

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e  
della Produzione

## Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione di giunzioni ibride Ti6Al4V-CFRP:  
influenza delle features superficiali ottenute  
mediante metodi di fabbricazione additiva**



### **Relatori**

Prof. Giorgio Chiandussi  
Ing. Andrea Tridello

### **Candidato**

Gioacchino La Rocca

Luglio 2021





**Politecnico  
di Torino**

## Abstract

La tesi proposta ha lo scopo di valutare le prestazioni meccaniche di giunzioni co-curate, realizzate mediante le tecniche di fabbricazione additiva, e di mostrare i vantaggi e svantaggi rispetto alle giunzioni adesive. Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la startup Carboni e Metalli, nata dall'idea innovativa di due aziende emiliane BeamIt e Bercella. Grazie al know-how delle due società leader nella produzione di componenti e prototipi aerospaziali ed automobilistici è stato possibile realizzare i provini metallici, sfruttando la tecnica Additive Manufacturing "Selective Laser Melting", e i provini in materiale CFRP (carbon fiber reinforced polymer), tramite la tecnologia dell'autoclave.

L'obiettivo di questa tesi è ottenere un giunto dalle massime prestazioni all'interfaccia tramite l'introduzione di features superficiali in corrispondenza dell'aderendo metallico, con duplice funzione: integrare all'interno delle strutture cellulari l'adesivo necessario a garantire la tenuta meccanica del giunto e compenetrare il materiale metallico all'interno del substrato in composito in modo da incrementarne le prestazioni.

Per il caso studio è stato considerato un unico materiale per la produzione dei provini metallici (una lega di titanio Ti-6Al-4V) e un unico materiale per il provino in materiale composito (GG200P). Questa scelta scaturisce dal fatto di voler fare un confronto tra due strategie di giunzione, tramite una valutazione delle prestazioni meccaniche all'interfaccia aderendo-adesivo, mantenendo quanto più costanti i materiali e le dimensioni dei provini utilizzati. Qualora si dovessero trovare dei risultati soddisfacenti sarà poi possibile effettuare una valutazione sul tipo di materiale che consenta di garantire le ipotesi progettuali per il campo applicativo di riferimento.

La prima parte della tesi mostra i vantaggi della giunzione incollata per mezzo di adesivo strutturale e l'efficacia dell'introduzione di strutture lattice e grip. Successivamente sono state proposte due soluzioni alternative per ottenere un giunto co-curato tramite l'ausilio di uno stampo, valutando gli step necessari alla realizzazione di un giunto ibrido, dalla co-laminazione all'estrazione del componente dallo stampo. La parte finale della tesi è incentrata sulla valutazione delle cause di cedimento e analisi, con macchina di trazione, della massima tensione tangenziale raggiunta da ogni lotto di provini.

Per la realizzazione dei modelli CAD dei provini e dello stampo necessario alla co-laminazione è stato utilizzato il software Solidworks mentre per la disposizione delle strutture lattice nell'aderendo metallico si è usufruito del software CREO Parametric. La messa in macchina dei provini in materiale metallico è stata effettuata con il software CAM "Magics". I risultati forniti in questa tesi sono stati ottenuti mediante macchine statiche di trazione e le cause di cedimento sono state catalogate in funzione delle normative ASTM in vigore.

## Sommario

Abstract.....	4
1. Introduzione.....	7
1.1 L'Additive Manufacturing.....	8
1.2 I Materiali per l'Additive: lega di titanio Ti-6Al-4V.....	11
1.3 I Materiali compositi.....	13
1.4 Tecnologie di produzione del CFRP: laminazione in autoclave.....	15
1.5 Applicazioni.....	17
2. Giunzioni ibride METALLO-CFRP.....	18
2.1 Giunzioni incollate.....	20
2.2 Giunzioni co-curate.....	21
2.3 Meccanismi di adesione.....	22
2.4 Configurazione dei giunti adesivi.....	24
2.5 Condizioni di carico.....	25
2.6 Sollecitazioni single lap joint.....	27
2.7 Valutazione delle cause di cedimento.....	29
3 Presentazione del caso studio: influenza dei parametri Additive sulla tenuta meccanica del giunto.....	31
3.1 Processo produttivo Selective laser Melting per la produzione degli aderendi metallici.....	33
3.2 TEST 1: valutazione dell'influenza dell'orientamento in macchina sulla rugosità superficiale.....	39
3.3 TEST 2: influenza di features superficiali " <i>LATTICE STRUCTURES</i> ".....	45
3.4 TEST 3: influenza di features superficiali " <i>GRIP STRUCTURES</i> ".....	48
4 Giunzione co-curata: laminazione in autoclave.....	54
4.1 Progettazione dello stampo e attrezzatura ausiliaria.....	54
4.2 Laminazione.....	61
4.3 Creazione del sacco a vuoto.....	62
4.4 Variazione dell'attrezzatura e orientamento componenti.....	64
5. Analisi quasi statiche con macchina di trazione e valutazione delle cause di cedimento.....	67
5.1 Test 1: 45° Down-Skin.....	68
5.2 Test 1: 45° Up-Skin.....	70
5.3 Test 1: 90°.....	72

5.4	Test 2: Giunzioni incollate per mezzo di strutture <i>lattice</i> .....	74
□	Struttura lattice cubica a facce centrate “CFC1” .....	74
□	Struttura lattice cubica a facce centrate “CFC2” .....	77
□	Struttura lattice cubica a facce centrate “CFC3” .....	79
□	Struttura lattice ottagonale “Ottag” .....	81
□	Struttura lattice “STAR” .....	83
5.5	Test 3: Giunzioni incollate per mezzo di strutture <i>grip</i> .....	85
□	Struttura grip “dente” .....	85
□	Struttura grip “pin” .....	87
□	Struttura grip “Piramide” .....	89
□	Struttura grip “Cono” .....	91
□	Struttura grip “Cono 45°” .....	93
5.6	Test 4: Giunzioni co-curate .....	95
6	Conclusioni e sviluppi futuri .....	98
	Bibliografia .....	100
	Ringraziamenti .....	101

# 1. Introduzione

Gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da innovazioni tecnologiche nel campo aerospaziale, automobilistico e navale che hanno portato alla luce componenti sempre più performanti sia dal punto di vista strutturale che energetico. Lo sviluppo delle tecniche di fabbricazione additiva ha rappresentato per il settore produttivo metallico un punto di partenza per l'alleggerimento di aerei, auto da corsa e sonde spaziali oltre che per la riduzione di combustibile e la realizzazione di forme complesse. Pertanto, con questo elaborato si vogliono analizzare i vantaggi che possono scaturire dall'integrazione della tecnologia additiva con il mondo dei materiali compositi.

L'obiettivo di questa tesi è trovare una nuova strategia di giunzione che leghi insieme due materiali come il metallo ed il *CFRP* (carbon fiber reinforced polymer), realizzati rispettivamente con la tecnica *Selective laser Melting* e della laminazione in autoclave, con lo scopo di ottenere i seguenti benefici:

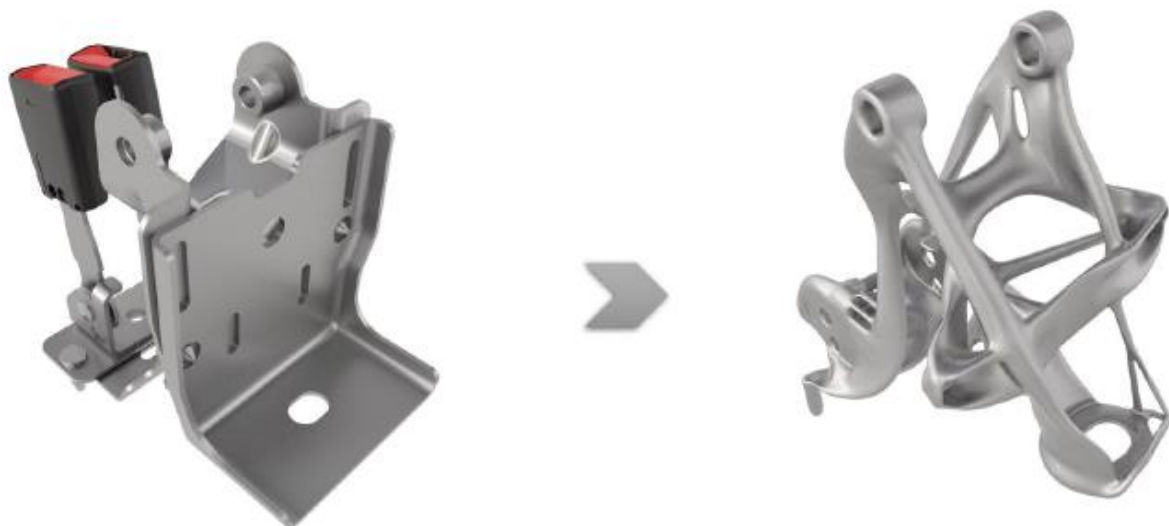
- Eliminazione di componenti aggiuntivi;
- Produzione simultanea dei componenti;
- Facile realizzazione;
- Migliori prestazioni meccaniche.

