.3	
Marrone	Composito in fibra di carbonio	Ortotropo	70x20x3	0.3	

Tab. 4.12. Proprietà dei materiali del modello a tre volumi

Come da procedura, dal CAD realizzato su Solidworks si realizza il file IGES ad esso relativo per le simulazioni numeriche su Ansys. Per quanto riguarda, invece, il sistema di carichi e vincoli, si utilizzano degli incastri alla base inferiore del provino metallico e si distribuisce una forza di 125 N sulla superficie superiore del materiale composito.

4.2.1 Analisi di sensitività del volume di giunzione

Al fine di ricavare le dimensioni corrette di questo particolare volume, supposte inizialmente di 20x30x2 mm, si è deciso di calibrare separatamente lunghezza e spessore. Tale analisi di sensitività viene effettuata sul modello risultato più prestante dalle prove a trazione su macchina, ovvero quello con punte a forma di parallelepipedo; la scelta è stata ulteriormente influenzata dalla buona somiglianza dei modelli precedenti con il caso sperimentale.

Variando lo spessore del volume di giunzione, aumenta la percentuale in volume di materiale composito rispetto a quella delle punte metalliche, la quale, invece, rimane invariata. Lo spessore minimo della giunzione è di 2 mm in quanto esso deve comprendere per lo meno la sporgenza di tutte le punte metalliche ideate. Si procede dunque con l'analisi di tre diversi spessori crescenti fino a un valore, ritenuto massimo, pari a 2.5 mm. La motivazione di tale limite risiede nel fatto che uno strato, seppur minimo, di composito ortotropo, non facente parte della giunzione, è sempre presente in ogni modello e, quindi, non avrebbe senso simulare modelli con giunzioni spesse più di 2.5 mm. Fatte queste considerazioni iniziali, si procede col riportare in una tabella i moduli ricavati per ogni spessore e le relative variazioni dal modello sperimentale di riferimento.

Spessore [mm]	Percentuale in volume [%]	E [MPa]	G [MPa]	Variazione inclinazione retta forza-spostamento [%]
2	$V_m=36$ $V_c=64$	$E_x=E_y=37387$ $E_z=3000$	$G_{xy}=14380$ $G_{xz}=G_{yz}=1154$	-2,58
2.1	$V_m=34$ $V_c=66$	$E_x=E_y=51172$ $E_z=4507$	$G_{xy}=19682$ $G_{xz}=G_{yz}=1734$	-4,84
2.3	$V_m=31$ $V_c=69$	$E_x=E_y=49559$ $E_z=4316$	$G_{xy}=19062$ $G_{xz}=G_{yz}=1660$	-5
2.5	$V_m=29$ $V_c=71$	$E_x=E_y=48540$ $E_z=4197$	$G_{xy}=18670$ $G_{xz}=G_{yz}=1614$	-5,13

Tab.4.13. Analisi di sensitività dello spessore del volume di giunzione

Dai risultati si evidenzia come all'aumentare dello spessore si ha un peggioramento delle prestazioni del modello, il quale risulta meno rigido di quello sperimentale. Il valore ottimale di spessore, dunque, è pari a 2 mm, ovvero la dimensione supposta inizialmente e verrà utilizzato per le simulazioni successive. Per completezza si inseriscono i grafici forza-spostamento di ogni spessore analizzato e simulato, ponendoli a confronto con l'andamento sperimentale.

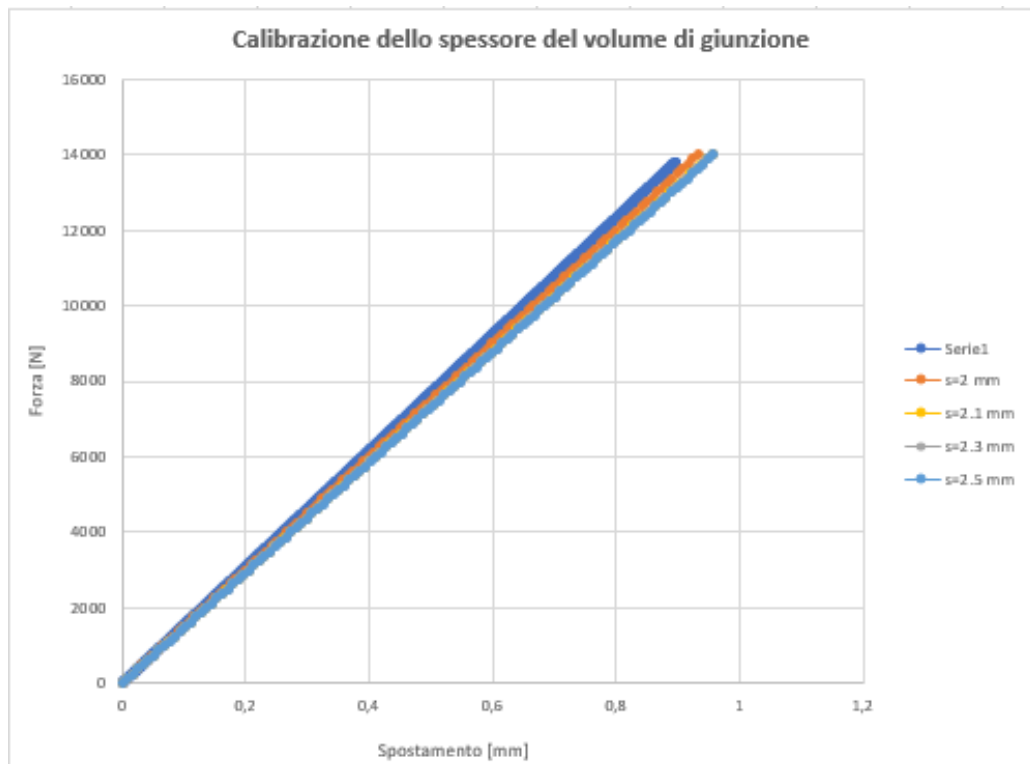


Fig.4.16. Diagramma forza-spostamento dei diversi spessori utilizzati per l'analisi di sensitività del volume di giunzione

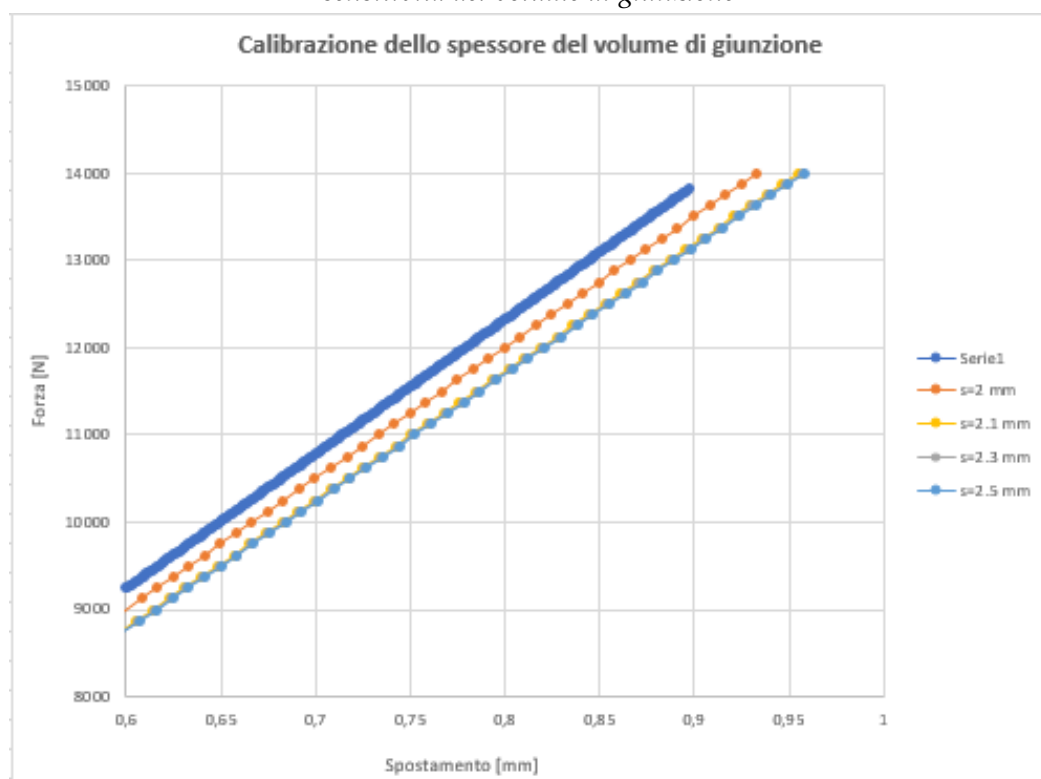


Fig.4.17. Zoom del diagramma forza-spostamento dei diversi spessori utilizzati per l'analisi di sensitività del volume di giunzione

Anche dai grafici è possibile confermare quanto detto precedentemente: spessori di giunzione superiori a 2 mm rendono il modello meno rigido rispetto al caso sperimentale e, dunque, non verranno presi in considerazione.

Portata a termine la calibrazione dello spessore, si è passati ad analizzare la lunghezza; una sua variando comporta un aumento della percentuale di materiale composito rispetto a quella di metallo, che rimane invariata. Anche in questo caso si ha un valore minimo di lunghezza, pari a 30 mm, poiché la giunzione deve ricoprire al minimo tutte le file di punte metalliche, indipendentemente dalla loro geometria. Partendo da tale valore, si sono valutate tre differenti lunghezze: 31 mm, 33 mm fino a un massimo di 35 mm. Tale limite nasce dall'osservazione delle foto dei vari provini in cui si nota che il volume di giunzione non supera di più di 5 mm la zona occupata dalle punte metalliche. I risultati che si ottengono sono riassunti nella seguente tabella, contenente anche le variazioni rispetto al caso sperimentale di riferimento.

Lunghezza [mm]	Percentuale in volume [%]	E [MPa]	G [MPa]	Variazione inclinazione retta forza-spostamento [%]
30	$V_m=36$ $V_c=64$	$E_x=E_y=37387$ $E_z=3000$	$G_{xy}=14380$ $G_{xz}=G_{yz}=1154$	-2,58
31	$V_m=35$ $V_c=65$	$E_x=E_y=51619$ $E_z=4561$	$G_{xy}=19854$ $G_{xz}=G_{yz}=1754$	-2,12
33	$V_m=33$ $V_c=67$	$E_x=E_y=50460$ $E_z=4422$	$G_{xy}=19408$ $G_{xz}=G_{yz}=1701$	-1,26
35	$V_m=31$ $V_c=69$	$E_x=E_y=49559$ $E_z=4316$	$G_{xy}=19062$ $G_{xz}=G_{yz}=1660$	-0,36

Tab.4.14. Analisi di sensitività della lunghezza del volume di giunzione

Dai risultati in tabella si nota come all'aumentare della lunghezza della giunzione il modello risulti via via più rigido e vicino al caso sperimentale. Ci si poteva aspettare un risultato del genere in quanto l'aumento di una dimensione lungo la direzione del carico a trazione porta, logicamente, a una maggiore resistenza e migliori prestazioni meccaniche del giunto finale. Per completezza, si inseriscono i diagrammi forza-spostamento risultanti dalle varie lunghezze analizzate, poste a confronto con l'andamento sperimentale.

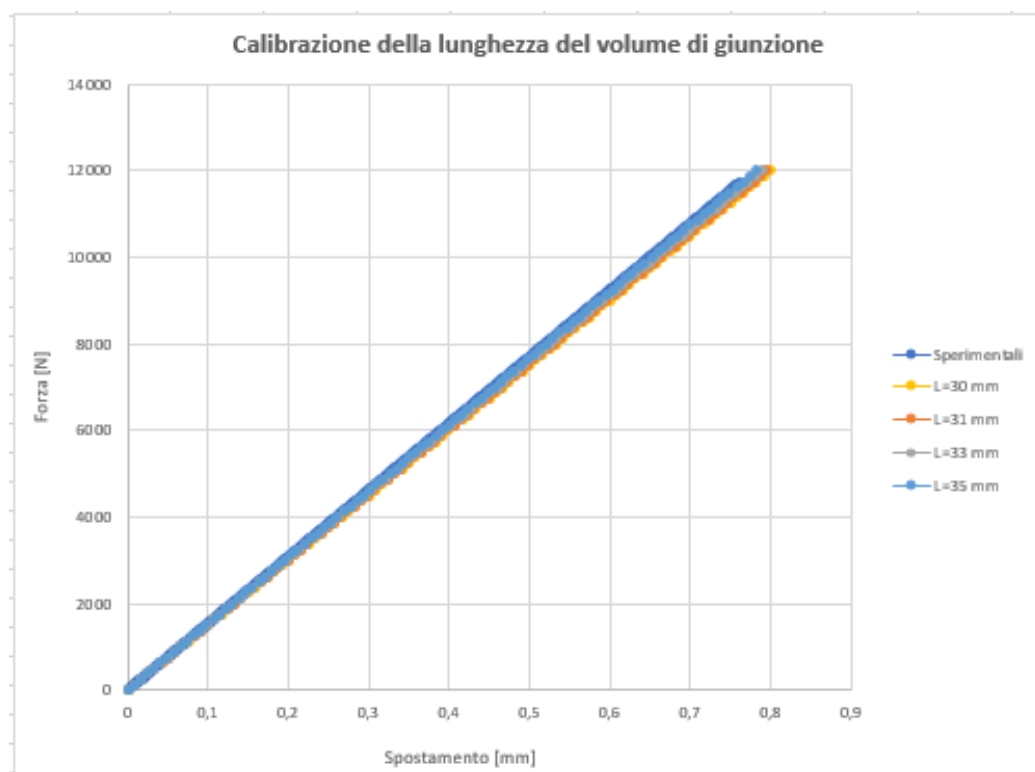


Fig.4.18. Diagramma forza-spostamento delle diverse lunghezze utilizzate per l'analisi di sensitività del volume di giunzione

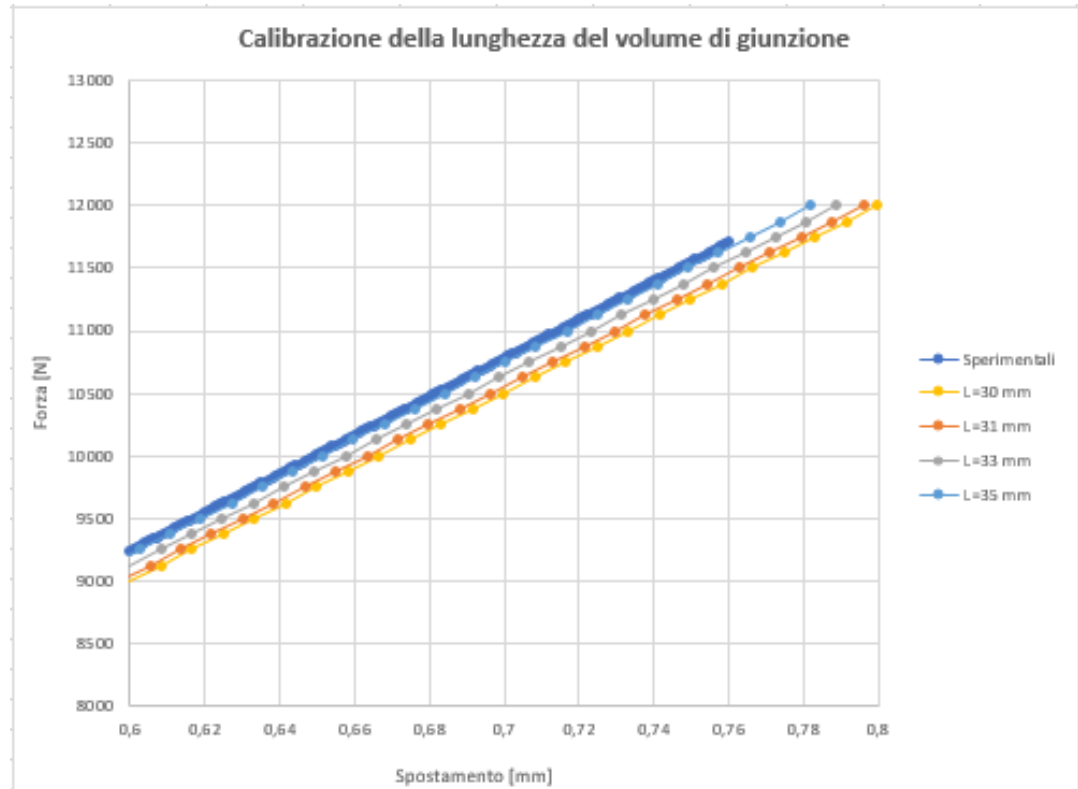


Fig.4.19. Zoom del diagramma forza-spostamento delle diverse lunghezze utilizzate per l'analisi di sensitività del volume di giunzione

Nonostante la lunghezza ottimale risulti pari a 35 mm, come mostrato anche dai grafici, si prenderà in considerazione quella di 33 mm in quanto, oltre a avvicinare di molto il modello alla realtà sperimentale, è la lunghezza più comune riscontrata sulla maggioranza dei provini; da una verifica delle foto di ogni provino realizzato, una lunghezza di 35 mm di giunzione, infatti, non viene rilevata in nessun caso.