Per ottenere questi vantaggi si è deciso di sfruttare a pieno le potenzialità della fabbricazione additiva per quanto riguarda l'introduzione di features superficiali in corrispondenza dell'aderendo metallico. Infatti, l'*Additive Manufacturing* risulta, ad oggi, l'unico strumento produttivo per la realizzazione di strutture cellulari di dimensioni inferiori al millimetro che, oltre a garantire una maggior permeazione dell'adesivo all'interno della stessa potrebbe integrarsi all'interno del substrato in composito, incrementando le prestazioni all'interfaccia.

Nei prossimi paragrafi vengono attenzionate più nello specifico le tecniche di fabbricazione additiva, di cui l'azienda Beamit S.p.A. ha gettato le basi per il settore additivo in campo energetico e automotive, e la tecnologia dell'autoclave, sfruttata da Bercella S.r.l. per la realizzazione di scocche di formula 2 e sonde spaziali, per la realizzazione di un giunto ibrido metallo-*CFRP*.

## 1.1 L'Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing è una tecnologia innovativa che permette di realizzare, in tempi relativamente ridotti e senza l'uso di ulteriori utensili, prototipi e componenti in materiale definitivo con geometria più o meno complessa, capaci di integrare più funzioni, riducendo notevolmente i limiti tecnologici insiti nelle tecniche convenzionali. Il primo brevetto, che sfrutta i fondamenti di questa nuova tecnologia, venne depositato nel 1984 con la SLA "stereolitografia", con cui fu possibile realizzare prototipi in materiale polimerico. In seguito ad una profonda evoluzione dell'Additive Manufacturing, dal 2000 in poi la tecnologia additiva divenne una realtà commerciale con cui realizzare componenti finali in materiale polimerico o metallico. Tramite l'utilizzo di tale tecnologia è possibile attuare una messa a punto delle proprietà meccaniche del componente oltre che realizzare strutture molto più articolate capaci di soddisfare i requisiti minimi progettuali e permettendo al contempo una riduzione percentuale della massa. I benefici che ne derivano sono notevoli e applicabili ai più svariati settori, come quello aerospaziale e automotive (la riduzione in peso del componente, qualora questo riesca a garantire le ipotesi progettuali, porterebbe ad un notevole risparmio in termini di portata massica di combustibile necessario a movimentare una struttura alleggerita) nonché quello medicale (una delle principali applicazioni è relativa all'utilizzo di protesi). L'utilizzo delle tecniche di fabbricazione additiva ha sicuramente apportato dei miglioramenti dal punto di vista della "libertà di progettazione", rendendo possibile la realizzazione di strutture totalmente innovative come quelle che andremo ad analizzare nel dettaglio: si tratta di strutture cellulari, più comunemente chiamate "strutture lattice". Di seguito viene riportato un esempio di componente ottimizzato topologicamente, alleggerito del 40% in peso e con riduzione del numero di componenti da 8 a 1.



*Fig 1.1 Riduzione di numero parti in sistemi complessi (integrazione di più funzioni) [1]*

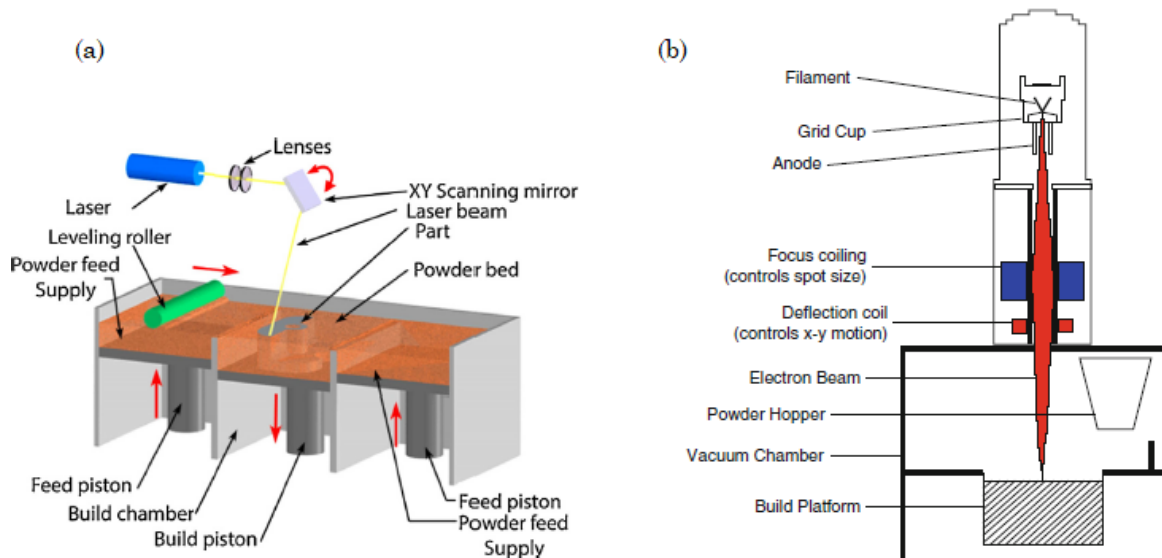
Sicuramente le proprietà meccaniche delle strutture lattice, utilizzate in questo lavoro di tesi, sono influenzate dal processo produttivo che verrà utilizzato e dai parametri di processo ad esso associati. Per la produzione "Additive" di componenti in metallo è necessario analizzare nel dettaglio le tecnologie "powder bed fusion" come



SLM ed EBM per poter valutare quale tra le due possa essere la più indicata per massimizzare le prestazioni meccaniche del componente in termini di accuratezza dimensionale e rugosità superficiale. Le differenze principali tra i due processi sono da imputare a diversi fattori come:

- Sorgente energetica: flusso di fotoni nel caso di tecnologia SLM e fascio elettronico nel caso EBM.
- Condizioni operative: per quanto riguarda l'EBM è necessario che gli elettroni non interferiscano con altri gas all'interno della camera, allora sarà necessario mantenere i gas residui all'interno del cannone elettronico alla pressione di  $10^{-5} Pa$  ed all'interno della camera di lavoro a  $10^{-3} Pa$ ; tutto ciò non è necessario per la tecnologia SLM.
- Temperatura di lavoro: è necessario mantenere le temperature della camera di lavoro più alte possibili per ridurre al minimo lo shock termico che potrà causare un incremento del tensionamento residuo del componente durante il processo fusorio. Per tale motivo viene preriscaldato la piattaforma di lavoro fino a temperature di 250-300 °C nel caso di SLM mentre è addirittura possibile innalzare la temperatura della camera di lavoro fino a 800°C nei processi EBM diminuendo la potenza del cannone elettronico ed aumentando la velocità scansione.
- Potenza della sorgente: con la tecnica EBM si possono raggiungere potenze più elevate rispetto al SLM: ciò significa che nel caso di EBM il fascio elettronico avrà una profondità di penetrazione maggiore rispetto al caso SLM.
- Finitura superficiale: il componente realizzato mediante le due tecniche powder bed fusion presenta una "impronta" molto più accentuata rispetto ad un processo di lavorazione sottrattivo (i valori di riferimento in termini di rugosità superficiale sono di  $R_a = 5 \div 18 \mu m$  per SLM e di  $R_a = 10 \div 30 \mu m$  per EBM).
- Ossidazione: tale fenomeno non si presenta nell'EBM grazie alla presenza del sottovuoto spinto mentre è da non trascurare nel caso dei processi SLM (si cerca di limitarne l'effetto mediante l'insufflaggio di gas come azoto o argon all'interno della camera di lavoro).
- Controllo della traiettoria: la presenza delle lenti elettromagnetiche nel caso di EBM permette di ottenere un miglior controllo della traiettoria grazie alla possibilità di poter deviare il fascio e poterlo focalizzare fino ad un diametro di 0.1 mm. [1]

Entrambi i processi produttivi sono particolarmente complessi a causa dei notevoli parametri di processo che li caratterizzano ed è proprio per tale motivo che risulta difficile trovare un compromesso tra tutti i fenomeni. Le modalità con cui si procede per ottimizzare il processo si basa molto sull'esperienza dell'operatore, in funzione dei dati e dei jobs precedentemente valutati: il procedimento è noto col nome "try and error" mediante cui vengono effettuati svariati tentativi prendendo in considerazione un set di parametri i cui valori verranno di volta in volta aggiornati al fine di ottenere un risultato migliore. Di seguito sono riportate due schematizzazioni dei processi tecnologici sopra descritti, che permettono di visualizzare le differenze tecnologiche che contraddistinguono le due tecnologie "powder bed fusion".