Giunti alla fine di questa analisi di sensitività, dunque, si può concludere che le dimensioni ottimali del volume di giunzione sono le seguenti: 20 x 33 x 2 mm.

Con tali valori si sono calcolate le percentuali in volume di tutte le tipologie di punte metalliche, andando a determinare i moduli caratteristici di ognuna delle giunzioni. Si riassumono le percentuali in volume della componente metallica (V_m) e di quella del composito (V_c), i moduli elastici e di taglio nella tabella che segue.

Tipologia di punta	Percentuale in volume [%]	E [MPa]	G [MPa]
Parallelepiped	$V_m=36$ $V_c=64$	$E_x=E_y=52306$ $E_z=4644$	$G_{xy}=20118$ $G_{xz}=G_{yz}=1786$
Piramidi	$V_m=23$ $V_c=77$	$E_x=E_y=45718$ $E_z=3877$	$G_{xy}=17584$ $G_{xz}=G_{yz}=1491$
Tronchi di piramide	$V_m=19$ $V_c=81$	$E_x=E_y=44013$ $E_z=3689$	$G_{xy}=16928$ $G_{xz}=G_{yz}=1419$
Parallelepiped inclinati	$V_m=20,2$ $V_c=79,8$	$E_x=E_y=44511$ $E_z=3744$	$G_{xy}=17120$ $G_{xz}=G_{yz}=1456$
Cilindri inclinati	$V_m=16$ $V_c=84$	$E_x=E_y=42815$ $E_z=3560$	$G_{xy}=16468$ $G_{xz}=G_{yz}=1043$

Tab.4.15. Proprietà meccaniche per ogni tipologia di punta con giunzione di dimensioni 20x33x2 mm

Una visione più ampia di ottiene tramite i diagrammi forza-spostamento dei vari modelli, aventi volume di giunzione di dimensioni ottimali, e posti a confronto sia con il modello antecedente a due volumi sia con quello sperimentale.

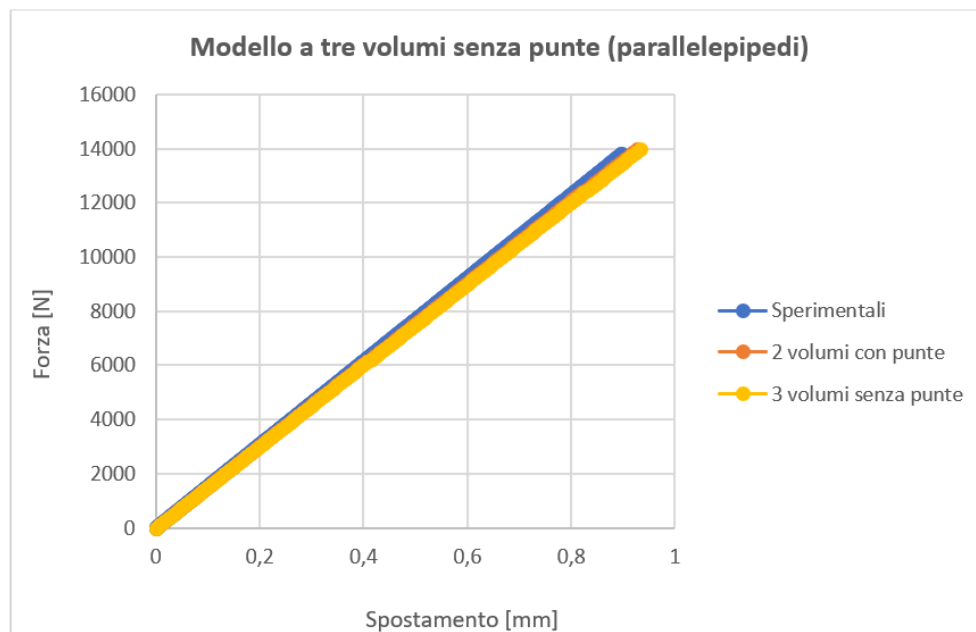


Fig. 4.20. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepiped

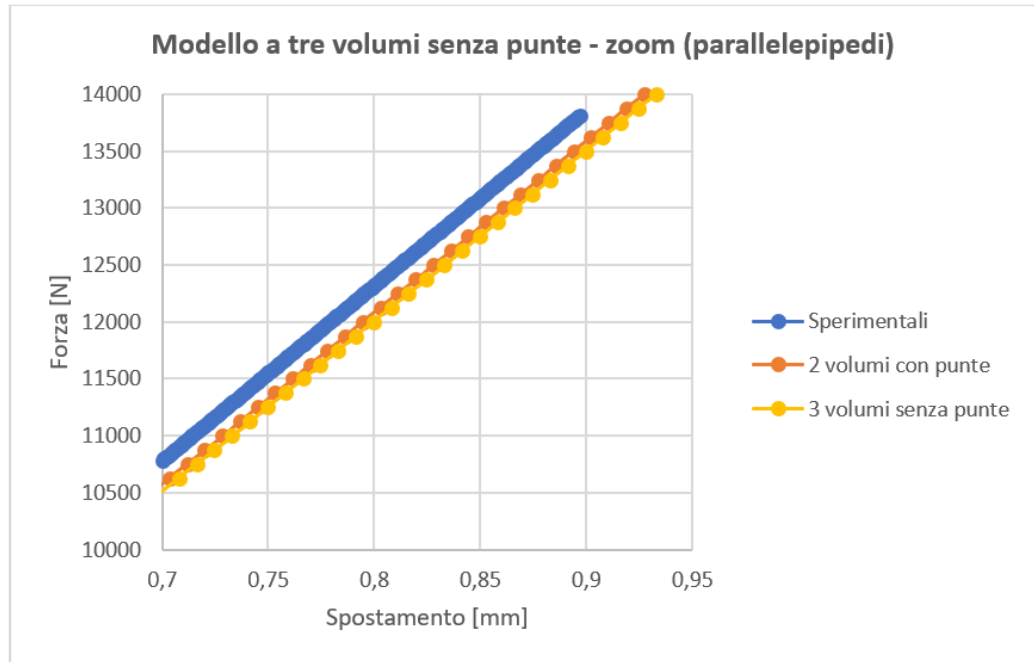


Fig. 4.21. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi

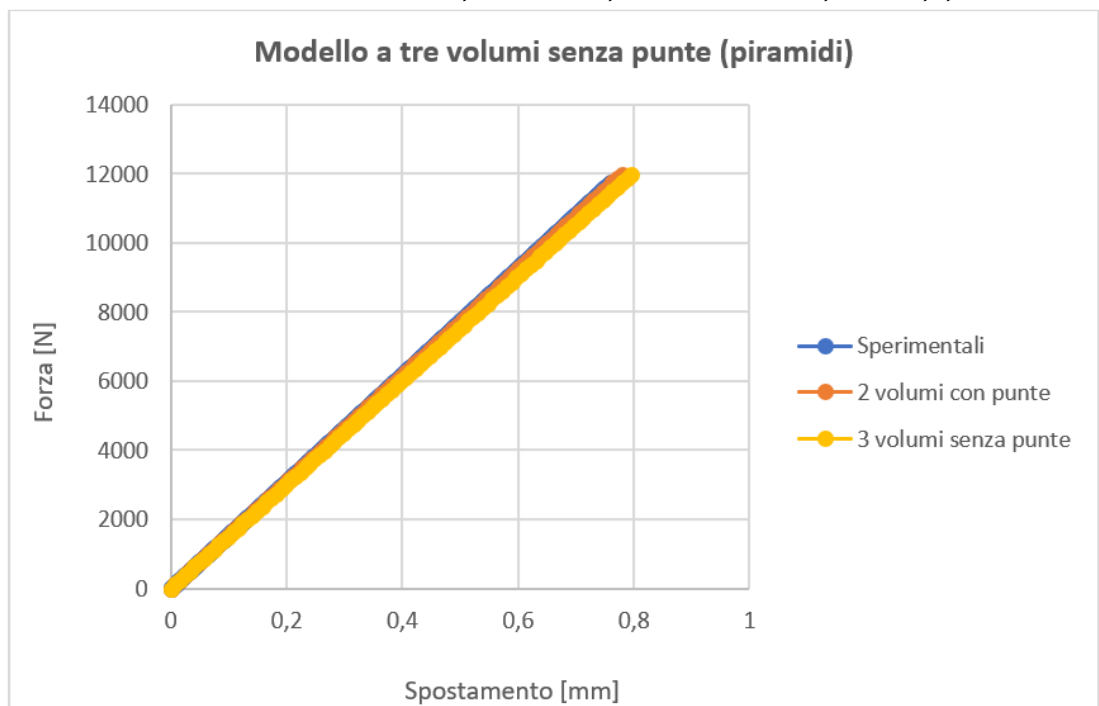


Fig. 4.22. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con piramidi

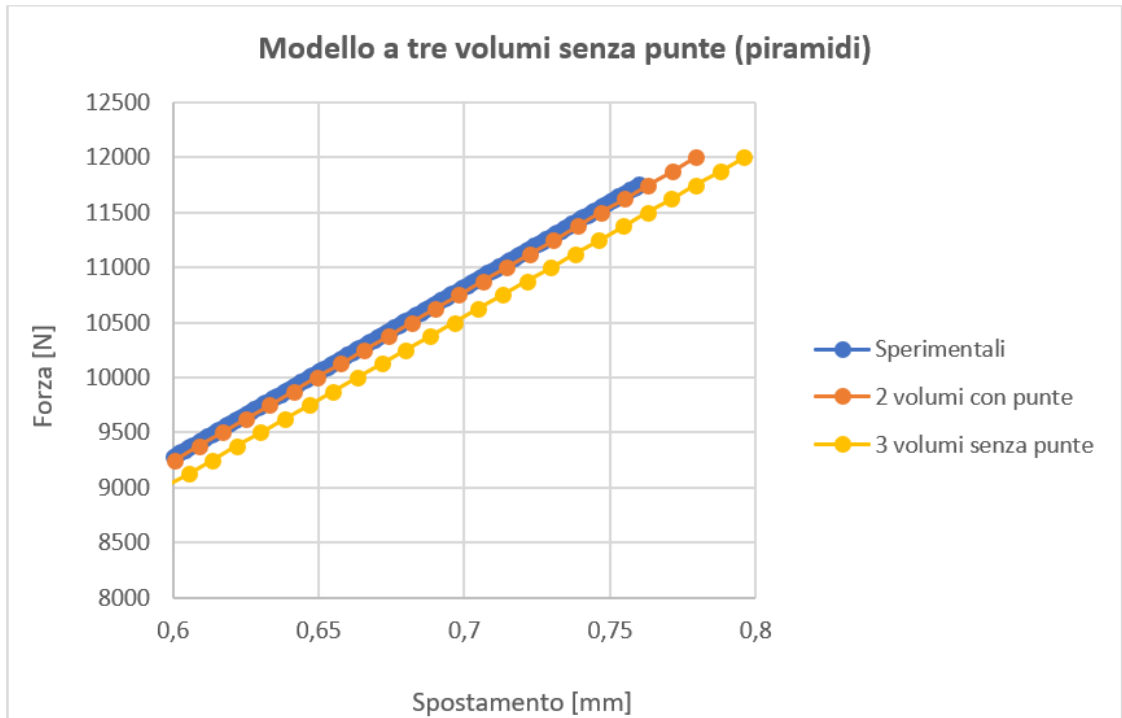


Fig. 4.23. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con piramidi

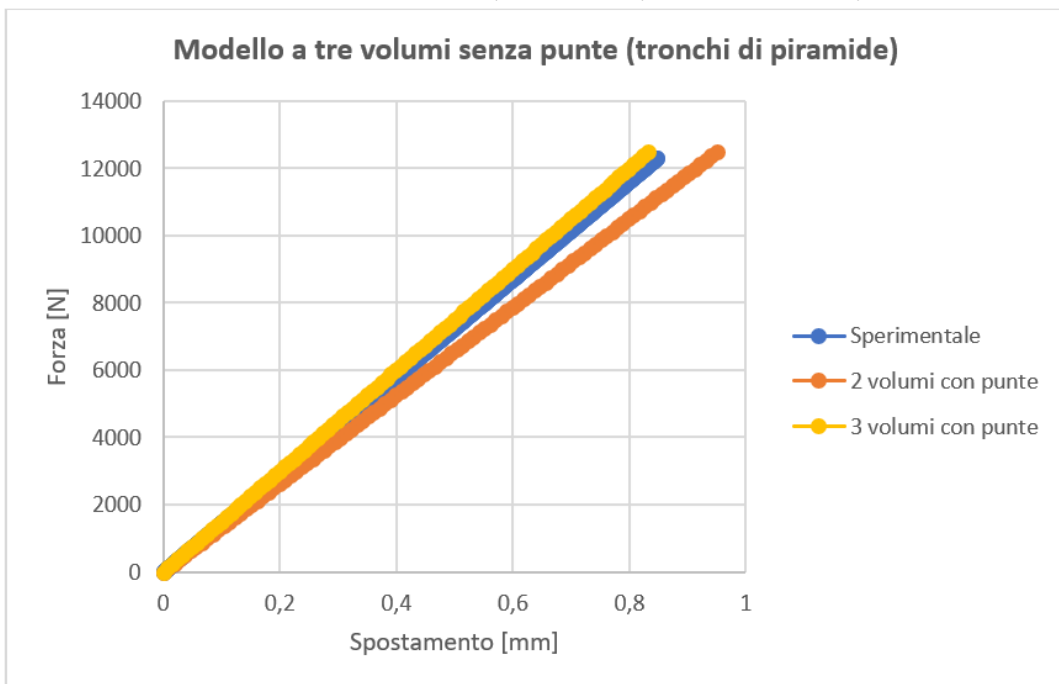


Fig. 4.24. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con tronchi di piramide

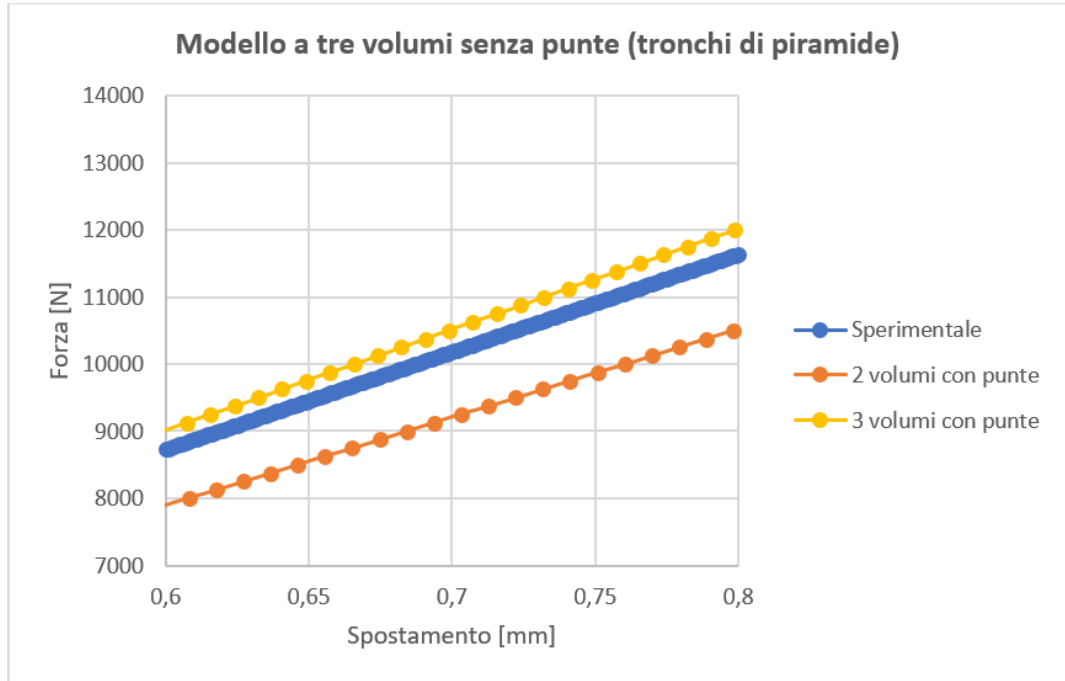


Fig. 4.25. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con tronchi di piramide