**Fig.1.1.1** Schematizzazione dei processi powder bed fusion SLM (Selective laser melting) [2] ed EBM (electron beam melting) [3]

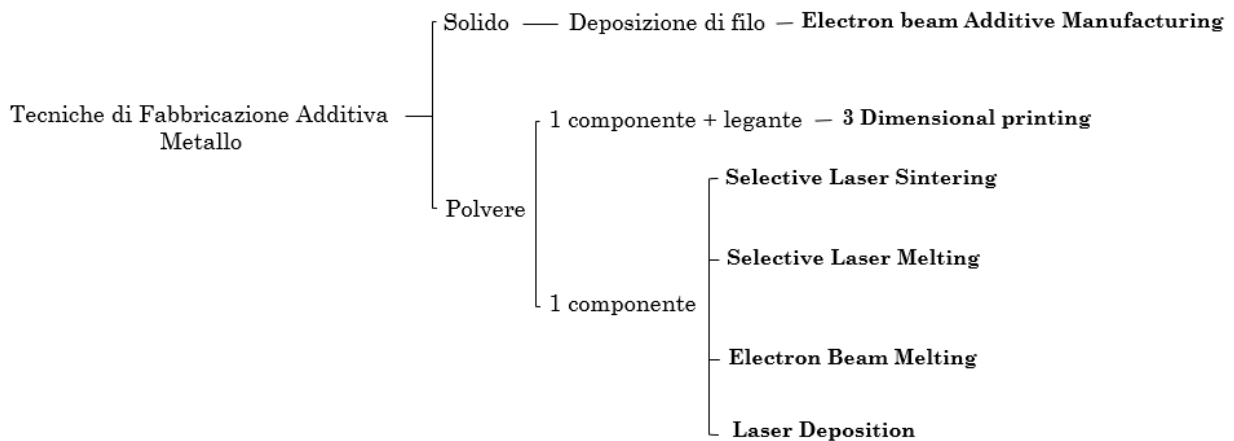
Entrambe le tecnologie possiedono dei sistemi che permettono di effettuare un controllo di qualità in tempo reale del prototipo. In questo modo è possibile misurare gli attributi del processo AM istantaneamente o quasi e identificare le variazioni del processo prima della formazione dei difetti. Entrando più nel dettaglio, per quanto riguarda i sistemi Electron beam melting, Arcam possiede dei sistemi “LayerQam”, in grado di monitorare la porosità dello strato depositato, e “xQam” che permette una calibrazione automatica del fascio elettronico. Anche nel caso di sistemi SLM è possibile valutare i parametri di processo durante il “job”: ad esempio, Renishaw possiede dei sistemi “LaserView” che consentono di misurare l’intensità dell’energia laser attraverso l’utilizzo di un diodo fotosensibile e “Meltview” che rappresenta un modulo opto-meccanico in linea in grado di catturare le emissioni della pozza di fusione nelle bande spettrali nel vicino infrarosso.

Uno dei problemi tipici dei processi “PBF” consiste nella evacuazione della polvere in eccesso e nella rimozione dei supporti dopo aver estratto il job dalla macchina. Tale procedura può diventare ancora più complessa nel caso di realizzazione di strutture lattice. Infatti, quando si ha a che fare con unità cellulari dell’ordine del millimetro, se la procedura di estrazione della polvere intrappolata non è eseguita nel modo corretto, il componente finale non presenterebbe più i vantaggi sperati in termini di riduzione in peso. Per quanto riguarda invece la rimozione dei supporti, è necessario l’utilizzo di una tecnologia che fa uso della capacità erosiva delle scariche elettriche per ottenere una miglior qualità superficiale: si tratta dell’elettroerosione a filo.

## 1.2 I Materiali per l'Additive: lega di titanio Ti-6Al-4V

Le tecniche di fabbricazione additiva, per la produzione di componenti metallici, prevedono come materiale di partenza solidi o polveri, che possono consistere in polveri di un singolo componente, polveri prealligate di una lega metallica o in una miscela di polveri con diversi punti di fusione. Il processo tramite cui si ottengono i materiali sotto forma di polvere è l'atomizzazione e i sistemi ad oggi utilizzati sono: gas atomization, water atomization, plasma e centrifuga. Tali processi sono particolarmente costosi, tanto che 1 kg di polvere di un determinato materiale risulta dieci volte più costoso del corrispettivo materiale allo stato solido, dovuto al fatto che le tecniche utilizzate non sono ancora consolidate.

Di seguito vengono riportate le tecnologie di fabbricazione additiva in funzione del materiale di approvvigionamento [1].



I materiali maggiormente utilizzati in Additive Manufacturing sono i seguenti:

- **AlSi10Mg** è una delle leghe più utilizzate perché caratterizzata da un'elevata resistenza alla corrosione, bassa densità e buone proprietà di fusione rispetto ad altre leghe. Nella fabbricazione additiva viene particolarmente utilizzata per la realizzazione di componenti con pareti sottili e geometrie complesse in quanto ha buona colabilità, saldabilità e resistenza statica e dinamica.
- **Hastelloy X, In625 ed In718** sono superleghe base Nichel che vengono utilizzate soprattutto per applicazioni aerospaziali in cui vengono richieste elevate temperature, superiori a 700 °C. Ad esempio, uno dei principali campi applicativi dell'Inconel625 è la paletta di turbina di impianti di turbina a gas di aeromobili oppure valvole di impianti energetici nel settore petrolchimico, in quanto presenta elevata resistenza alla corrosione.
- **Acciaio inox: 17-4 / 15-5**, sono acciai martensitici che forniscono al componente elevata resistenza, buone proprietà meccaniche per temperature inferiori ai 320°C e buona resistenza alla corrosione. La composizione chimica

dei due materiali è simile, entrambe presentano elevata percentuale di Cromo (circa il 15%) e bassa percentuale di Carbonio; tuttavia, la dimensione granulometrica del 17-4 è di 40  $\mu\text{m}$ , mentre quella del 15-5 è superiore o uguale a 63  $\mu\text{m}$ .

- **Lega di Titanio Ti-6Al-4V:** è uno dei materiali più consolidati nell'additive manufacturing, con la più alta resistenza specifica e che quindi consente di ottenere la maggior riduzione in massa nel caso di ottimizzazione topologica. Si tratta della lega più utilizzata nel settore aerospaziale, automobilistico e medicale, in quanto essendo un materiale "Nichel free" risulta biocompatibile con il nostro organismo. La lega Ti-6Al-4V presenta grani alfa e beta in quantità variabile (dipendente dalla velocità di raffreddamento del componente) che garantisce al componente elevate performance meccaniche ed elevata resistenza ad alte temperature. Questo materiale è stato preso in considerazione per le prove sperimentali portate avanti in questo lavoro di tesi e risulta uno dei più utilizzati dall'azienda BeamIt per la realizzazione di componenti per l'aerospace. In figura 1.2. viene riportato il *data sheet* del materiale di riferimento con le proprietà meccaniche lungo le tre direzioni x, y e z in seguito a trattamento termico di ricottura.