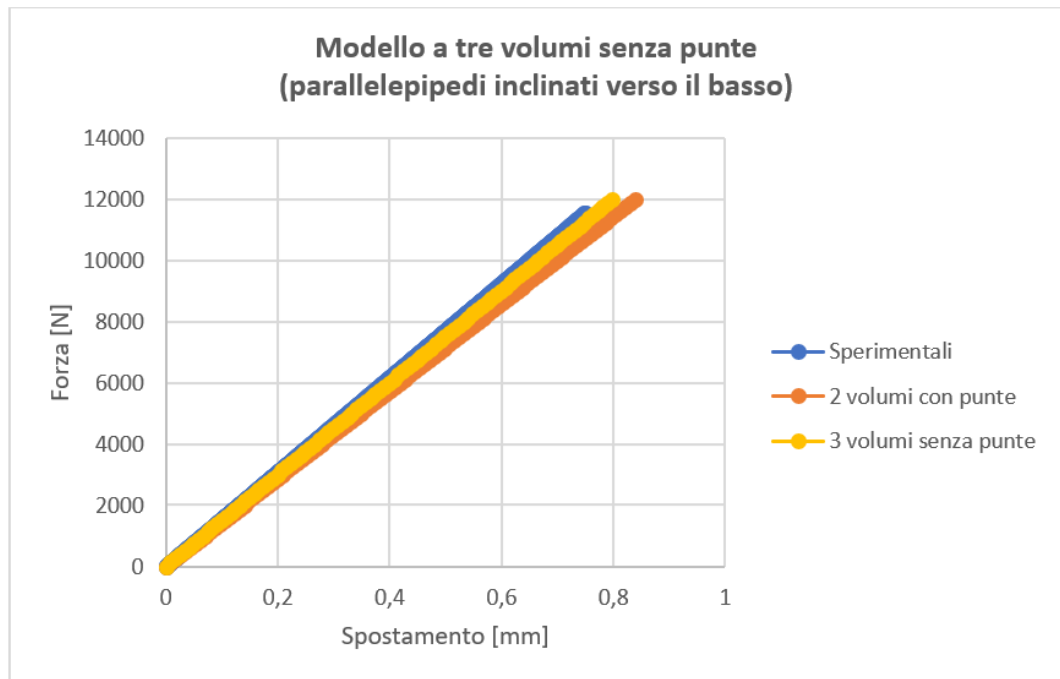


Fig. 4.26. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso il basso

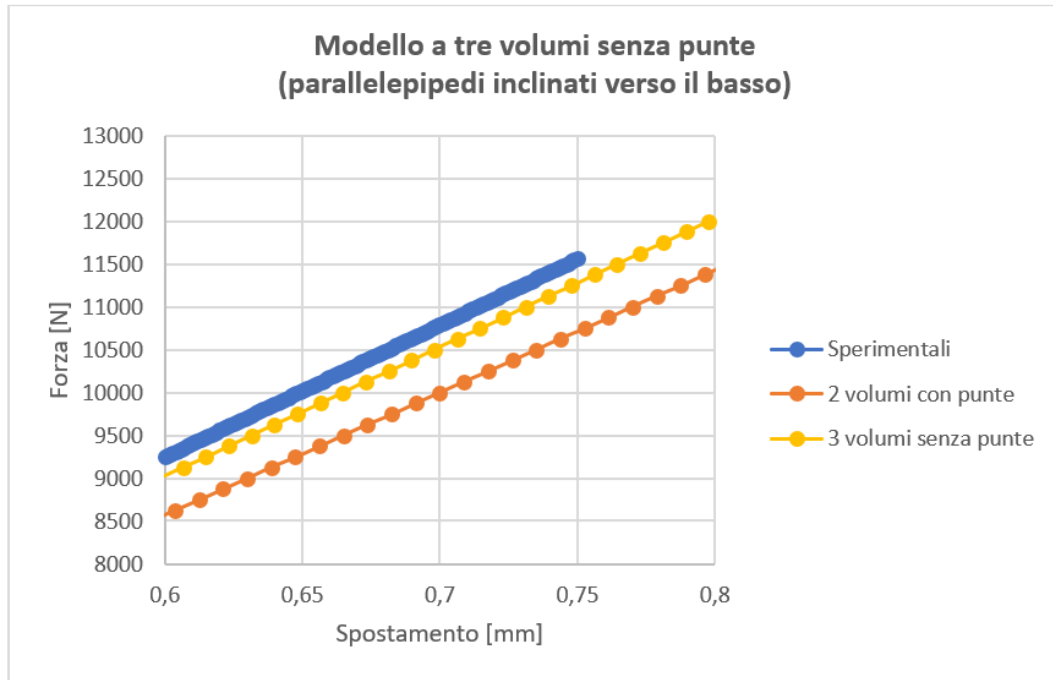


Fig. 4.27. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso il basso

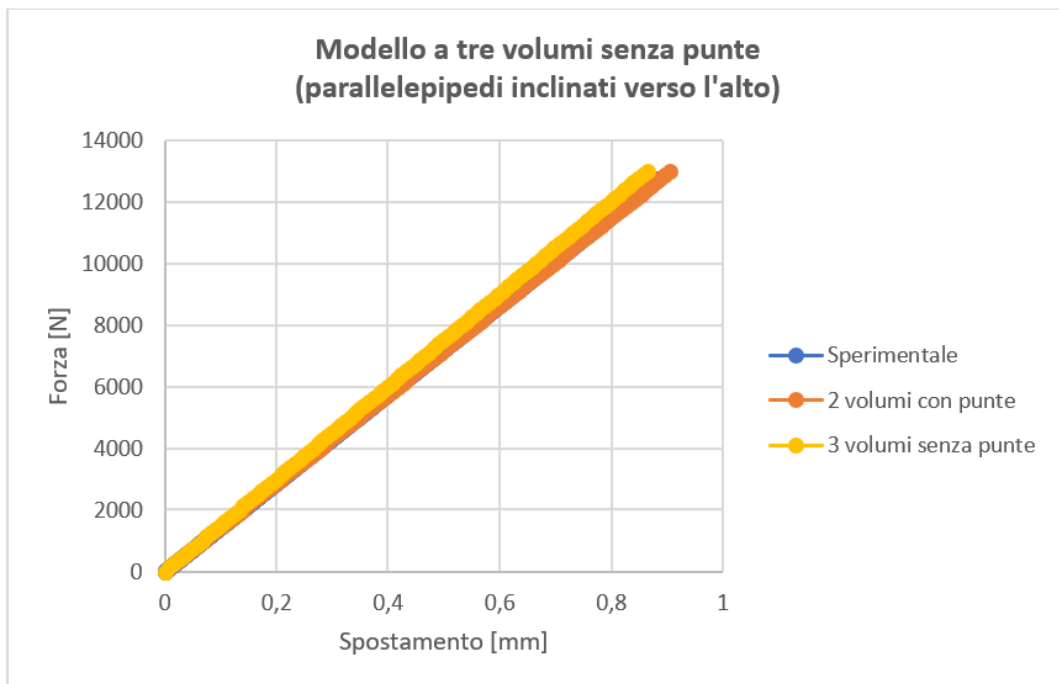


Fig. 4.28. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso l'alto

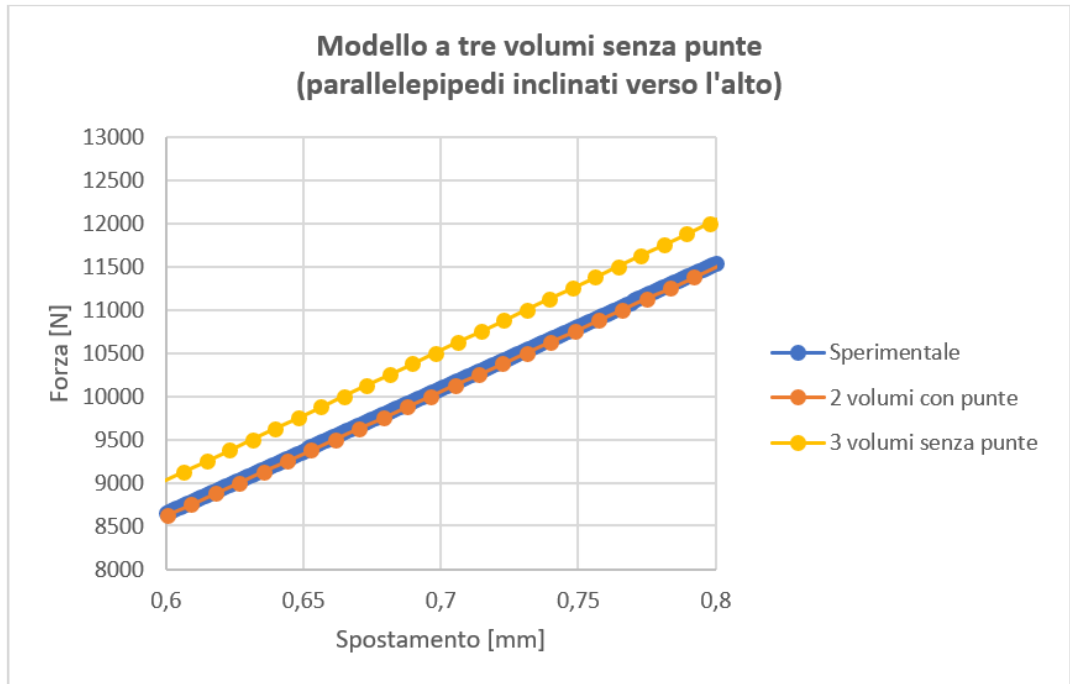


Fig. 4.29. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con parallelepipedi verso l'alto

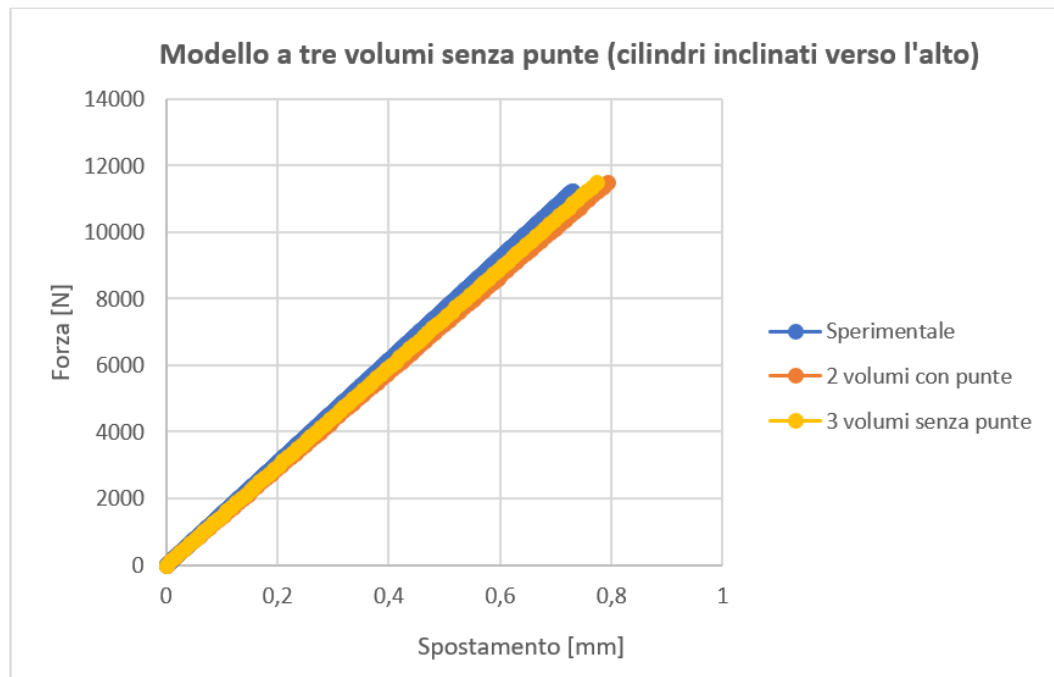


Fig. 4.30. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso l'alto

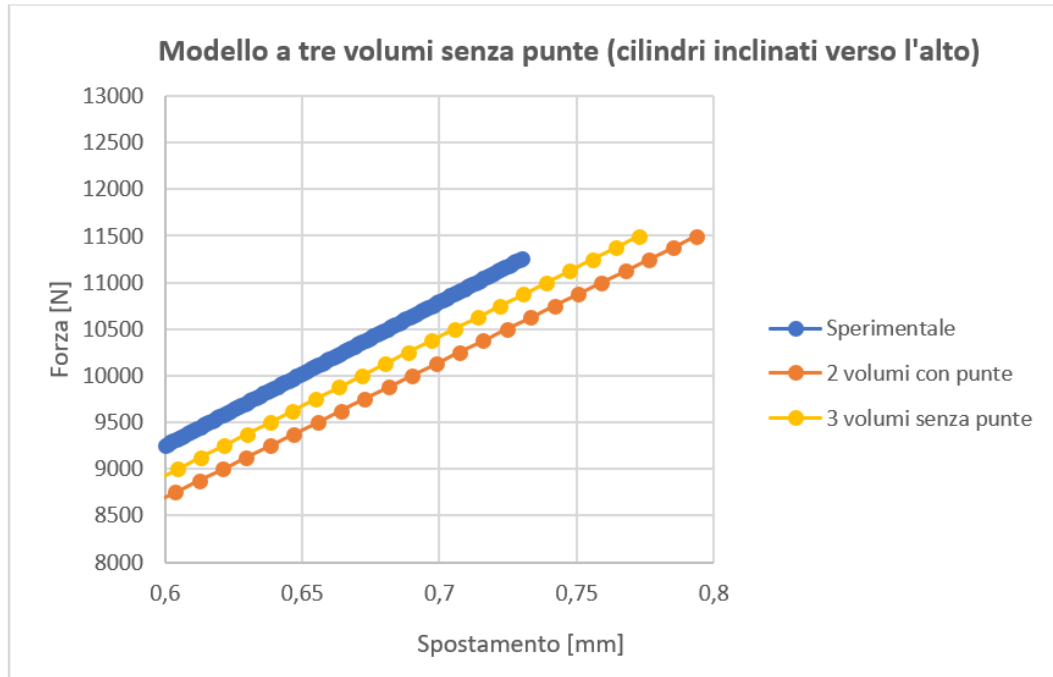


Fig. 4.31. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso l'alto

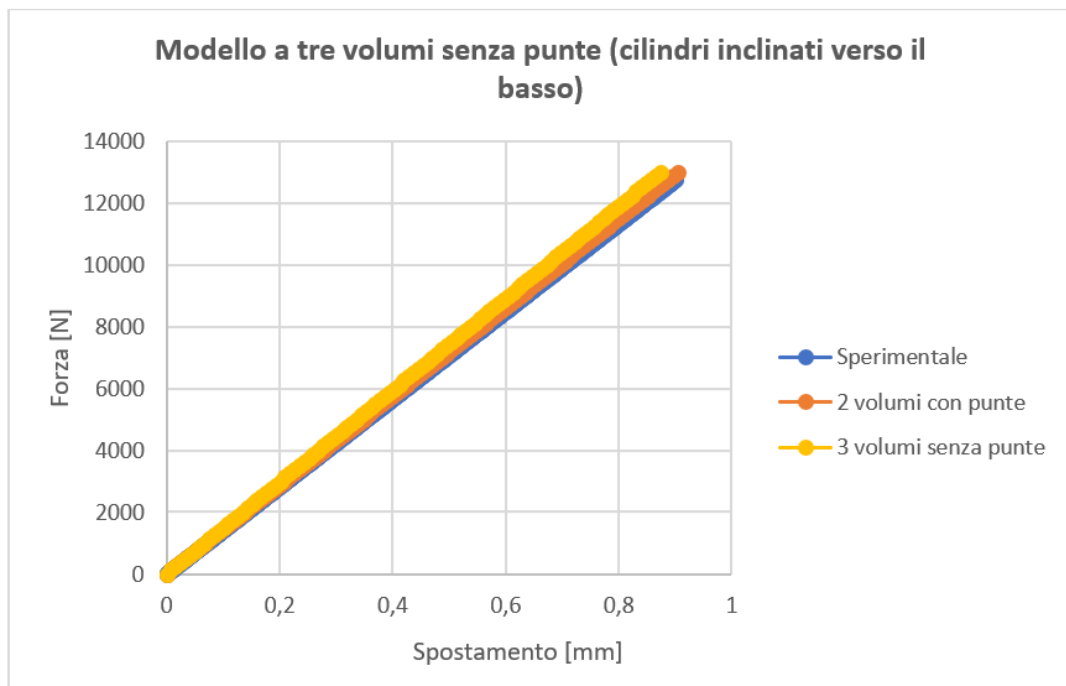


Fig. 4.32. Diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso il basso

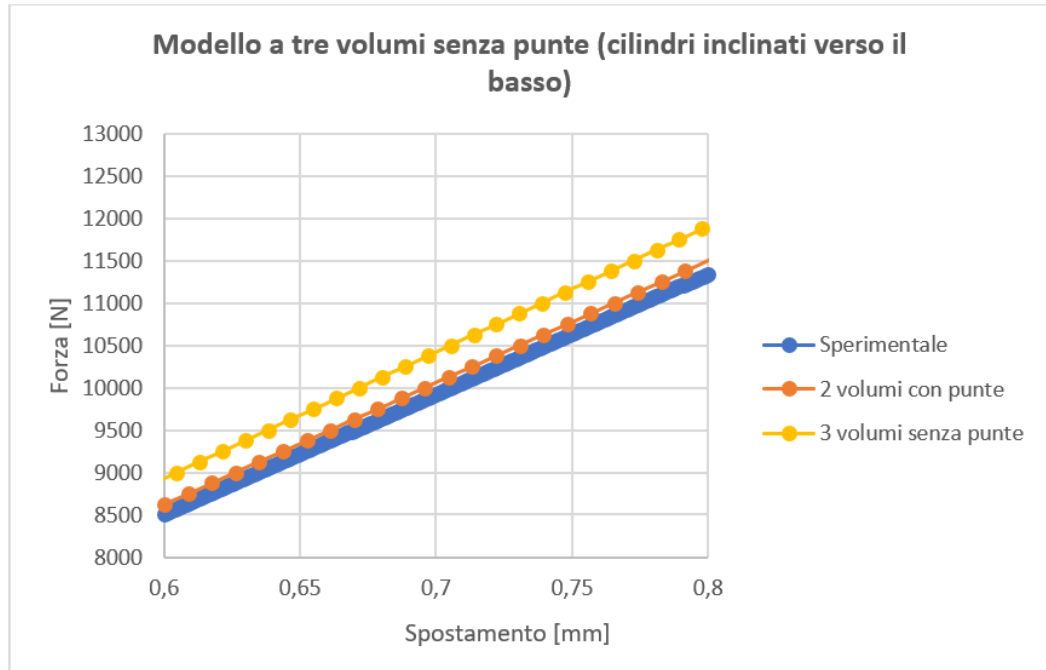


Fig. 4.33. Zoom del diagramma forza-spostamento di confronto tra modello a 3 volumi, modello a 2 volumi e andamento sperimentale per il modello con cilindri verso il basso

Nella seguente tabella si riportano le variazioni percentuali delle pendenze delle rette relative sia al modello a due che a quello a tre volumi rispetto all'andamento sperimentale corrispondente.

Variazione percentuale inclinazione della retta forza-spostamento [%]		
Tipologia punta	Modello 2 volumi con punte	Modello 3 volumi senza punte
Parallelepipedi	-1,97	-2,58
Piramidi	-0,46	-2,54
Tronchi	-9,58	+3,26
Para_alto	-0,43	+4,31
Para_basso	-7,35	-2,44
Cili_alto	-6,06	-3,50
Cili_basso	+1,32	+4,95

Tab.4.16. Variazioni percentuali delle pendenze delle rette dei modelli a due e a tre volumi rispetto all'andamento sperimentale

Dalla tabella si evince come il modello a 3 volumi, nella maggior parte dei casi, si avvicina di più al caso sperimentale rispetto al modello con punte a 2 volumi.

L'ottimo risultato viene confermato da fatto che, in generale, per tutti i casi non si registrano variazioni superiori al 5%. La chiave principale che differenzia un modello a tre volumi dall'altro è la percentuale in volume delle punte metalliche, strettamente legata alla loro geometria; sfruttare tale si è rivelato un metodo al quanto valido per la semplificazione del modello FEM su Ansys. A prova di ciò, i tempi di simulazione si riducono notevolmente passando dai due volumi ai tre volumi, in combinazione con l'ottenimento di risultati assolutamente accettabili. L'unico aspetto da tenere sempre in considerazione è che, nel caso di punte inclinate, la direzione di queste viene persa in quanto sia quelle rivolte verso il basso che quelle verso l'alto possiedono lo stesso volume.

Si conclude, dunque, che un modello, realizzato sulla base di quello a 3 volumi, risulta un'ottima rappresentazione del comportamento di una giunzione metallo-composito, così come progettata in questo lavoro di tesi.

Capitolo 5

Progettazione e analisi dell'applicazione: piede protesico

In questo capitolo viene presentata l'applicazione biomedica scelta per valutare la tenuta della giunzione progettata metallo-composito su un componente reale. Di fronte a una vasta gamma di dispositivi che presentano l'interfaccia tra tali materiali, si sceglie di realizzare e simulare un piede protesico, prendendo spunto da quelli già presenti in commercio. Si parte dalla creazione del modello CAD su Solidworks per, poi, procedere con le simulazioni numeriche. I dati ottenuti vengono riportati in apposite tabelle, seguiti da immagini che mostrano le distribuzioni delle grandezze di interesse su tutto il modello. Si conclude con delle considerazioni finali sulla tenuta della giunzione metallo-composito sulla protesi.

5.1 Aspetti e caratteristiche generali del piede protesico

L'utilizzo di un piede protesico è finalizzato sostanzialmente alla riproduzione del cosiddetto *ciclo del passo*, ovvero l'unità base del cammino, per individui che hanno subito un'amputazione a livello tibiale o femorale. A fronte di una struttura alquanto complessa del piede fisiologico, le protesi al momento non sono in grado di replicarla fedelmente ma si basano su tre elementi principali: tallone, punta e caviglia. Una prima differenza si riscontra nella forte simmetria delle protesi, in contrasto con la natura asimmetrica del piede, ma che garantisce stabilità primaria, rapidità di produzione e adattamento del paziente ai diversi modelli disponibili.

Alcuni studi hanno, inoltre, dimostrato che il dispendio energetico di un amputato è superiore a quello di un normodotato; da ciò nasce l'esigenza di realizzare protesi con un'adeguata risposta energetica in modo da non affaticare eccessivamente una persona che indossa una protesi per parecchio tempo. I piedi protesici rappresentano, probabilmente, il settore in cui la protesica ha prodotto il maggior numero di modelli, ognuno dei quali può ricoprire un particolare stile di vita del paziente.

Tra i più semplici troviamo i piedi SACH, *solid Ankle Cushioned Heel*, e quelli dinamici caratterizzati da una scocca atta a simulare il piede, un riempimento ed un attacco per la caviglia. L'unico aspetto che differenzia i piedi dinamici dai SACH è la rigidità della parte anteriore che permette ai primi di adattarsi meglio su superfici non perfettamente piane. Si tratta di protesi progettate principalmente per pazienti geriatrici o con poca mobilità, che prediligono sicurezza e poca manutenzione a discapito delle performance dinamiche.

In merito all'adattamento alle varie superfici, si possono citare i piedi mono o pluri-assiali, i quali garantiscono una deambulazione complessivamente più fluida tramite l'apporto di piccoli ammortizzatori; questi ultimi fanno sì che il piede possa inclinarsi su più assi ma, dall'altra parte, non risultano idonei ad un uso più intenso a livello sportivo.

Per gli atleti, invece, o per chi conduce uno stile di vita più dinamico, sono stati progettati i piedi a restituzione di energia. Essi hanno la capacità di accumulare energia nella fase di carico che andranno, poi, a restituire durante la successiva fase di spinta, migliorandone la reattività complessiva del passo. Per comprendere più a fondo, i piedi a restituzione di energia riescono a rendere fino al 90% dell'energia del passo, contro il solo 30% del piede SACH. Lo sviluppo tecnologico ha portato alla progettazione e realizzazione di caviglie mobili, sia di origine idraulica che elettronica. A differenza dei piedi mono e pluri-assiali, in questo caso l'adattamento alle irregolarità delle superfici di contatto avviene in maniera decisamente più naturale. Risultano adatti sia per amputati trans-tibiali che trans-femorali, garantendo un'ottima interfaccia con i ginocchi elettronici-bionici. Tra gli aspetti negativi, seppur in minor numero rispetto a quelli positivi, si riscontrano i valori elevati di peso e costo di produzione.

Come ultima innovazione, si possono descrivere i piedi elettronici, che in aggiunta alle caviglie elettroniche, possiedono una mobilità maggiore anche nella parte terminale del piede, in combinazione ad ulteriori funzioni. Per maggiore completezza si inserisce una tabella illustrativa, contenente tutte le tipologie di piede protesico appena descritte. [26] [27]

Tipologie di piede protesico	
Piede SACH e piede dinamico	
Piede mono o pluri-assiale	
Piede a restituzione di energia	
Piede con caviglia elettronica	



Tab.5.1. Tipologie di piede protesico [26]

Nella fase di progettazione di un piede protesico, però, risulta importante non solo i costi contenuti per la realizzazione e la durata della protesi stessa ma anche una biomeccanica appropriata gioca un ruolo fondamentale in quanto il dispositivo deve assicurare ogni singolo movimento dell'intero ciclo del cammino.

Aspetto altrettanto critico, da non sottovalutare, è l'impatto psicologico che il paziente deve affrontare nell'adoperare una protesi. Il trauma subito da un individuo a seguito della perdita del piede è molto forte: la persona ha trascorso la sua vita abituato a vedere e muoversi il suo arto originale, dunque dall'istante in cui non potrà più usufruirne sarà obbligato per il resto della sua vita ad adoperare una protesi. Ecco il motivo per cui la protesi deve anche rispettare, quanto più possibile, la fisiologia dell'arto che sostituisce, in modo da facilitare il processo psicologico di accettazione da parte del paziente della nuova situazione e un più rapido reinserimento nella società.

Rimanendo fedeli a questa idea di base, negli anni si sono progettate protesi a fini maggiormente estetici ma meno funzionali e altre, invece, che seppur non molto vicine alla forma naturale del piede, consentono l'inserimento di calzari, come le classiche scarpe da passeggio. [28]



Fig. 5.1. Foto di piedi protesici di vario genere progettati per l'inserimento di calzari [29]

Infine l'arto sostitutivo deve presentare un design semplice, in modo da consentire la fabbricazione manuale, con materiali possibilmente reperibili in loco; questo permetterebbe la realizzazione, la manutenzione e la riparazione di protesi da parte di personale meno esperto presente nel territorio. [28]

Generalmente gli arti artificiali, come le protesi del piede, vengono realizzate con materiali come il carbonio o il titanio per l'anima, il silicone come rivestimento ed eventuali parti in metallo per i punti di giunzione con altre articolazioni o per contenere dispositivi elettronici finalizzati al movimento. Vengono scelti principalmente perché sono anallergici, igienici, indistruttibili e molto leggeri mentre il silicone vince per la sua buona resa a livello estetico. Non a caso, gli arti inferiori realizzati in silicone risultano parecchio simili a quelli naturali e questo, come già detto in precedenza, aiuta molto il paziente a livello psicologico. [30]

5.2 Realizzazione del modello CAD del piede protesico

I materiali compositi in fibra di carbonio, grazie alle loro ottime prestazioni meccaniche, come già descritto nel Capitolo 1, trovano un'ampia gamma di applicazioni nel campo aeronautico ma, soprattutto, in quello biomedico. Accade

spesso che un materiale del genere si interfacci con un componente metallico, la cui giunzione, solitamente, è rivettata, bullonata o incollata tramite appositi adesivi. Come già spiegato in precedenza, giunzioni del genere portano con sé una serie di problematiche delicate che, talvolta, conducono al distacco totale dei due diversi materiali a contatto.

Per questo progetto di tesi, viene realizzato e simulato un piede protesico, la cui geometria viene ispirata ad alcuni modelli di protesi progettati da due grandi aziende per dispositivi biomedicali. Si inseriscono, qui di seguito, le immagini relative ai due modelli di piede protesi per amputati di piede e caviglia, ideati dalle aziende Ottobock e Ossur.



Fig.5.2. Piede protesico delle aziende Ottobock (a) e Ossur (b) usati come modelli di riferimento [31]

Entrando più nel dettaglio, la scelta è, dunque, ricaduta sul modello *Challenger* della Ottobock e su quello *Talux* della Ossur. In entrambi i casi, si tratta di una protesi pensata per pazienti con un livello di attività medio o alto. La combinazione della molla alla base e del cuneo del tallone fanno sì che il modello *Challenger* garantisca un maggior livello di stabilità e controllo in caso di movimenti improvvisi del paziente o, più semplicemente, durante la fase del cammino e di quella statica. In questo modo la protesi acquista affidabilità e

versatilità, sia per una semplice corsa che per una partita di basket o tennis; per tale scopo la protesi è stata pensata per favorire l'inserimento di calzature sportive basse e, in caso di amputati transfemorali, si può utilizzare in combinazione con i ginocchi mecatronici Genium e Genium X3. [31]

La geometria pensata, invece, per il modello Talux garantisce una funzionalità di tipo multi-assiale, una spinta propulsiva che ottimizza il rapporto tra agilità ed equilibrio. Il suo particolare design con alluce separato facilita la scelta di calzature e, in generale, la suola suola è stata progettata al fine di adattarsi naturalmente ad una ampia varietà di terreni. [32]

Per entrambi i modelli di protesi, si può notare la presenza di un'interfaccia diretta tra un componente metallico, il cui scopo solitamente è quello di gancio per un eventuale ginocchio protesico, e il materiale composito in fibra di carbonio, comunemente usato come struttura portante. Si vuole, dunque, sostituire alla giunzione presente quella progettata e testata in questo lavoro di tesi. A questo punto, si passa alla realizzazione del CAD del piede protesico che verrà simulato, con opportuni carichi e vincoli, in modo da sollecitare in particolar modo il vero protagonista della simulazione numerica: il volume di giunzione. Il modello CAD, nato prendendo ispirazione dai piedi protesici della Ottobock e della Ossur, viene realizzato tramite software Solidworks.

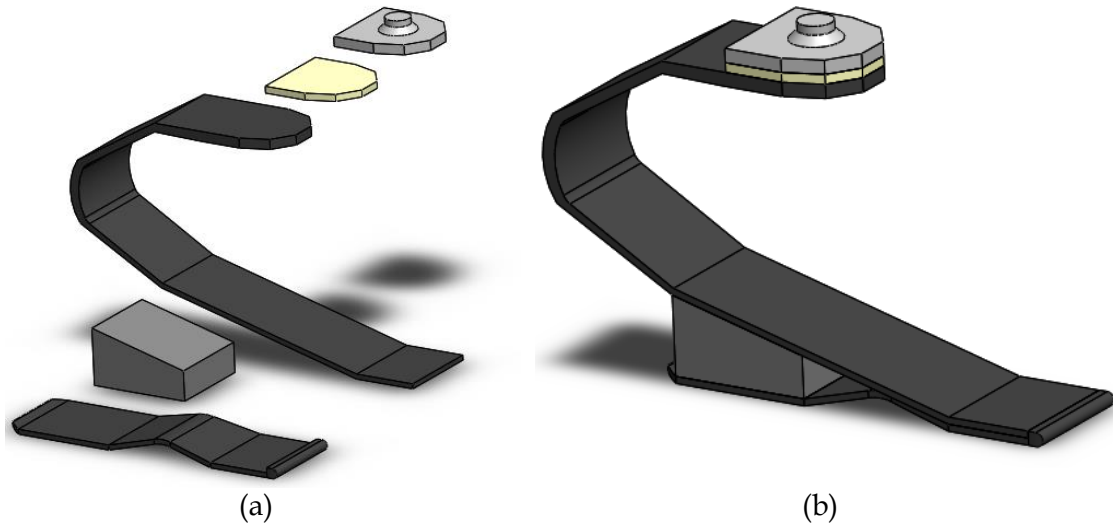


Fig. 5.3. Rappresentazione della vista esplosa (a) e dell'assieme (b) del CAD del piede protesico

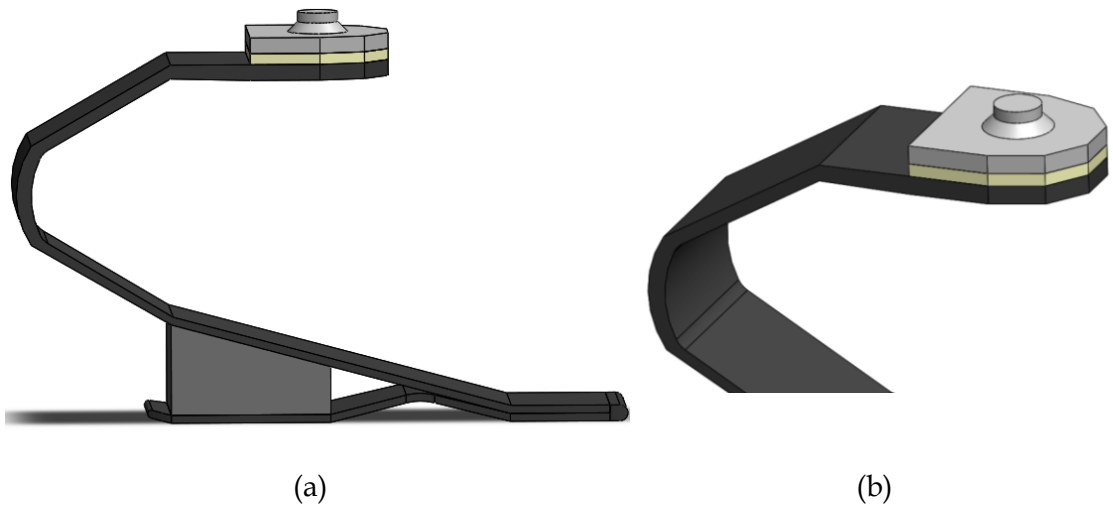


Fig. 5.4. Vista laterale dell'intera struttura (a) e zoom sulla parte superiore (b) del CAD del piede protesico

Dall'immagine è possibile notare la presenza di cinque volumi differenti: la suola e la struttura curva realizzate con composito rinforzato con fibre di carbonio, il tacco che si interpone tra i due volumi costituito da un materiale adatto ad attutire i carichi derivanti dal ciclo del passo ed, infine, il volume di giunzione e sopra quello relativo alla componente metallica.