Tensile properties at room temperature	As Built		AMS2801 Annealed
	Z	XY	Z
	Mean $\pm$ std. Dev.	Mean $\pm$ std. Dev.	Mean $\pm$ std. Dev.
UTS [MPa]	1143 $\pm$ 35	1087 $\pm$ 120	1165 $\pm$ 35
Yield Strenght [MPa]	1071 $\pm$ 35	1004 $\pm$ 115	1093 $\pm$ 30
Elongation at break [%]	15 $\pm$ 5	15 $\pm$ 5	13 $\pm$ 5
Young's Modulus [GPa]	107 $\pm$ 15	105 $\pm$ 10	- $\pm$ -

**Fig. 1.2.** data sheet lega di titanio Ti6Al4V (titanium grade5) [4]

## 1.3 I Materiali compositi

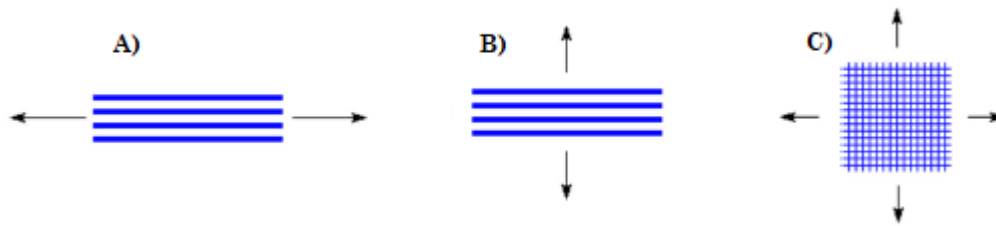
I materiali compositi sono costituiti da una matrice e da un rinforzante, separati da un'interfaccia netta, e presentano proprietà termomeccaniche superiori ai materiali monolitici. I compositi tecnologici di maggiore interesse per applicazioni funzionali e strutturali sono caratterizzati da:

- Polimero termoidurente + fibre di vetro, di Carbonio, di Kevlar.
- Lega leggera + particelle ceramiche (o fibre metalliche)
- Ceramico + particelle metalliche.

Tali materiali risultano svantaggiosi dal punto di vista economico, in quanto il costo di produzione delle fibre è molto alto, e dal punto di vista del riciclo, dovuto alla difficoltà di separare le due fasi. Tuttavia, presentano delle proprietà tali da essere utilizzate per applicazioni ad elevate prestazioni: buone proprietà meccaniche, migliore resistenza al creep, elevata resistenza specifica (carico di rottura/densità), affidabilità. L'interazione tra matrice e rinforzante dipende dal tipo di interfaccia e dai seguenti parametri: *bagnabilità*, che indica il grado di dispersione del liquido (rappresentante la matrice) sul solido (rappresentante la fibra) ed è auspicabile un valore elevato; *reattività*, che dovrà essere bassa o addirittura nulla per evitare la formazione di una terza fase; *continuità* elevata per ottenere un corretto trasferimento di carico dalla matrice al rinforzante.

I compositi trattati in questo lavoro di tesi sono costituiti da una matrice polimerica e un rinforzante in forma di fibre. Per quanto riguarda le matrici polimeriche, queste si distinguono in matrici termoidurenti, caratterizzate da una struttura reticolata dove i legami sono di natura covalente, e matrici termoplastiche, caratterizzate da catene polimeriche lineari o ramificate. Nel primo caso, in seguito al processo di *curing* attivabile tramite somministrazione di calore, si assiste ad una reazione di reticolazione con cui si instaurano legami chimici tra le catene. A differenza delle matrici termoplastiche, il processo che porta alla realizzazione delle matrici termoidurenti risulta irreversibile e pertanto il componente è difficilmente riciclabile.

È opportuno fare una distinzione tra fibre lunghe con azione rinforzante, sufficientemente lunghe da andare in trazione durante una prova di trazione, sostenere il carico ed arrivare a rottura, e fibre corte con azione tenacizzante, in cui si verifica la decoesione della matrice dalla fibra prima di arrivare a rottura della fibra stessa. Inoltre, si può capire dall'immagine seguente come l'orientazione delle fibre abbia un'influenza sulle proprietà meccaniche del componente, infatti se la linea carico si trova lungo la direzione della fibra (caso A) allora il composito presenterà maggiore resistenza rispetto al corrispettivo composito con fibre disposte con un certo angolo rispetto alla direzione di carico (caso B). Il giusto compromesso, tale per cui non si avrebbero proprietà anisotrope del materiale, sarebbe la configurazione a maglia intrecciata (caso C), ideale per sforzi multi-assiali.



**Fig.1.3.1** orientamento fibre unidirezionale (caso A e caso B) e multidirezionale (caso C) [5]

Nel caso di fibre ceramiche, e più in particolare fibre di Carbonio, le proprietà meccaniche risultano essere:

- Elevata resistenza meccanica ( $\sigma = 2 - 2.5 \text{ GPa}$ );
- Elevato modulo elastico ( $E = 200 - 1000 \text{ GPa}$  a seconda dell'orientazione delle fibre);
- Basso coefficiente di dilatazione termica;
- Bassa resilienza (garantita dalla matrice polimerica);
- Elevata conducibilità termica/elettrica;
- Diametri compresi tra 5 e 15  $\mu\text{m}$ .

Le fibre di carbonio vengono prodotte per modificazione delle fibre organiche PAN (poliacrilonite) o da residui di distillazione del petrolio/catrame (PITCH). Le fibre di Carbonio ottenute da PAN sono turbostratiche, ovvero con struttura cristallina formata da piani ciascuno disposto con un certo angolo rispetto all'altro, e pertanto tendono ad avere maggior carico di rottura. Le fibre derivanti da Pitch sono invece grafittiche, pertanto tendono ad assumere elevato modulo di Young ed elevata capacità termica. I tempi di produzione delle fibre da PITCH sono molto più brevi rispetto a quelle ottenute da PAN e non è richiesta alcuna tensione dei filamenti durante la carbonizzazione o grafitizzazione [5]. Il CFRP (*carbon fiber reinforced polymers*) è uno dei compositi a matrice polimerica rinforzato con fibre di carbonio, più utilizzato nel settore automotive/aerospace. Per quanto riguarda la parte sperimentale portata avanti durante tutto il lavoro di tesi è stato utilizzato un materiale per applicazioni strutturali come il GG200P, ottenuto tramite processo di laminazione in autoclave.

## 1.4 Tecnologie di produzione del CFRP: laminazione in autoclave

Le tecniche convenzionali con cui è possibile realizzare materiali compositi con matrice termoindurente sono molteplici e partono dallo stesso presupposto: unire tra di loro le due fasi (matrice e rinforzante) in un unico componente, facendo fluire la resina tra gli spazi vuoti delle fibre. Tale processo, con cui si realizzano lamine di fibre pre-impregnate, deve poi essere consolidato in modo da ottenere una compattazione degli strati in seguito ad un processo di reticolazione della matrice polimerica. [6]

Le tecniche ad oggi più utilizzate sono:

- Laminazione manuale, che consiste nel rivestire manualmente le fibre pre-impregnate con resina dopo avere posizionate su uno stampo; si tratta di un processo indicato per componenti di piccole dimensioni;
- Tecnologia a spruzzo, che consiste nello spruzzare contemporaneamente su di uno stampo la fibra sminuzzata e la resina vaporizzata: il processo di reticolazione avviene a temperatura ambiente e la tecnologia è generalmente utilizzata nel settore nautico;
- RTM (Resin Transfer Moulding): tale processo, a differenza degli altri sopra elencati sfrutta uno stampo ed un controstampo, all'interno del quale viene inserito il rinforzante solido e viene iniettata la resina polimerica. Gli stampi dovranno essere preriscaldati e posti in pressione per il tempo necessario a far avvenire la reazione di polimerizzazione;
- Vacuum Infusion (RIFT): si tratta di una variante dell'RTM in cui uno dei due stampi viene sostituito da un film polimerico flessibile. Tale tecnologia viene introdotta per limitare le emissioni di stirene generate dalla matrice in poliestere.;
- Pultrusione: è un processo automatizzato per la produzione di profili in materiale plastico fibro-rinforzato, denominati anche profili pultrusi o in VTR. Prima di essere inserite in uno stampo per ottenere la forma desiderata, le fibre di rinforzo passano da un bagno di impregnazione e imboccate in una stazione di preformatura che conferisce alle stesse le dimensioni volute. Successivamente seguirà il ciclo di cura nello stampo che permetterà la compattazione delle fibre.
- FW (Filament Winding): viene utilizzata per la realizzazione di componenti assialsimmetrici sfruttando un mandrino in rotazione attorno al quale vengono avvolte le fibre.
- Compression Moulding: la tecnica prevede l'utilizzo di una macchina di stampaggio a compressione 2000 kN e viene principalmente utilizzata per componenti non soggetti a carichi strutturali
- Produzione in autoclave: si tratta della tecnologia più utilizzata per applicazioni strutturali, automobilistiche e aerospaziali e prevede un ciclo di cura in autoclave a pressioni e temperature controllate.