Non essendo disponibile un quantitativo di memoria così elevato da simulare un modello tanto articolato, si è dovuto ridurre il volume andando a sfruttare la simmetria dell'intero piede; per semplificare ulteriormente le simulazioni e non

eccedere la mole di memoria necessaria ai calcoli numerici, sono state semplificate il più possibile tutte le geometrie presenti. In questo processo di semplificazione sono stati coinvolti la giunzione e il metallo, eliminando gli spigoli presenti e riducendo i loro volumi a semplici parallelepipedi, mantenendo invariate le dimensioni principali. Il modello CAD del piede protesico che ne deriva è rappresentato nelle seguenti immagini.

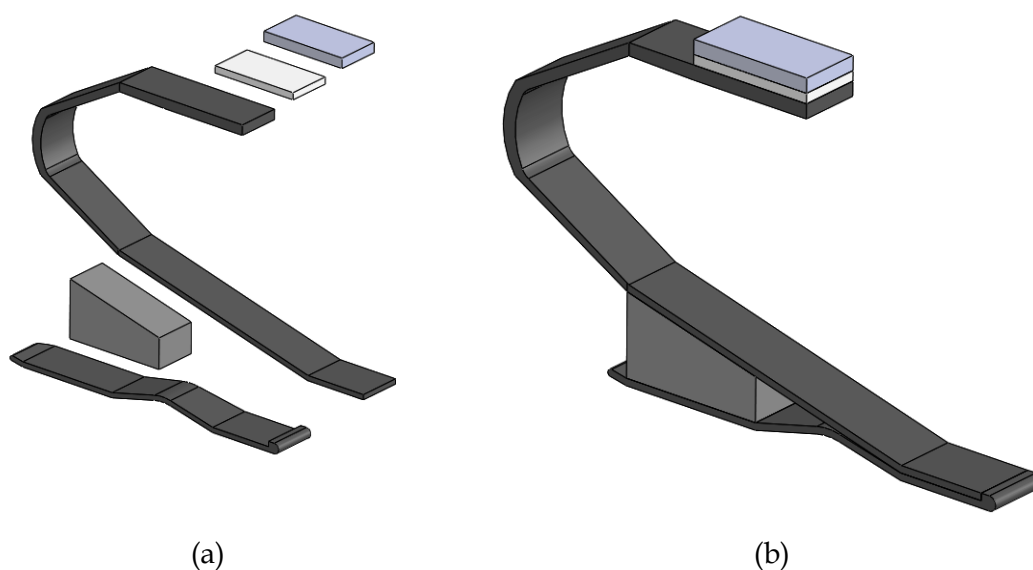


Fig.5.5. Rappfigurazione della vista esplosa (a) e dell'assieme (b) del modello CAD semplificato del piede protesico

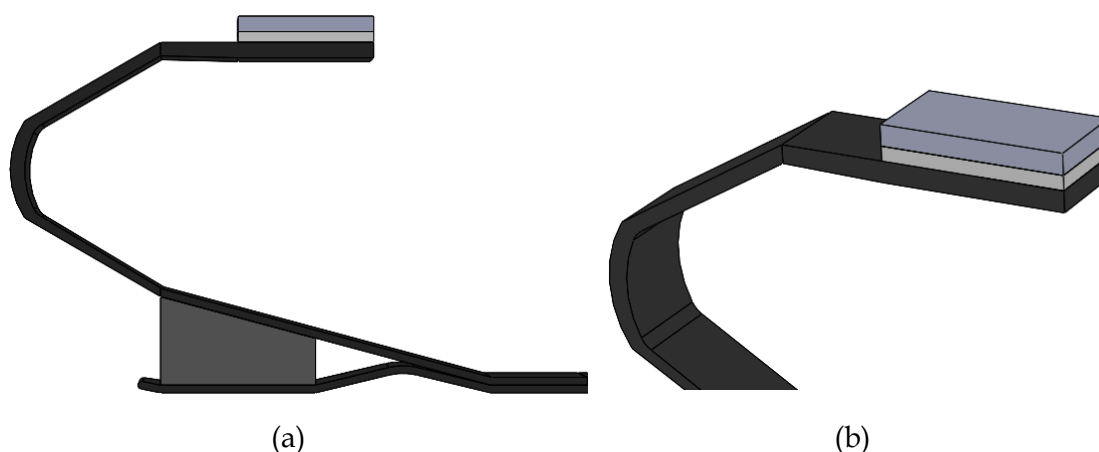


Fig. 5.6. Vista laterale dell'intera struttura (a) e zoom sulla parte superiore (b) del CAD della metà deò piede protesico semplificato

Sfruttando al massimo la simmetria lungo lo spessore di tutta la protesi, si sono ridotti notevolmente tempi di simulazione e memoria necessaria ai calcoli numerici. Essendo il modello, nel suo complesso, abbastanza pesante si è preferito

non andare ad appesantirne l'entità con smussi o forme curve, per quanto più belle esteticamente, per poter concentrare l'intera analisi sulla sola tenuta della giunzione metallo-composito. In questo particolare caso, il materiale metallico presente non è più costituito da Inconel, come per i provini stampiti in Renishaw, ma da alluminio, più largamente utilizzato per applicazioni di questo genere e decisamente più leggero dell'Inconel. Per quanto, invece, concerne il volume di giunzione si sono esaguiti i calcoli contando il modulo elastico dell'alluminio, ricavato dalle schede tecniche dell'azienda Renishaw riguardanti le polveri di tale materiale, e facendo riferimento alle punte metalliche che sono risultate migliori dall'ultimo confronto effettuato alla fine del Capitolo 4, ovvero quelle a forma di parallelepipedo. È importante, inoltre, precisare che per alleggerire i calcoli, sono state necessarie alcune semplificazioni, specie per i volumi non interessati alla giunzione: la suola, seppur di materiale composito in fibra di carbonio, è stata supposta isotropa con unico modulo elastico pari a quello nelle due direzioni principali del composito ortotropo equivalente; anche per il tacco si è simulato un volume isotropo. Per una maggiore comprensione, si inseriscono tutte le proprietà meccaniche usate per le simulazioni in tabella 5.2.

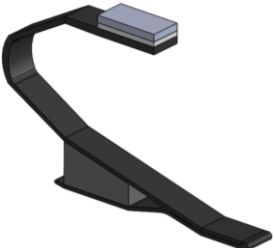
Materiale	Tipologia materiale	Modulo di Young [MPa]	Coefficiente di Poisson	
Suola	isotropo	$E = 37387$	0.3	
Tacco	isotropo	$E = 20000$	0.3	
Struttura curva	ortotropo	$E_x = E_y = 37387$ $E_z = 3000$ $G_{xy} = 14380$ $G_{xz} = G_{zy} = 1154$	0.3	
Giunzione alluminio-composito	ortotropo	$E_x = E_y = 45273$ $E_z = 4378$ $G_{xy} = 17413$ $G_{xz} = G_{zy} = 1684$	0.3	
Metallo (alluminio)	isotropo	$E = 80000$	0.3	

Fig. 5.2. Proprietà meccaniche dei materiali del piede protesico

5.3 Simulazioni numeriche del piede protesico

Una volta ricavato il file IGES del piede protesico, si passa alla creazione di un mesh diversificato per due motivazioni principali: la prima è quella di riservare alla zona di interesse all'analisi, ovvero quella che contiene la giunzione tra i materiali, gli elementi con dimensioni minori; il secondo motivo è dato dalla diminuzione dei tempi di calcolo necessari all'ottenimento dei risultati. Dopo una serie di tentativi, si giunge ad una combinazione ottimale: elementi solid 92 di dimensioni inferiori, con lato di 0.75, vengono utilizzati per la zona del giunto che comprende i volumi della componente metallica, della giunzione stessa e la zona di composito in fibra di carbonio interfacciata ad essa; i volumi restanti vengono simulati con la stessa tipologia di elemento ma con dimensione maggiore pari a 15 mm.

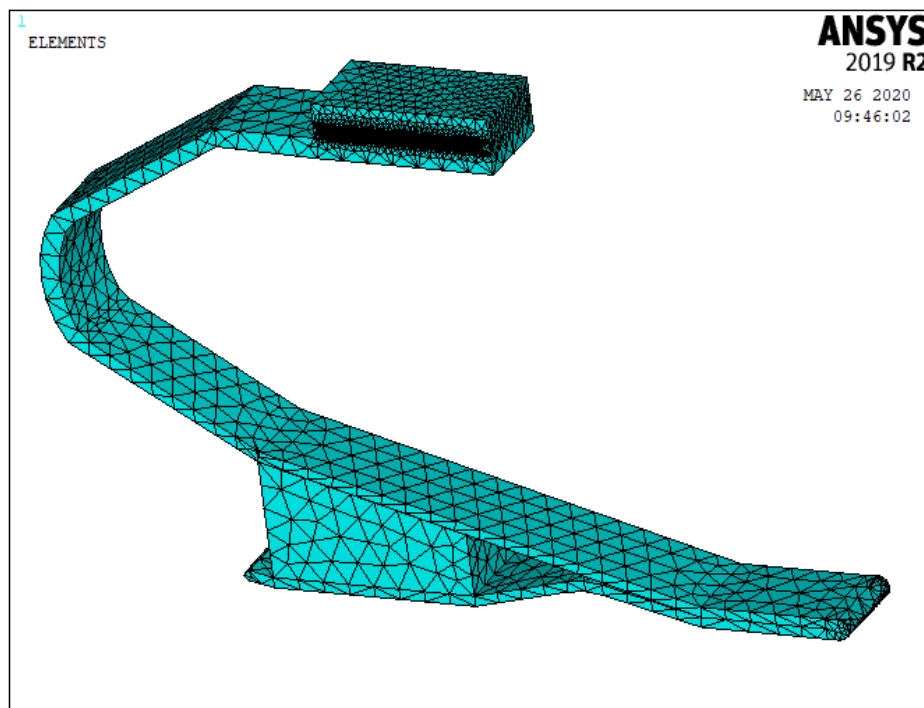


Fig. 5.7. Schermata su Ansys del mesh diversificato usato per il piede protesico

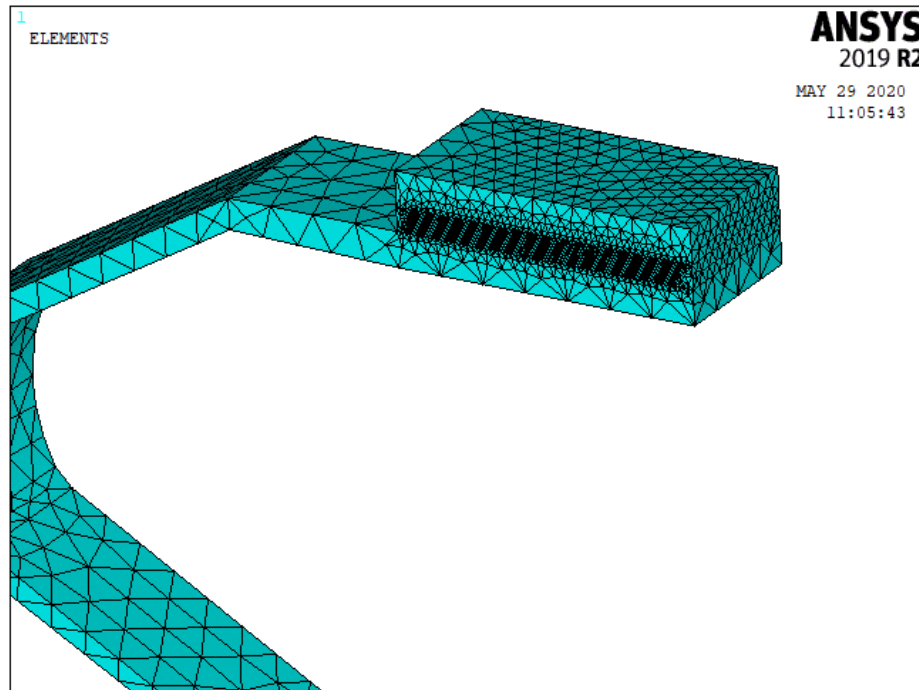


Fig. 5.8. Zoom su Ansys del mesh diversificato usato per il piede protesico

Lo scopo della modellazione numerica della protesi è quello di simulare alcuni particolari istanti, appartenenti al ciclo del passo del paziente. Per fare ciò si utilizzano carichi di diversa intensità ed inclinazione rispetto all'orizzontale, in modo da valutare a pieno la tenuta della giunzione alluminio- composito. Si parte da un carico perfettamente verticale, distribuito sulla superficie superiore del volume metallico, con un modulo derivante dall'intero peso corporeo di un paziente. Vengono distinti due casi differenti : il caso statico con il quale si vuole simulare un appoggio monopodale da fermo e quello dinamico in cui si aggiunge una componente di forza di inerzia pari al 50% del peso corporeo considerato. Supponendo una massa di 80 kg , in appoggio monopodale, vengono valutate forze inclinate di 0°, 30°, 45° e 60° per il caso dinamico, considerato come più critico e dunque valutato in tutte le sue varianti, mentre per il caso statico viene simulato solo il carico lungo la verticale.

Per quanto, invece, concerne il sistema di vincoli, è stata bloccata la traslazione lungo l'asse verticale z di tutti i nodi posti sulle parti piane della suola, così da simularne l'appoggio con il terreno; si aggiunge un blocco lungo l'asse y su tutta la superficie di divisione con la metà di modello non simulata, al fine di simularne la continuità; infine, sulla superficie laterale del tacco si è bloccata la traslazione lungo la direzione orizzontale. Per una maggiore completezza, si inserisce di seguito uno screen, realizzato su Ansys, del sistema di carichi e vincoli utilizzato per le successive simulazioni.

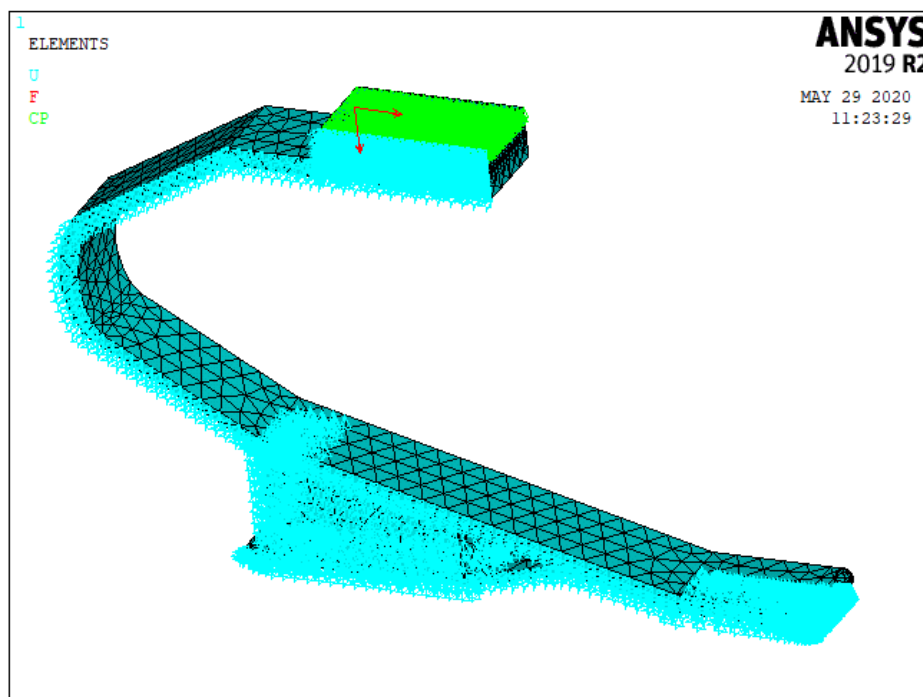


Fig. 5.9. Schermata su Ansys dei sistemi di carichi e vincoli utilizzati per il piede protesico

Per l'analisi del piede, vengono scelte delle grandezze di interesse che possano essere indicative della tenuta della giunzione: spostamenti lungo le due direzioni del carico, sforzo di taglio sul piano di interfaccia della giunzione e le tensioni di Von Mises. Come rappresentativo del carico verticale, si inseriscono le distribuzioni di tali grandezze relativamente al solo caso statico; la scelta deriva

dal fatto che per tale inclinazione le distribuzioni rimangono invariate dal caso statico a quello dinamico.

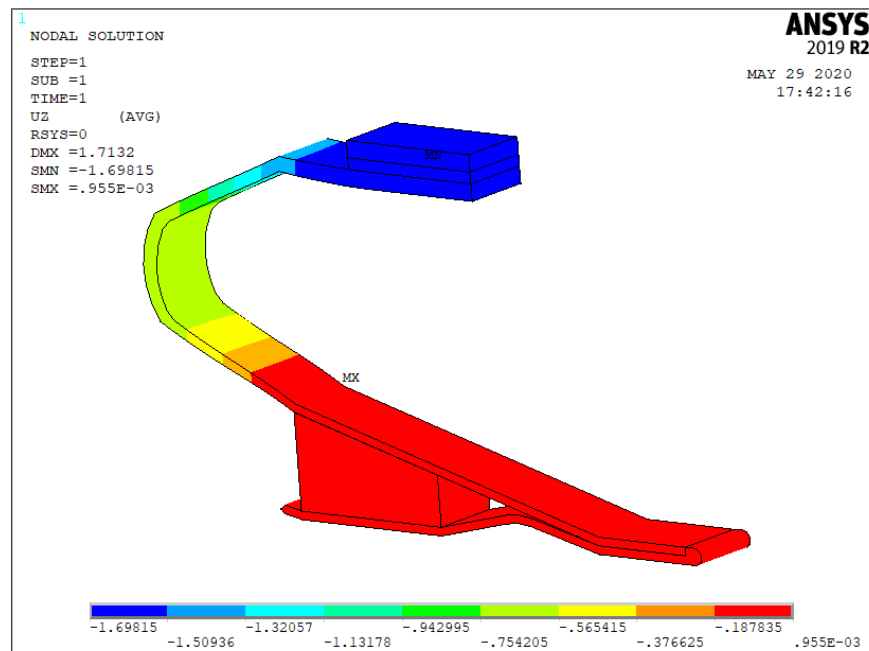


Fig. 5.10. Distribuzione degli spostamenti lungo Z del piede protesico con forza verticale statica

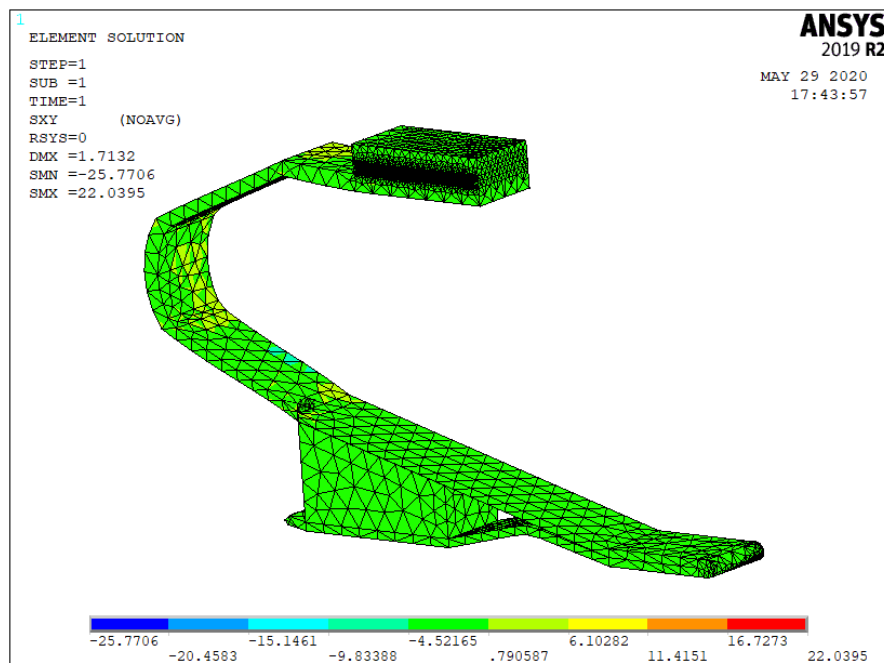


Fig. 5.11. Distribuzione dello sforzo di taglio sul piano XY del piede protesico con forza verticale statica

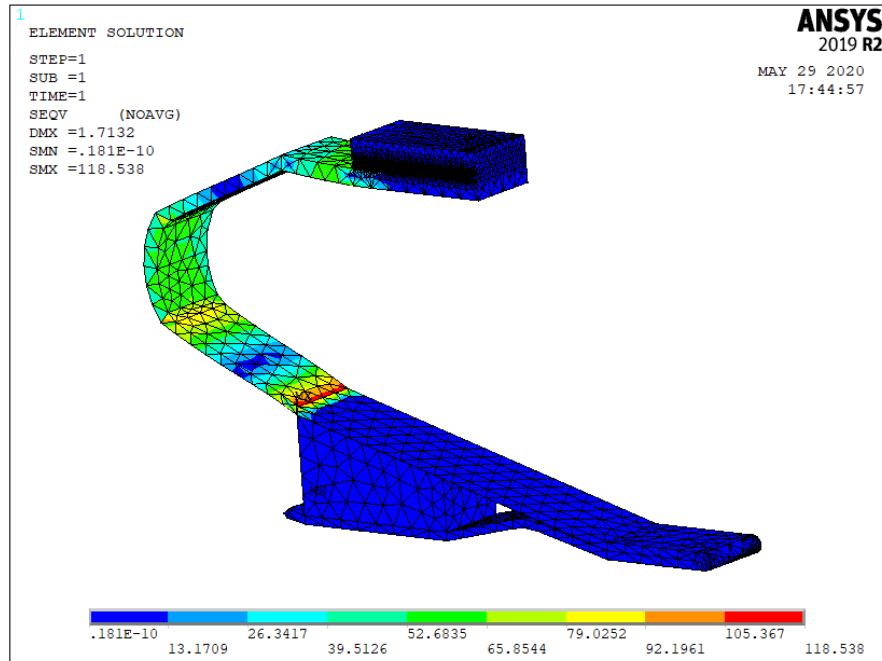


Fig. 5.12. Distribuzione delle tensioni di Von Mises del piede protesico con forza verticale statica

Per le altre inclinazioni, si decide di riportare gli andamenti relativi al caso con carico inclinato di 45° rispetto all'orizzontale poiché le distribuzioni non subiscono particolari variazioni passando da un caso all'altro.

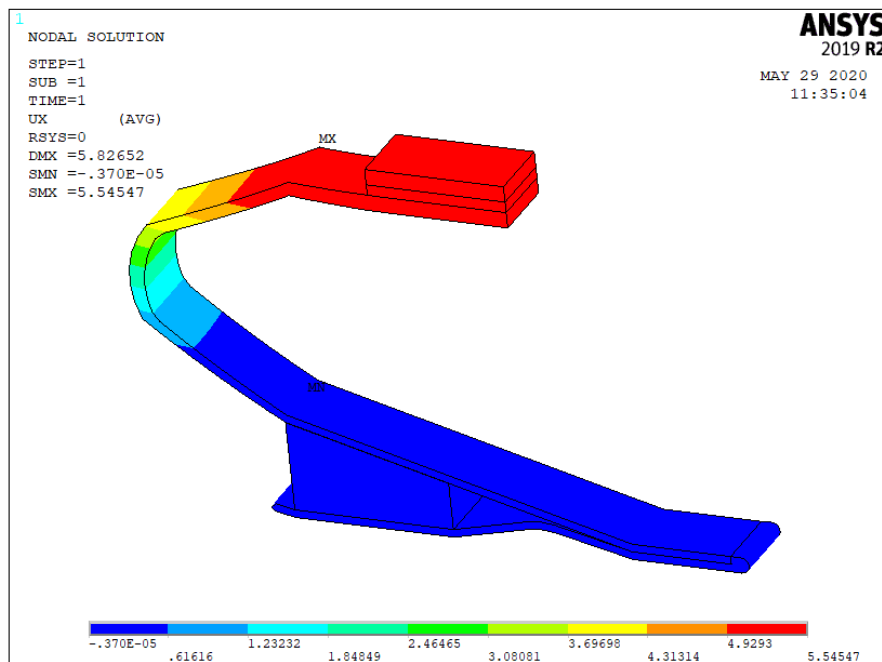


Fig. 5.13. Distribuzione degli spostamenti lungo X del piede protesico con forza inclinata di 45°

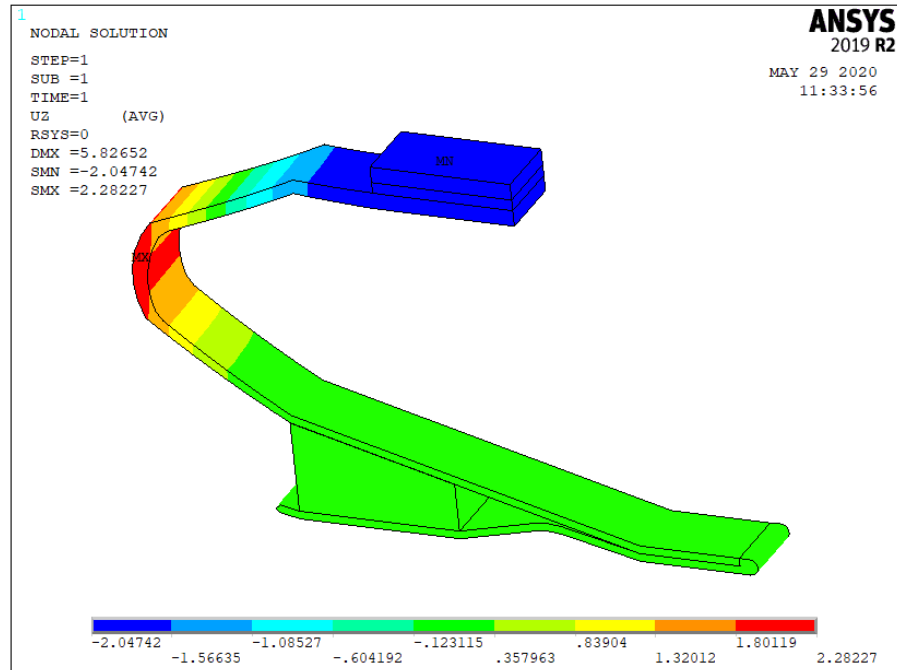


Fig. 5.14. Distribuzione degli spostamenti lungo Z del piede protesico con forza inclinata di 45°

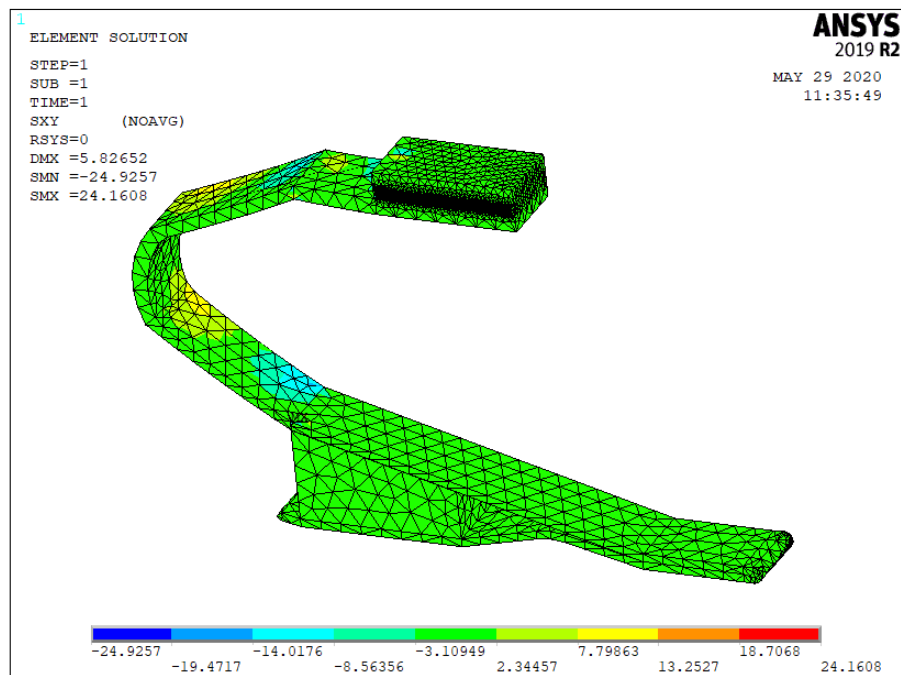


Fig. 5.15. Distribuzione dello sforzo di taglio sul piano XY del piede protesico con forza inclinata di 45°

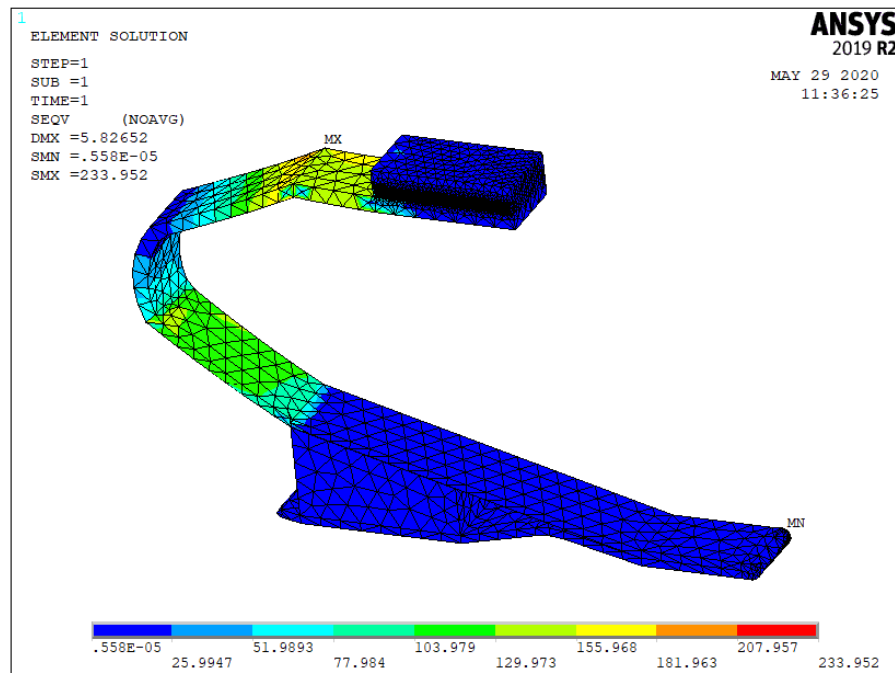


Fig. 5.16. Distribuzione delle tensioni di Von Mises del piede protesico con forza inclinata di 45°

Viene isolato il solo volume relativo alla giunzione così da osservare più attentamente i valori raggiunti e le distribuzioni delle grandezze in esame.