*Fig. 1.4 tecnica di produzione del CFRP in autoclave [7]*

La tecnica di produzione in autoclave è stata presa in considerazione in questo lavoro di tesi per due motivi: si tratta di un processo tecnologico con cui è possibile sfruttare la resina in eccesso contenuta all'interno dei fogli di prepreg per realizzare l'adesivo necessario a garantire la tenuta meccanica tra due aderenti nel caso di giunzioni co-curate; è la tecnica privilegiata dall'azienda Bercella srl per la costruzione di parti strutturali per competizioni automobilistiche: uno dei principali business dell'azienda Emiliana è la produzione di telai in fibra di carbonio con inserti in alluminio per la casa di formula 2 *DALLARA*.

Questa tecnologia consta di cinque fasi: **taglio** (in cui il foglio di prepreg viene tagliato per dare la forma desiderata), **laminazione** (i fogli di prepreg vengono disposti su uno stampo e sovrapposti tra di loro fino a raggiungere lo spessore voluto), creazione del **sacco a vuoto** (lo stampo viene disposto all'interno di un sacco in Nylon dove viene mantenuto il vuoto grazie all'utilizzo di opportune valvole), **polimerizzazione** (è il processo tramite cui si ha la reticolazione della resina termoindurente e la compattazione degli strati a pressione e temperatura controllate in autoclave), **rimozione del sacco** (è l'ultimo step produttivo che consiste nella rimozione del sacco dall'autoclave e nell'estrazione del componente definitivo dallo stampo).

La laminazione in autoclave servirà a sviluppare in un unico step produttivo il componente ibrido METALLO-CFRP, intervenendo sulla fase di polimerizzazione nel ciclo di cura del componente.



## 1.5 Applicazioni

Fino ad oggi non è stata posta particolare attenzione alle giunzioni incollate o co-curate, in quanto una delle principali problematiche legata alla progettazione di componenti che sfruttano tale tecnologia è la rottura dell'interfaccia aderendo-adesivo in seguito all'applicazione di carichi non elevati. Per tale ragione i giunti più utilizzati sono tutt'ora quelli meccanici, che richiedono la presenza di componenti addizionali come bulloni, rivetti ecc. Tuttavia, se si riuscisse a creare un giunto con elevate proprietà meccaniche nella zona di sovrapposizione tra i due aderendi, in modo che l'applicazione di carichi elevati porti a rottura l'aderendo piuttosto che l'interfaccia, allora si potrebbero ottenere una serie di vantaggi, sfruttabili nel settore automobilistico, aerospaziale, navale e biomedicale.

L'utilizzo di materiali compositi (leggeri ed efficaci) uniti a materiali metallici con elevata resistenza specifica, hanno rivoluzionato il settore automobilistico nell'ambito delle competizioni sportive (come la Formula 1) ma anche stradale. Basti pensare che Dallara, azienda italiana affermata nel settore automobilistico, sfrutta la presenza di materiali compositi non solo per la produzione di interni, sedili e componentistica ausiliare ma anche per parti strutturali, come la scocca della Dallara stradale. L'utilizzo di una monoscocca in composito unita a telaietti in alluminio permettono di ottenere una notevole riduzione in massa e al contempo un incremento di accelerazione dell'autovettura.

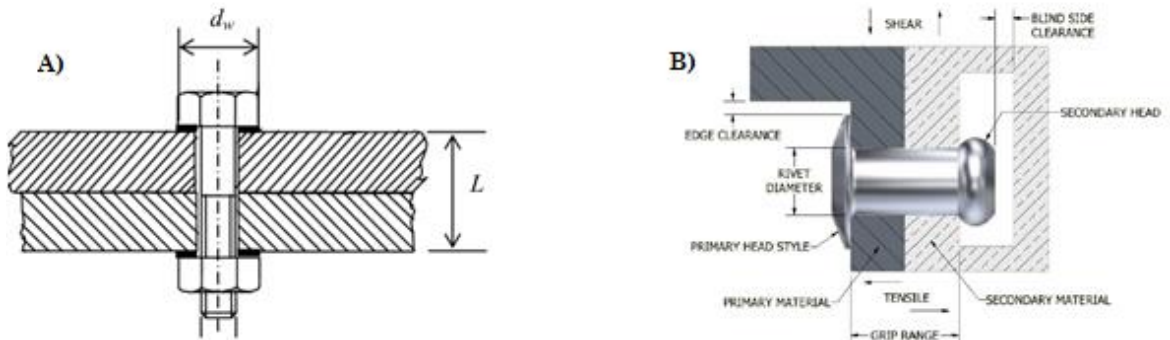


**Fig. 1.5** linea di assemblaggio della Dallara stradale: produzione della monoscocca, realizzata da Dallara compositi, e installazione di telaietti anteriori e posteriori in alluminio. [8]

## 2. Giunzioni ibride METALLO-CFRP

La giunzione viene utilizzata in seguito alla necessità di dover unire insieme due materiali con proprietà fisiche differenti per creare, tramite l'utilizzo di diverse tecniche e modalità, un'unica struttura. L'idea del giunto nasce dal momento in cui vi è l'esigenza di trasferire un carico da una parte all'altra della struttura in modo che questa possieda una rigidità tale da poter soddisfare i requisiti progettuali, nonostante sia composta da molte parti unite insieme. Bisogna tenere in considerazione che nella progettazione di componenti strutturali bisogna ridurre al minimo il numero di giunti, in quanto rappresentano la principale causa di cedimento del componente oltre che di aumento del costo. Nel caso specifico di giunti ibridi in materiale metallico e composito, è possibile effettuare una classificazione tra le modalità di collegamento più utilizzate:

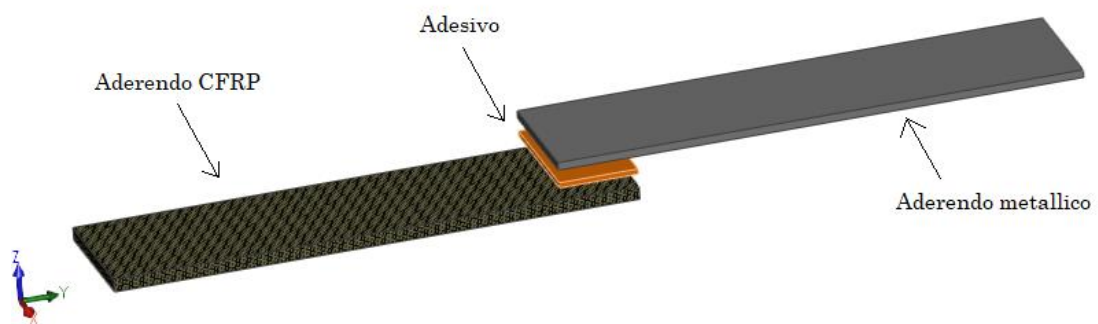
- **Giunti meccanici:** in cui il trasferimento di carico avviene attraverso elementi addizionali come bulloni o rivetti, con sforzi di compressione sugli elementi collegati. I giunti bullonati, riportati nella figura a sinistra, vengono utilizzati nel momento in cui viene richiesta semplicità costruttiva e nessuna limitazione sugli spessori; sono facilmente ispezionabili e smontabili senza danneggiare gli elementi costitutivi. I giunti rivettati vengono invece utilizzati nel momento in cui vi è la necessità di unire insieme materiali metallici o compositi senza l'utilizzo di saldatura. In figura 2.1 (B) si nota come il rivetto (o ribattino), costituito da un elemento metallico cilindrico, una volta applicato ai due materiali da unire non è più smontabile se non tramite distruzione degli elementi costitutivi.



*Fig. 2.1 giunto imbullonato (A) [9] e giunto rivettato (B) [10]*

- **Giunti adesivi:** in cui il trasferimento di carico avviene attraverso la superficie di sovrapposizione tra i due aderenti. Per una corretta funzionalità dei giunti è necessario che questi vengano sollecitati con sforzi prevalentemente di taglio sull'adesivo. Quest'ultimo viene definito come quel materiale in grado di unire due corpi mediante un contatto superficiale ed un legame intrinseco senza modificare le proprietà strutturali dei due corpi. L'adesione tra due corpi necessita che siano presenti contemporaneamente forze adesive (dovute all'interazione tra le molecole dell'adesivo e quelle dell'aderendo) e forze coesive (scambiate tra le molecole dell'adesivo). La giunzione adesiva, mostrata in figura 2.2, permette di unire insieme due

substrati, anche di diversa natura, sfruttando una area di sovrapposizione maggiore rispetto a quella di altri giunti, consentendo una distribuzione uniforme del carico e limitando fattori di concentrazione delle tensioni. Le proprietà meccaniche di un giunto dipendono dalle proprietà degli elementi costituenti (ovvero dai due o più aderenti), dall'adesivo e dalle proprietà meccaniche, fisiche e chimiche dell'interfaccia aderendo-adesivo. Per quanto riguarda le proprietà degli aderenti è necessario fare un'analisi sui materiali utilizzati e sui processi produttivi con cui vengono realizzati, mentre per quanto riguarda le proprietà all'interfaccia è necessario effettuare un'analisi sui principali metodi di adesione [10].