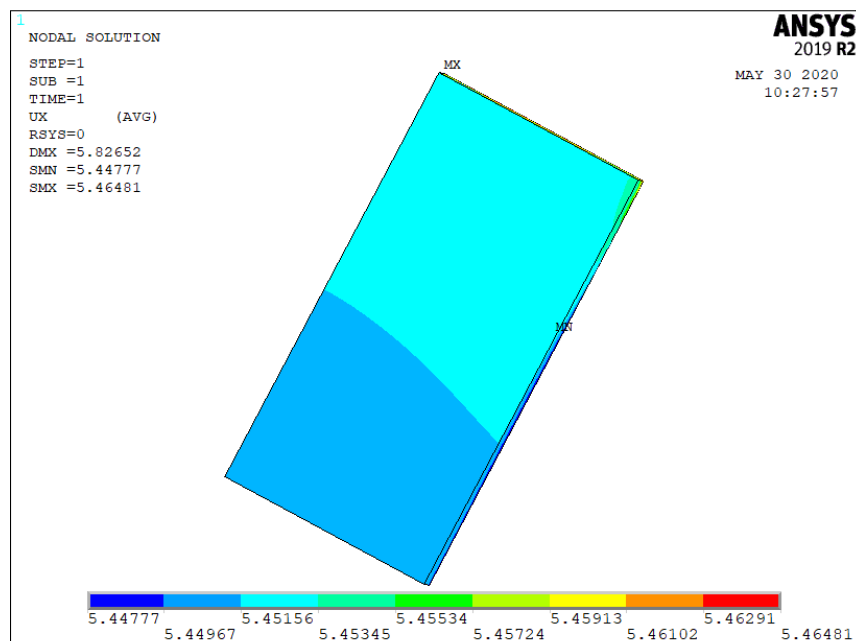


Fig. 5.17. Distribuzione degli spostamenti lungo X del volume di giunzione, superficie a contatto con il composito, dell'intero modello di piede protesico con forza inclinata di 45°

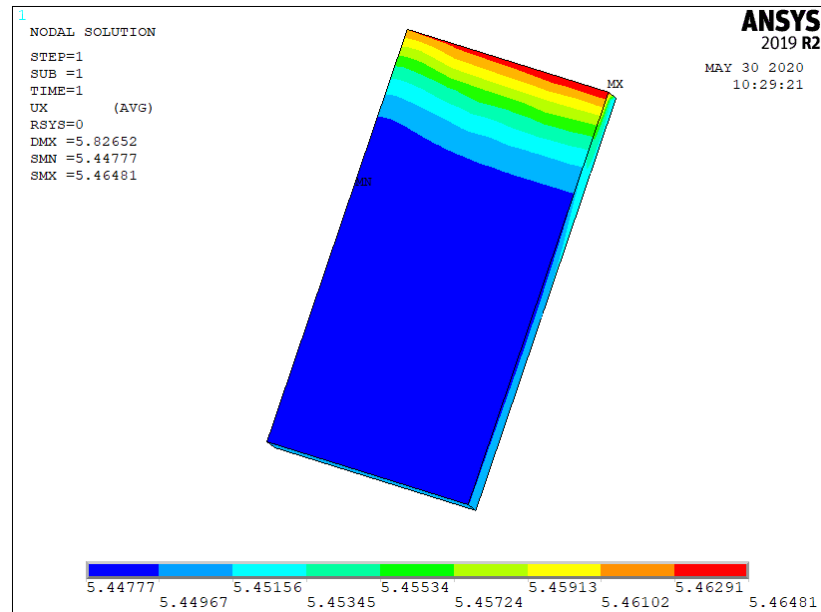


Fig. 5.18. Distribuzione degli spostamenti lungo X del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello di piede protesico con forza inclinata di 45°

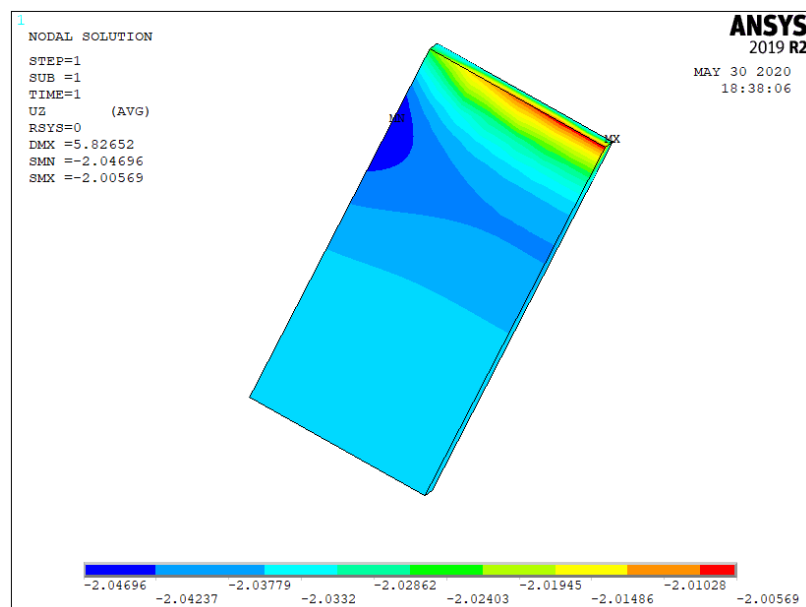


Fig. 5.19. Distribuzione degli spostamenti lungo Z del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello di piede protesico con forza inclinata di 45°

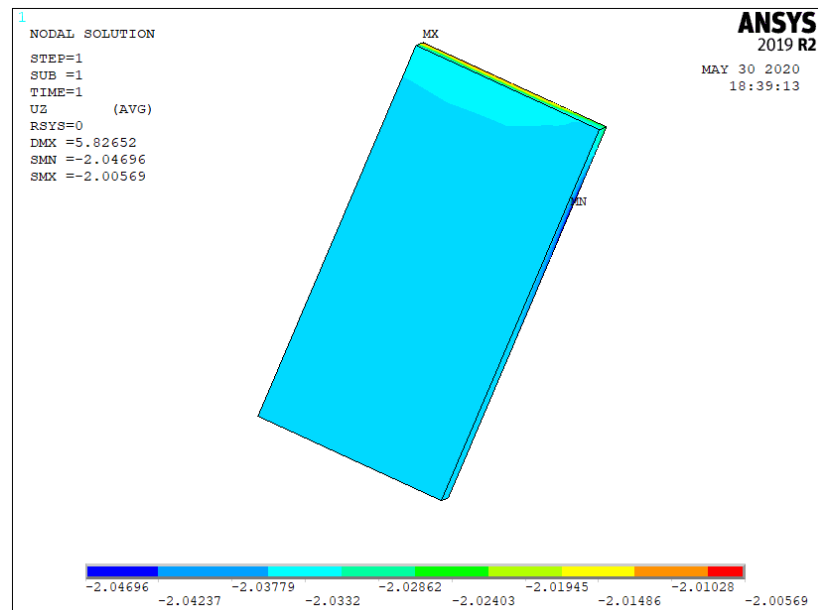


Fig. 5.20. Distribuzione degli spostamenti lungo Z del volume di giunzione, superficie a contatto con il composito, dell'intero modello di piede protesico con forza inclinata di 45°

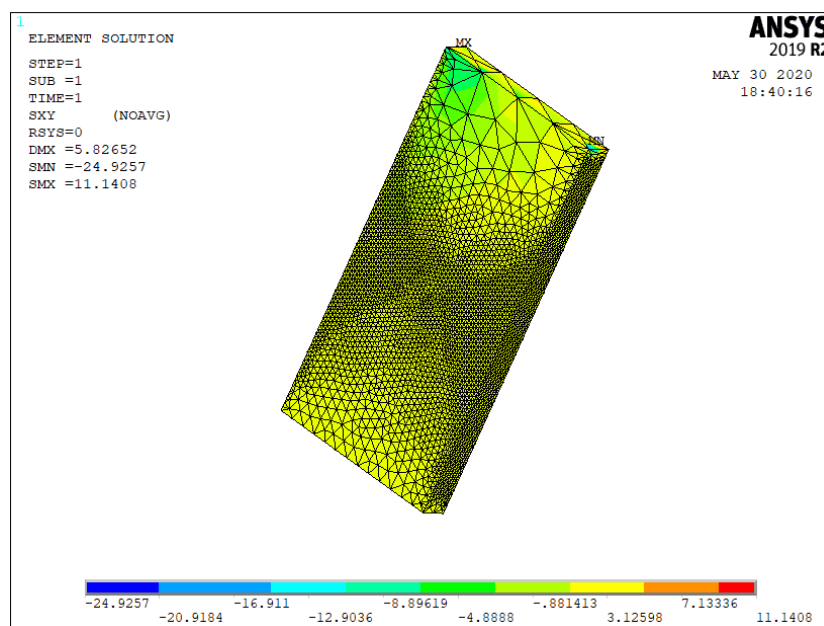


Fig. 5.21. Distribuzione dello sforzo di taglio sul piano XY del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello di piede protesico con forza inclinata di 45°

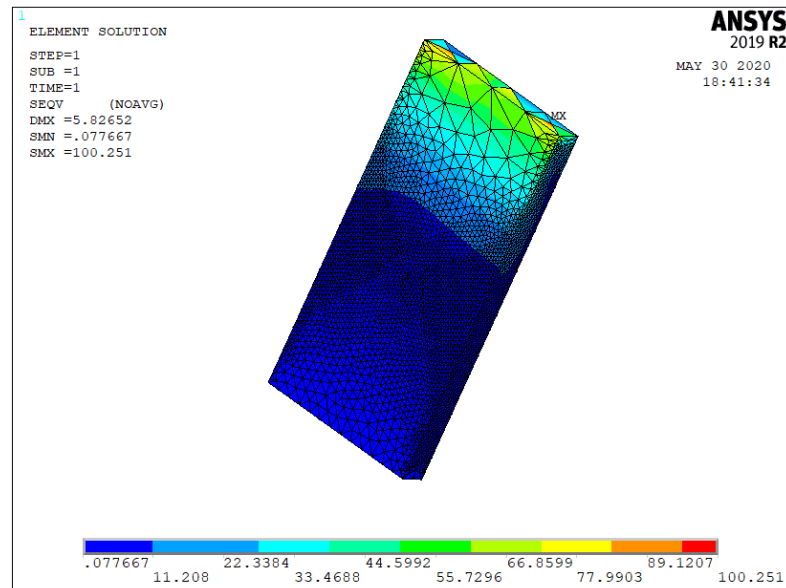


Fig. 5.22. Distribuzione delle tensioni di Von Mises del volume di giunzione, superficie a contatto con il metallo, dell'intero modello di piede protesico con forza inclinata di 45°

I risultati ottenuti in tutti gli altri casi simulati vengono riassunti in un'unica tabella, al fine di valutare gli effetti e la tenuta della giunzione durante le fasi del cammino.

Forza [N]	Inclinazione della Forza rispetto all'orizzontale [°]	Spostamento su X [mm]	Spostamento su Z [mm]	Sforzo di taglio su XY [MPa]	Tensioni di Von Mises [MPa]
$F_z=400$ (statico)	0	0.26	-1.70	-4.52	0
$F_z=600$ (dinamico)	0	0.56	-2.55	-6.78	0
$F_x=300$ $F_z=519$	30	3.62	-2.38	-3.43	19.45
$F_x=F_z=424$	45	5.55	-2.05	-3.11	25.99
$F_x=519$ $F_z=300$	60	6.64	-1.58	-9.055	27.67

Tab. 5.3. Valori delle grandezze di interesse registrati per le diverse inclinazioni della forza

Ponendo attenzione, in primo luogo, agli spostamenti subiti dal volume di giunzione nelle direzioni del carico a cui viene sottoposto, si può notare come, lungo l'asse X si registrano valori inferiori di 7 mm e, lungo l'asse Z, gli

spostamenti risultano ancora più contenuti, ponendosi al di sotto del 3 mm. Dati del genere sono assolutamente accettabili in una protesi di questo tipo, in quanto, in particolari casi, si possono avere piedi protesici sui quali vengono montati degli appositi fine corsa, che hanno lo scopo di bloccare la flessione del dispositivo, in determinati punti del cammino, al valore massimo di spostamento che possono tollerare; si tratta, per lo più, di fine corsa che bloccano gli spostamenti fino a 18 mm. A fronte di ciò, si può concludere che la giunzione, così come è stata realizzata in questo progetto di tesi, risulta valida e adatta ad un'applicazione simile, garantendo una buona tenuta tra metallo e materiale composito ed evitando, così, l'utilizzo di adesivi o di giunti rivettati.

5.4 Stampa della componente metallica con punte

Giunti a questo particolare punto della tesi, come stabilito in partenza, si dovrebbe procedere con la realizzazione della componente metallica con le punte a parallelepipedo in modo da inviarla all'azienda Renishaw e procedere con la relativa stampa 3D. Non avendo l'opportunità, in questo periodo, di stampare il pezzo metallico, si decide comunque di costruirne il CAD su Solidworks.

Il punto di partenza è la percentuale in volume di metallo che deve essere contenuta nel volume di giunzione del piede protesico. Facendo riferimento al 33% di volume di componente metallica rispetto all'intera giunzione, si procede con dei semplici calcoli finalizzati all'ottenimento del numero esatto di punte da inserire sulla superficie metallica e il volume di ogni singolo parallelepipedo.

Avendo come unica condizione da rispettare la percentuale in volume, è possibile variare, a propria discrezione, le dimensioni della singola punta a parallelepipedo così da ricavarne, poi, il numero totale da distribuire sulla superficie. Si sceglie, in

questo caso, di realizzare delle punte con base quadrata di 2 mm e altezza di 4 mm, come mostrato in Figura 5.23.

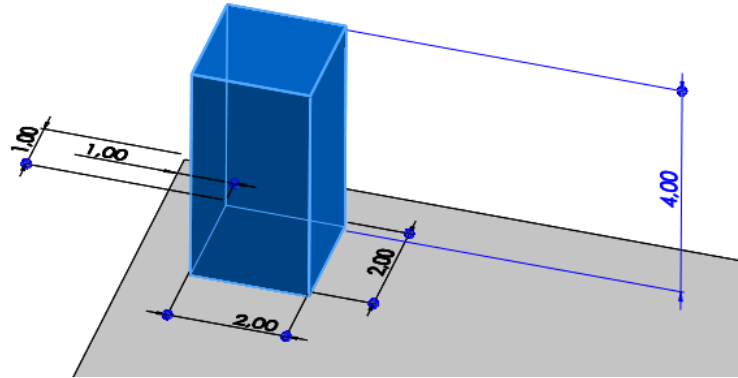


Fig. 5.23. Punta a parallelepipedo con relative dimensioni della componente metallica del piede protesico

Assunte queste dimensioni per la singola punta, si procede con i calcoli che verranno riportati qui di seguito:

$$\text{Volume singola punta} = V_{\text{punta}} = 2 \text{ mm} * 2 \text{ mm} * 4 \text{ mm} = 16 \text{ mm}^3$$

$$\text{Condizione da rispettare sui volumi: } V_{\text{totale punte}} = 0.33 * V_{\text{giunzione}}$$

$$V_{\text{giunzione}} = 29064 \text{ mm}^3$$

$$\text{si ricava che } V_{\text{totale punte}} = 9591 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{totale punte}} = N * V_{\text{punta}}$$

$$\text{si ricava che il numero totale di punte metalliche è } N = 599 \text{ punte}$$

Con le dimensioni scelte si ottiene un totale di 599 punte a parallelepipedo da distribuire sulla componente in alluminio, preferibilmente, in modo uniforme, così da agevolare l'inserimento a mano di fibre di carbonio lungo le due direzioni verticale e orizzontale. Il risultato di ciò viene mostrato in Figura 5.24.