*Fig. 2.2 giunzione adesiva*

I vantaggi nell'utilizzo delle giunzioni adesive rispetto a quelle meccaniche sono da attribuire a diversi fattori di natura meccanica, termica ed estetica:

- Distribuzione uniforme del carico: in questo modo è possibile realizzare delle strutture più estese rispetto a quelle ottenibili con dei giunti meccanici;
- A differenza dei giunti meccanici non sono presenti collegamenti meccanici in cui si evidenziano concentrazioni delle tensioni;
- Elevata rigidezza, variabile a seconda dei materiali utilizzati;
- Superfici continue, prive di protuberanze;
- L'introduzione di bulloni o rivetti e dunque di fori può portare all'insorgenza di cricche nel caso di carichi ciclici, tuttavia, non essendo presenti nei giunti incollati, questi ultimi presentano una buona resistenza a fatica;
- Peso contenuto, dovuto al fatto di non dover introdurre elementi aggiuntivi oltre ai due aderenti e che le parti di rivestimento sono molto sottili (spessori inferiori al decimo di millimetro);
- Non sono soggetti a fenomeni di corrosione o di fretting, qualora si riuscisse a garantire una corretta preparazione delle due superfici;
- Grazie all'adesivo interposto tra i due substrati agiscono da isolanti elettrici e termici.

## 2.1 Giunzioni incollate

Secondo le normative ASTM l'adesivo viene definito come “una sostanza in grado di tenere assieme i materiali in maniera funzionale tramite l'adesione superficiale”. L'adesione, a sua volta, viene ottenuta mediante meccanismi di natura meccanica, fisica e chimica. Per una corretta progettazione del giunto incollato risulta fondamentale porre attenzione all'interfaccia aderendo-adesivo in modo che questa presenti la stessa resistenza delle due parti collegate. In questo modo si possono evitare ulteriori sovradimensionamenti delle parti unite e ottenere numerosi vantaggi rispetto alle giunzioni meccaniche imbullonate o rivettate. Infatti, se si riesce a sfruttare la configurazione di giunto adesivo più adatta all'applicazione richiesta e si massimizza l'area di sovrapposizione tra i due strati aderenti è possibile ottenere i seguenti vantaggi [10]:

- Miglior distribuzione dei carichi applicati lungo la superficie di giunzione;
- Possibilità di unire insieme componenti costituiti da materiali diversi;
- Sovrapposizione di materiali con diverso spessore e forme geometriche complesse.
- Sistema soggetto a maggior facilità di realizzazione e più economico rispetto ad altre tipologie di giunti;
- Superfici lisce nella zona di giunzione;
- Fungono da isolanti termici/elettrici;
- Mantiene inalterate le proprietà meccaniche dei due aderenti;
- Permette di ottenere miglior rapporto resistenza/peso grazie alla possibilità di non dover introdurre componenti addizionali per il fissaggio dei due componenti.

Bisogna considerare che questi benefici possono essere ottenuti solo per determinate condizioni di esercizio e se vi è una corretta preparazione delle superfici. Gli svantaggi tipici di queste tipologie di giunti sono dovuti a:

- Necessità di preparare le superfici degli aderenti a contatto con l'adesivo;
- La fase di assemblaggio richiede maggior accuratezza e condizioni di temperatura e umidità favorevoli alla buona riuscita della tenuta tra i due substrati (si vuole evitare la presenza di bolle o inclusioni all'interfaccia aderendo-adesivo);
- Le temperature d'esercizio devono tener conto di un valore massimo oltre il quale l'adesivo perderebbe le sue proprietà meccaniche (tale valore viene espresso nel data-sheet dell'adesivo e risulta generalmente inferiore ai 200°C);
- Disponibilità di poche tecniche per il controllo non distruttivo;
- La realizzazione del giunto non è immediata, pertanto sarà necessario aspettare i tempi di *curing* dell'adesivo (circa due ore);
- Le tensioni massime raggiungibili all'interfaccia sono limitate e fortemente influenzate dalle proprietà dell'adesivo [11].

## 2.2 Giunzioni co-curate

Le giunzioni co-curate sono una particolare configurazione di giunzioni adesive che sfruttano la resina polimerica (solitamente epossidica) contenuta all'interno del materiale composito per ottenere il collegamento tra le due parti. Sfruttando questa tecnologia è possibile ottenere il collegamento tra i due aderenti, intervenendo nel ciclo di cura del materiale composito, contestualmente al processo di produzione del CFRP. Rispetto alla giunzione semplicemente incollata questa nuova strategia di giunzione non utilizza materiali aggiuntivi in quanto, applicando sufficiente pressione nella fase di polimerizzazione del composito, viene utilizzata la resina non ancora reticolata contenuta nei fogli pre-impregnati del CFRP. In questo modo, oltre al risparmio di un ulteriore processo produttivo per l'applicazione dell'adesivo, si possono ottenere numerosi benefici sulla resistenza finale del giunto. Infatti, se consideriamo il caso della produzione in autoclave, tramite un'opportuna progettazione dello stampo si può garantire una migliore qualità delle superfici di overlap ed evitare la presenza di bolle d'aria o altre impurità all'interno dell'interblocco meccanico tra le due strutture aderenti.

Nonostante siano molteplici i vantaggi del metodo di giunzione sopra descritto, ad oggi sono pochi gli studi affrontati; pertanto, nel lavoro di tesi si è posta maggiore attenzione su questa tipologia di giunzione, valutando anche gli effetti benefici che le features superficiali, realizzate mediante tecniche di fabbricazione additiva, possono apportare alla giunzione co-curata. Lo studio dell'additive manufacturing legato alla giunzione ibrida co-curata ha come obiettivo quello di raggiungere risultati in termini di resistenza maggiori rispetto alle giunzioni convenzionali, spingendosi verso soluzioni innovative come quelle presentati da *Airbus*. [12] Infatti, l'azienda leader nella produzione di aeromobili civili ha brevettato il cosiddetto "HYPER JOINT": un giunto ibrido in cui l'aderendo metallico presenta dei pin a forma di freccia nella zona di overlap, che vengono spinti oltre il 75% degli strati laminati in composito, sfruttando il processo di laminazione in autoclave. La realizzazione di queste strutture a forma di freccia avviene mediante tecniche *powder bed fusion* ed il materiale utilizzato è una lega di titanio, con cui è possibile evitare corrosione galvanica con la fibra di carbonio.

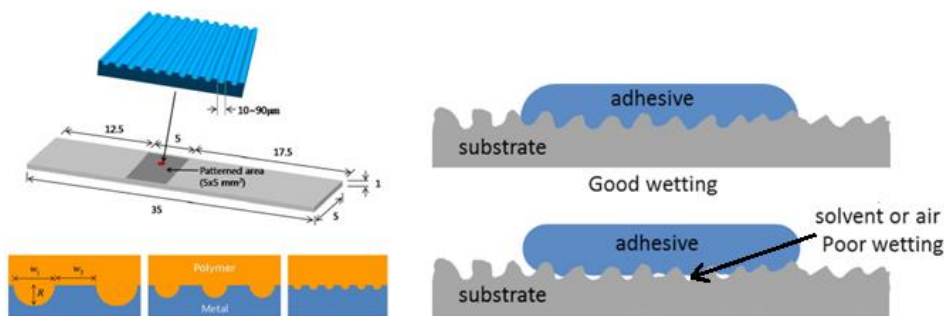
Il processo produttivo utilizzato in questa tesi per la produzione dell'aderendo in composito e della contemporanea realizzazione del giunto è la laminazione in autoclave. Per la parte di sperimentazione e di realizzazione dei provini è stata dunque fondamentale la collaborazione con l'azienda Bercella.

## 2.3 Meccanismi di adesione

Le proprietà meccaniche del giunto dipendono dalla natura degli elementi costituenti aderendo/adesivo e dalle proprietà chimiche, fisiche dell'interfaccia; pertanto, risulta necessario valutare come lo strato adesivo interagisca con gli strati aderenti. Di seguito vengono riportate le principali teorie di adesione che determinano la tenuta meccanica del giunto.