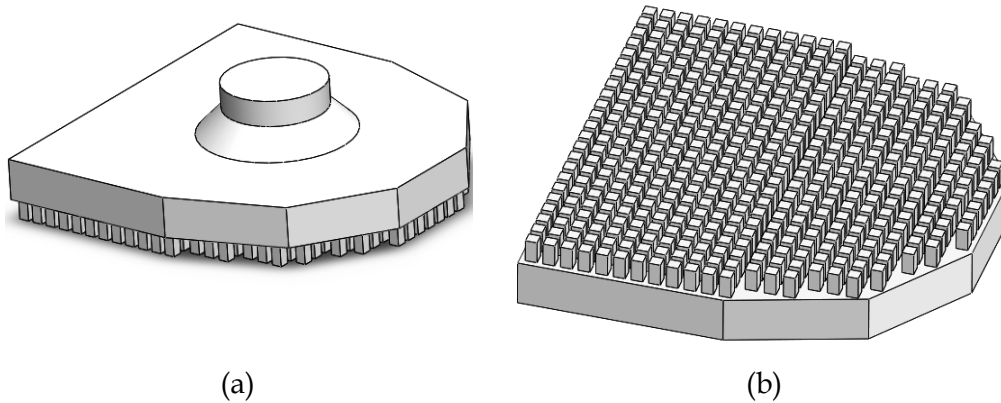


Fig. 5.24. Schermata della parte superiore (a) e di quella inferiore (b) della componente in alluminio con punte a parallelepipedo

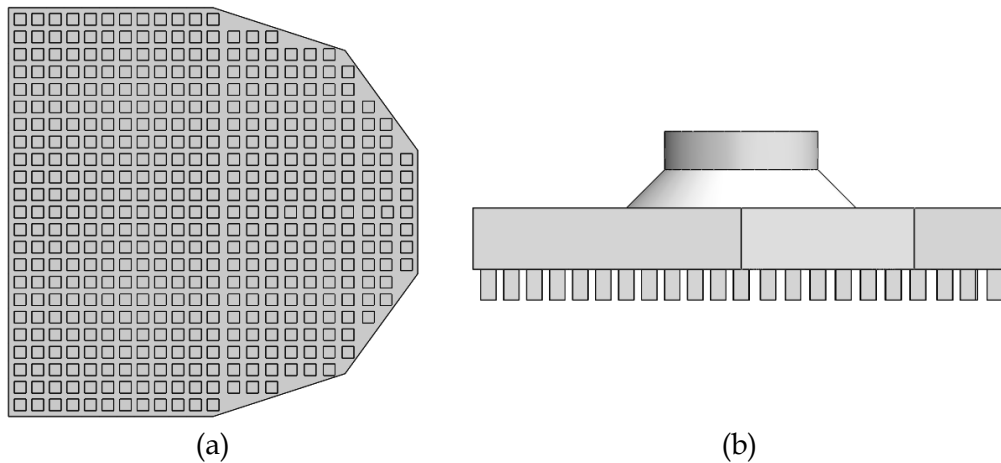


Fig. 5.25. Vista dall'alto (a) e vista laterale (b) della componente in alluminio con punte a parallelepipedo

Per quanto non sia stato possibile realizzarlo in additive, tale componente, anche dalla semplice osservazione del CAD, risulta decisamente più complesso del volume, a parallelepipedo, sfruttato per le simulazioni FEM su Ansys.

L'idea, dunque, di un volume di giunzione dato dalla percentuale in volume di punte metalliche fa sì che non siano necessari lavori alquanto complessi, quali la realizzazione del modello CAD, contenente 599 punte metalliche, e, in particolar modo, la modellazione numerica del relativo file IGES.

In conclusione, il vantaggio fondamentale di un modello, avente una giunzione caratterizzata da percentuali in volumi di metallo e di materiale composito, è

Progettazione e analisi dell'applicazione: piede protesico

quello di poter simulare la presenza e l'influenza delle punte metalliche sulla tenuta del giunto senza che sia necessaria la loro realizzazione geometrica.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata progettata un'innovativa tecnica di giunzione per materiali compositi in fibra di carbonio interfacciati con componenti metallici. A causa del suo largo impiego in ambiti non solo biomedici ma anche aeronautici e meccanici, la fibra di carbonio si trova spesso accoppiata con materiali di diversa natura e, nel caso specifico dei metalli, si adottano tecniche tradizionali di giunzione che prevedono l'uso di adesivi, rivetti o bulloni. Lo scopo è quello di porre rimedio ai limiti riscontrati nei giunti tradizionali migliorandone le prestazioni meccaniche. Ispirandosi alla tecnica *co-cured*, il materiale composito viene costruito direttamente sulla componente metallica, realizzata con processo additivo, provvista di punte metalliche, pensate per trattenere le fibre di carbonio e garantire una maggiore tenuta.

Conclusioni

Le prove sperimentali prevedono la trazione di provini in Inconel625, interfacciati con il materiale composito, costruito manualmente in laboratorio. Usando come riferimento i dati ricavati dalla macchina di trazione, sono stati caratterizzati dei modelli numerici al fine di simulare le prestazioni meccaniche di ogni giunzione. Apportando graduali correzioni, il modello finale, denominato *modello a tre volumi*, è in grado di simulare la tenuta tramite un volumetto, posto tra i due materiali protagonisti, che contiene una percentuale in volume di composito e un'altra di metallo. Un modello così fatto ha il grande vantaggio di essere semplice e di non appesantire eccessivamente il processo di calcolo numerico, grazie alla percentuale in volume di metallo, tipica di una particolare geometria, che simula la presenza e l'influenza delle punte metalliche sulla tenuta finale della giunzione. Le buone prestazioni registrate hanno reso possibile l'applicazione del giunto metallo-composito su un componente reale di grande utilizzo nel campo biomedico: il piede protesico. Le sue simulazioni numeriche, in condizioni statiche e dinamiche, delle diverse fasi del cammino hanno confermato l'efficacia della giunzione in quanto a tenuta a taglio dei due materiali.

A fronte dei risultati ottenuti, è importante precisare alcuni aspetti che hanno contribuito alla riuscita della giunzione: uno tra questi è la fabbricazione additiva, senza la quale, probabilmente, non sarebbe stata possibile la realizzazione punte metalliche di dimensioni così ridotte e di geometria anche piuttosto complessa, come nel caso della doppia piramide e della spirale.

Persino per le geometrie più semplici, i valori di carico di rottura, registrati in campo sperimentale, sono piuttosto elevati se si considerano tutti gli inconvenienti del processo di realizzazione del composito, partendo dalla lavorazione manuale fino alla scarsa ripetibilità di tale processo su un numero

Conclusioni

elevato di provini. Nonostante tutto, la tenuta risulta superiore rispetto alle normali prestazioni garantite dai giunti meccanici tradizionali.

Per quanto, invece, concerne l'aspetto della modellazione, si può concludere che il *modello a due volumi*, con composito ortotropo, si presta molto bene per simulazioni il cui l'obiettivo è lo studio di particolari geometrie di punte o, più in generale, dove il punto focale dell'analisi è la giunzione in tutti i suoi più particolari aspetti. Una volta definita la geometria più prestante, si può passare al *modello a tre volumi*, il quale, grazie alla semplificazione delle percentuali in volume, può essere inserito facilmente all'interno di pezzi complessi, che prevedono l'interfacciarsi di un generico metallo con un materiale composito in fibra di carbonio.

In entrambi i modelli numerici proposti, in realtà, è stato necessario l'assunzione di una serie di semplificazioni che non rispecchiano pienamente la complessità dei materiali in gioco; il reale meccanismo di interazione tra singola punta metallica e fibra di carbonio può essere, infatti, spiegato solo da un processo di omogenizzazione in cui si studiano, nel dettaglio, entrambi i componenti in tutti i loro aspetti più particolari.

Ripercorrendo ogni singolo passo di questo progetto, si può affermare che i risultati conferiti, oltre a essere soddisfacenti, rispecchiano a pieno gli obiettivi prefissati all'inizio del percorso. L'unica eccezione è la mancata possibilità di realizzare e testare in macchina l'altra faccia di punte contenuta in ognuno dei provini stampati in additive; si è potuto, dunque, lavorare solo sulla metà dei provini pensati inizialmente, i quali, però, sono risultati sufficienti all'ottenimento di risultati robusti e attendibili.

Conclusioni

Volendo continuare a studiare, in modo più approfondito, questa nuova tecnica di giunzione, si potrebbe valutare l'influenza della componente metallica nella tenuta, andando a cambiare tipologia di metallo, dai più dolci a quelli più tenaci; un'altra variabile potrebbe essere, inoltre, la presenza o meno di trattamenti termici sul metallo. Una giunzione così fatta, può essere pensata e applicata alle innovative *lattice structures*, le quali ottimizzano la rigidezza complessiva del pezzo rapportandola ad una massa minima.

Relativamente al composito, invece, si potrebbero apportare delle migliorie con un processo di realizzazione automatizzato, che alzerebbe sicuramente le prestazioni registrate in questo progetto, e, successivamente, sarebbe possibile valutare l'influenza di eventuali difetti a livello microscopico, con appositi dispositivi. Tutto ciò verrebbe effettuato senza tagliare eccessivamente il composito, lungo lo spessore del provino metallico, come è stato fatto qui, in modo da comprendere a pieno la differenza tra una geometria di punta e l'altra.

In merito all'applicazione, si può procedere con un'analisi di tipo dinamica e a fatica, essendo il piede protesico continuamente sollecitato durante le fasi del cammino.

I dati ricavati hanno confermato e, addirittura, superato l'idea di giunzione innovativa, così come era stata prefissata all'inizio del percorso, risultando non solo capace di ovviare alle limitazioni delle tecniche, oggi, utilizzate, ma anche prestante a livello meccanico per quanto riguarda la tenuta a taglio.

Bibliografia

- [1] L. C. e. A. Formisano, *I materiali compositi*.
- [2] F. P. DE Leo Corrado, *I Materiali Compositi*.
- [3] T. C. a. D.Hull, in *An Introduction to Composite Materials*, pp. 1-24.
- [4] «Wikipedia,» [Online]. Available:
https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_di_carbonio.
- [5] C. A. A. T. F. A. a. G. L.Fiorillo, «Endo and Exoskeleton:
New Technologies on Composite Materials,» 2020.
- [6] V. M. D. B. C. D. G. a. R. G. d. V. Veronica Rodriguez-Garcia,
«AUTOMATICALLY PROCESSED BIOINSPIRED HIERACHICAL
CARBON FIBER COMPOSITES,» July 2019.
- [7] «Il progettista industriale,» [Online]. Available: [https://
www.ilprogettistaindustriale.it/ladditive-manufacturing-tra-prototipi-
e-
produzione-di-
massa/#:~:text=Con%20l'espressione%20%E2%80%9Cadditive%20
manufacturing,truciolo%2C%20taglio%20e%20foratura\)..](https://www.ilprogettistaindustriale.it/ladditive-manufacturing-tra-prototipi-e-produzione-di-massa/#:~:text=Con%20l'espressione%20%E2%80%9Cadditive%20manufacturing,truciolo%2C%20taglio%20e%20foratura)..)
- [8] NANOCOAT, Materiali innovativi nella stampa 3D.
- [9] W. E. Frazier, «Metal Additive Manufacturing: A Review,» February
2014.
- [10] R. e. al., «Individualized lightweight structures for biomedical

- applications using additive manufacturing and carbon fiber patched composites,» pp. 1-24, 2019.
- [11] R. K. a. M. Biedermann, «Combining Additive Manufacturing and Carbon Fiber Patched Composites for Individualized and Sustainable Biomedical Applications,» june 2018.
- [12] M. Leary, «Laser Additive Manufacturing,» [Online]. Available: [https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/selectivelasermelting#:~:text=Selective%20Laser%20Melting%20\(SLM\)%20is%20a%20powder%20bed%20AM%20technology,beam%20on%20a%20powder%20bed.&text=The%20process%20is%20very%20similar,is%20performed%20un.](https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/selectivelasermelting#:~:text=Selective%20Laser%20Melting%20(SLM)%20is%20a%20powder%20bed%20AM%20technology,beam%20on%20a%20powder%20bed.&text=The%20process%20is%20very%20similar,is%20performed%20un.) [Consultato il giorno 2017].
- [13] D. M. e. al., «Direct Metal Laser Sintering: an additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural for robotic applications Memorie,» pp. 15-24, 1999.
- [14] F. C. A. A. G. M. M. L. a. S. B. F. Trevisan, «eISSN 2280-8000 REVIEW,» 2018.
- [15] L. G. M. M. Silvano Malavolti, «MIRA meccanica,» [Online]. Available: <https://www.mirameccanica.it/it/materiali/lavorazione-stampa-dmls-inconel-nichel/>.
- [16] G. N. E. R. Radomila Konecna, «Notch fatigue behavior of Inconel 718 produced by selective laser melting,» pp. 138-145, 2019.
- [17] A. D. D. S. G. Z. B. S. X. L. E. L. Defan Du, «Influence of build orientation on microstructure, mechanical and corrosion behavior of Inconel 718

- processed by selective laser melting,» *Materials Science and Engineering A*, pp. 469-480, 2019.
- [18] F. Litterio, *Adesivi reversibili hot-melt per applicazioni automotive*, Torino: Politecnico di Torino, 2018.
- [19] L. D. L. A. A. e. P. B. G. Sala, «TECNICHE DI GIUNZIONE CONTINUA DEI MATERIALI COMPOSITI: INCOLLAGGIO E SIGILLATURA,» in *TECNOLOGIE E MATERIALI AEROSPAZIALI - Ver. 01*, Milano, Politecnico di Milano, p. Capitolo 44.
- [20] D. S. D. T. B. Z. R. Paolotti, *ANALISI STATICA E A FATICA DI GIUNZIONI IBRIDE CO-CURED METALLO COMPOSITO A SEMPLICE E A DOPPIA SOVRAPPOSIZIONE*, Palermo: Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo.
- [21] [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/it/search-result/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ITA/How-to-Perform-a-Mesh-Convergence-Study.html>.
- [22] «Renishaw,» [Online]. Available: <https://www.renishaw.it/it/sistemi-per-la-produzione-additiva-in-metallo-stampa-3d-37011>.
- [23] A. Penna, *Training Renishaw*, Renishaw S.p.A. - Pianezza.
- [24] A. Somà, in *Fondamenti di meccanica strutturale*, Torino, Levrotto - Bella, pp. 165-185.
- [25] [Online]. Available: <https://www.marcodepisapia.com/come-rinforzare-una-trave-con-gli-frp/>.

Bibliografia

- [26] L. Cavallaro, *Studio numerico e sperimentale di piede protesico e valutazione degli effetti prodotti sulla deambulazione*, Torino, 2018.
- [27] [Online]. Available: www.amputech.it/piede.
- [28] J. V. Farina, *PROGETTO CONCETTUALE DI UN PIEDE*, 2012/2013.
- [29] Ottobock. [Online]. Available: www.ottobock.it.
- [30] [Online]. Available: <https://www.doveecomemicro.it/notizie/news/arti-artificiali>.
- [31] [Online]. Available: <https://www.ottobock.it/protesizzazioni/prodotti-dalla-a-alla-z/piede-challenger-1e95/>.
- [32] [Online]. Available: <https://www.ossur.it/soluzioni-protesi/prodotti/dynamic-solutions/talux>.
- [33] G. Petrucci, *Lezioni di Costruzione di Macchine*.

Ringraziamenti

Ringrazio il Professor Giorgio De Pasquale per averci affiancato, guidato e consigliato in tutti questi mesi; con la sua esperienza e professionalità ci ha aiutato a crescere, proiettandoci verso il mondo del lavoro.

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori, mamma e papà, senza i quali tutto questo non sarebbe stato possibile; il vostro sostegno, l'incoraggiamento e l'amore, in tutti questi anni, mi ha permesso di realizzare la mia aspirazione lavorativa con grande serenità e gioia. Ringrazio mia sorella, Lorena, per essere stata, da sempre, un modello da seguire. Grazie a voi, la famiglia migliore che potessi desiderare.

Ringrazio i miei punti fermi, Miriam e Giulia, per avermi fatto sentire a casa in ogni momento trascorso insieme.

A Sara, l'amica che ha condiviso con me gioie e preoccupazioni di questo lungo percorso, rendendolo unico e indimenticabile. Grazie per essere stata al mio fianco.

Ringrazio le mie amiche, Mariavittoria e Anna, che, con il loro affetto e sostegno, mi hanno insegnato che la vera amicizia vince qualsiasi distanza fisica.

Ringrazio le mie coinquiline, Donatella e Chiara, per avermi regalato una convivenza speciale, fatta di risate e complicità: non è così comune uscire dalla propria stanza e trovare un'amica pronta ad ascoltarti e sostenerti.

Ringrazio la persona che, con i gesti più semplici, mi ha sollevato da preoccupazioni, paure e incertezze, facendomi credere in me stessa anche quando non ne ero capace.

Grazie di cuore Luca.

Ringrazio le lunghe e avvolgenti braccia di Giulia, capaci di farmi sentire il suo affetto anche da lontano.

Ringrazio l'amico di sempre, Giuseppe, che con la sua filosofia di vita "comu veni si cunta" mi ha aiutata a superare grandi ostacoli in questo percorso.

Grazie a tutte le persone speciali, amici e parenti, per essermi stati accanto in ogni momento.

È a voi che dedico tutto.