- **Interlocking meccanico.**

Tra i meccanismi di adesione quello dell'*interlocking* o interconnessione meccanica contribuisce maggiormente nella forza di adesione all'interfaccia tra lo strato metallico (aderendo) e quello polimerico (adesivo). È necessario che vi sia un intimo contatto su scala molecolare affinché possano agire le attrazioni intermolecolari, che a loro volta risultano fortemente influenzate dalla profondità di penetrazione del polimero nei crateri o pori del substrato metallico. Pertanto, è necessario porre attenzione sia sul grado di rugosità della superficie che sull'eventuale presenza di features superficiali oltre che all'eventuale infiltrazione di solventi o particelle d'aria rimaste intrappolate tra le creste del substrato metallico, che potrebbero compromettere la buona riuscita del giunto stesso [13].



**Fig.2.3** (a) schematizzazione dell'interfaccia metallo-polimero con modellazione a microlinee [13]; (b) influenza della presenza di solvente o aria sulla buona riuscita del giunto [14] meccanico.

- **Teoria della diffusione**

Si basa sul fatto che l'adesione tra materiale adesivo e aderenti avvenga tramite la diffusione di molecole all'interfaccia. Questa teoria si presta maggiormente a legami polimerici, in cui è previsto lo sviluppo di uno strato limite in cui si intrecciano le catene polimeriche, dunque uno dei due giunti presenta maggiore solubilità nell'altro. Tuttavia, poiché l'adesione avviene tra componenti con solubilità trascurabile, tale teoria ha un effetto poco rilevante ai fini della tenuta all'interfaccia del giunto [15].

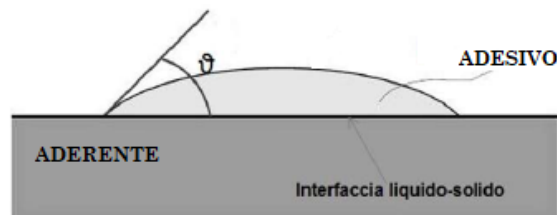
- **Teoria elettrostatica.**

Questa teoria si basa sul fatto che quando una superficie solida viene posta a contatto con un liquido si viene a creare un doppio strato elettrostatico, in cui le molecole presenti nel liquido, con cariche opposte, si dispongono

preferenzialmente all'interfaccia a causa della carica elettrostatica presente in superficie. Si tratta di un meccanismo di adesione che può essere utile nella prima fase di fissaggio dell'adesivo sul substrato metallico, ma sicuramente avrà un ruolo marginale nell'incollaggio strutturale in seguito alle reazioni di polimerizzazioni con cui l'adesivo non si troverà più allo stato liquido [16].

- **Teoria dell'adsorbimento**

Il fenomeno dell'adsorbimento è correlato alla tensione superficiale che si genera all'interfaccia tra strato aderente e strato adesivo mediante l'angolo di contatto  $\theta$ , rappresentato in figura 2.4.



*Fig.2.4 influenza della bagnabilità sulle interazioni intermolecolari tra aderente (solido) e adesivo (liquido) [1].*

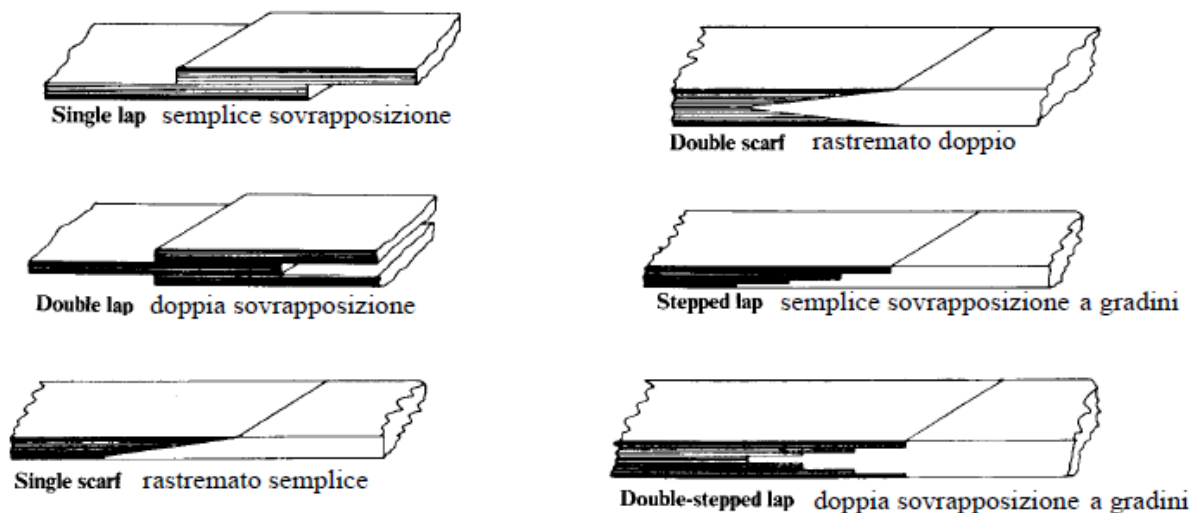
Questo meccanismo è favorito quando l'adesivo presenta un'energia superficiale relativamente bassa tale da diffondersi nel substrato inferiore formando un angolo di contatto  $\theta$  inferiore a  $90^\circ$ . È necessario che il substrato metallico presenti un'energia superficiale relativamente alta per facilitare il processo, che può essere ottenuta mediante un'opportuna preparazione delle superfici come la rimozione di strati limite deboli come ossidi e contaminanti chimici.

- **Teoria del legame chimico covalente**

Tale teoria si basa su un meccanismo simile a quello dell'adsorbimento ma a differenza di questo implica la formazione di legami chimici primari più forti. Si tratta di legami che non sono presenti in polimeri organici usati in applicazioni strutturali ma ottenibili tramite l'applicazione di un primer, opportunamente scelto per il tipo di materiale metallico e polimerico. [16]

## 2.4 Configurazione dei giunti adesivi

A seconda del caso applicativo, degli spessori necessari a garantire le specifiche progettuali e del carico a cui il componente è soggetto, vengono proposte diverse configurazioni di giunti incollati. Di seguito vengono riportate le tipologie di giunti incollati più comunemente utilizzate per metallo-metallo e metallo-composito. La tipologia più semplice sia a livello costruttivo che economico risulta quella *single-lap*, caratterizzata da una sovrapposizione di due strati aderenti di spessore inferiore rispetto alle altre configurazioni. Questa configurazione risulta la soluzione che meglio combina semplicità di costruzione e resistenza meccanica, tanto da essere la più utilizzata nella valutazione della distribuzione delle tensioni e delle deformazioni all'interno della struttura. La singola sovrapposizione, tuttavia, introduce un carico flessionale durante la prova di trazione a causa del disallineamento dei due aderenti rispetto alle pinze di afferraggio della macchina. La soluzione *double lap* risulta caratterizzata da tre strutture aderenti e due interfacce, in prossimità delle quali va ad agire lo strato adesivo: risulta più complessa rispetto al caso precedente ma offre una maggiore resistenza meccanica. Le soluzioni rastremate e a gradini, seppur le più complicate tecnologicamente, risultano maggiormente resistenti in quanto limitano il carico di pelatura "peel" e riescono a trasferire il carico da un aderendo all'altro senza una concentrazione degli sforzi. Per l'applicazione del criterio di resistenza e la valutazione delle proprietà meccaniche del giunto è più conveniente l'utilizzo di una struttura *single-lap* in quanto le altre configurazioni risulterebbero più sensibili ad eventuali difetti che potrebbero presentarsi sia durante la fase di realizzazione del provino che durante la fase di trattamento e pulizia delle superfici.

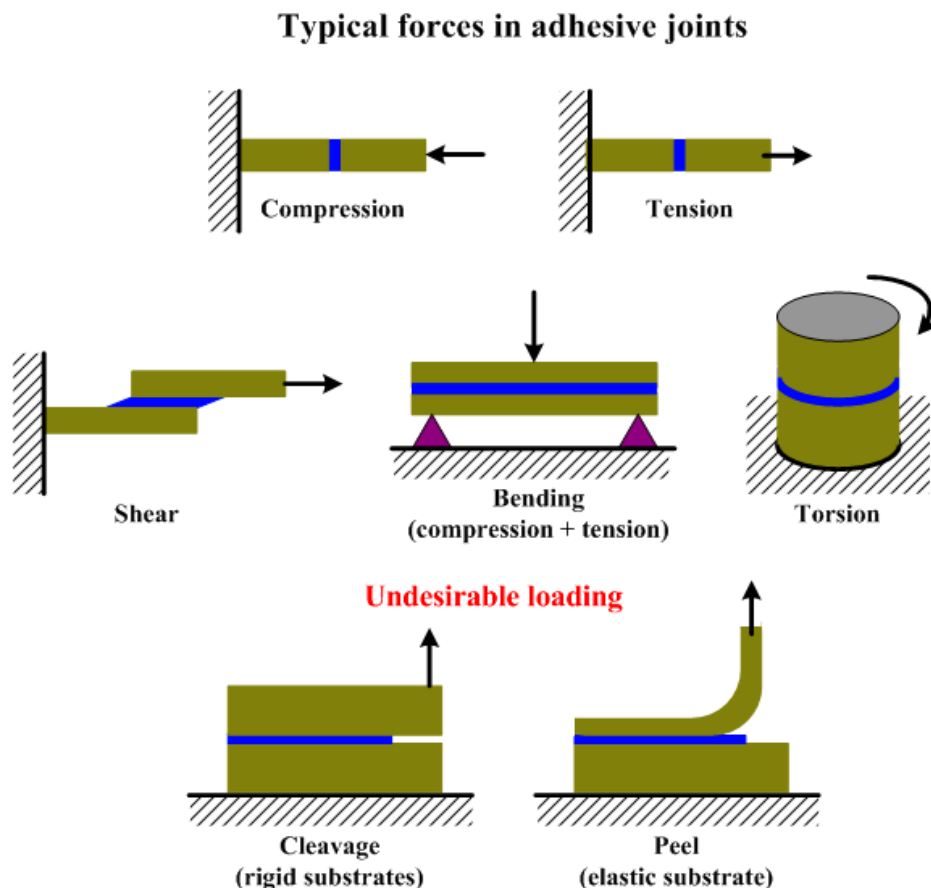


**Fig. 2.5** Configurazioni della struttura incollata [17]



## 2.5 Condizioni di carico

La resistenza di un giunto è fortemente influenzata dalla direzione e distribuzione delle tensioni, come risultato dei carichi ad esso applicati. Nella figura seguente si può notare come nel caso di giunti di testa “*butt joint*” la superficie di sovrapposizione sia limitata e pertanto risultano consigliati per quelle applicazioni in cui l’area disponibile è compresa in un range di 12-25 mm, con sforzi massimi applicabili di 5-13 MPa. Nel caso di giunti a semplice sovrapposizione, la superficie di interfaccia risulta più estesa tanto da poter resistere a sforzi di taglio compresi tra 13 e 20 MPa, tuttavia trattandosi di superfici sfalsate risultano più suscettibili al distacco quando uno dei due substrati si deforma o viene allontanato dalla linea di giunzione. Una corretta realizzazione del giunto richiede che le tensioni di carico siano dirette lungo le sue direzioni principali di resistenza tenendo in considerazione l’anisotropia del giunto stesso. I giunti strutturali disponibili nel mercato, nelle loro diverse configurazioni, sono dotati anche di una scheda tecnica che riporta le informazioni sugli sforzi di taglio raggiungibili ricavati tramite test di resistenza standard: questi valori variano a seconda dell’adesivo utilizzato [18].



**Fig. 2.6** condizioni di carico tipiche in giunti adesivi [18]

Si cerca, invece, di evitare tutte quelle applicazioni che potrebbero compromettere la struttura, ovvero tutti quei casi sfavorevoli in cui il giunto lavora in condizione di trazione, clivaggio o pelatura “*peel*”. In particolare, questi ultimi cedimenti riducono

la superficie effettiva di interfaccia quando viene applicato un carico di trazione in modo non uniforme al bordo del giunto; in questo modo la struttura dovrà supportare, a parità di carico applicato, una pressione maggiore.

Per una corretta progettazione del giunto è necessario che venga massimizzata l'area di contatto tra le due superfici aderenti, in quanto questa rappresenta la sezione critica in cui si ha la trasmissione del carico ed è fondamentale che le forze agenti sul giunto vengano distribuite sull'intera linea di giunzione.

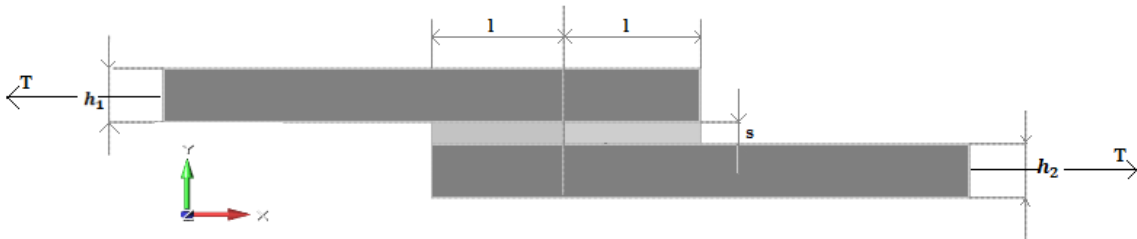
Bisognerà inoltre tenere in considerazione i seguenti punti chiave per evitare l'insorgere di fenomeni di cedimento [10]:

- Improvvise variazioni nel flusso del carico attraverso il giunto, che generalmente si manifestano negli spigoli d'estremità o a causa di impreviste variazioni nel diametro dei componenti strutturali;
- La resistenza strutturale locale dei due aderenti dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza; in questo caso l'obiettivo è trovare una giunzione ibrida con componenti che presentano moduli elastici differenti. Tuttavia, le cause di cedimento che ne conseguono possono essere ridotte con un'attenta selezione dei materiali, degli spessori locali e della forma degli aderenti;
- Il giunto deve lavorare in condizioni favorevoli, mostrate in figura 2.5, evitando l'insorgere di momenti flettenti, soprattutto nel caso di giunti a singola sovrapposizione;
- Nel caso di giunti ad efficienza 100%, la deformazione degli aderenti dovrebbe corrispondere alla deformazione dell'adesivo nel giunto; ciò riduce le concentrazioni di tensioni all'estremità della zona di sovrapposizione.

Altri effetti dannosi quali momenti, carichi secondari e carichi di peeling possono essere ridotti al minimo o addirittura eliminati se vengono garantite ulteriori condizioni di simmetria.

## 2.6 Sollecitazioni single lap joint

Nella figura successiva viene mostrato il modello 2D del giunto a singola sovrapposizione, caratterizzato da un carico di trazione lungo l'asse x. Il carico T, applicato agli estremi opposti dei due strati aderenti, non si trova sullo stesso asse pertanto occorrerebbe considerare anche un momento flettente nella zona di overlap in cui si trova lo strato adesivo; tuttavia, è possibile trascurare tale effetto assumendo uno spessore del modello sufficientemente piccolo.

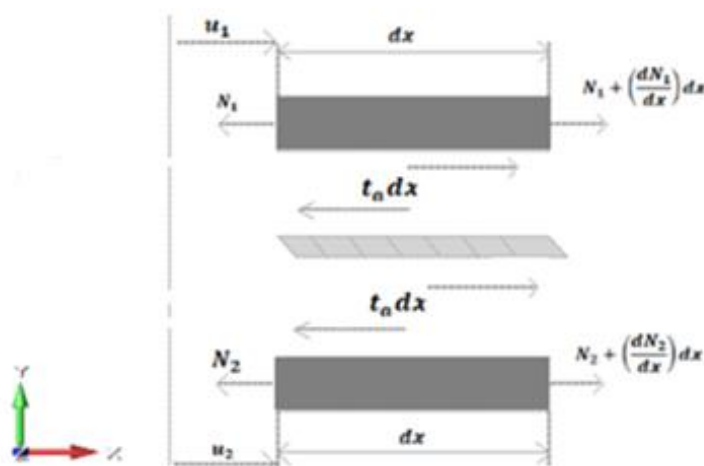


**Fig. 2.7** sollecitazioni lungo il profilo di un giunto a singola sovrapposizione [10]

Sono state fatte le seguenti ipotesi per valutare le sollecitazioni a cui è sottoposta l'interfaccia del modello [10]:

- le sollecitazioni di taglio nell'adesivo sono ritenute costanti lungo lo spessore s;
- le tensioni longitudinali nei due aderenti non variano lungo gli spessori  $h_1$  e  $h_2$ ;
- aderenti e adesivi sono assunti a comportamento elastico lineare.

Per scrivere le equazioni di equilibrio substrato superiore-adesivo e adesivo-substrato inferiore risulta utile andare a considerare gli elementi infinitesimali nella zona di sovrapposizione.



**Fig. 2.8** sollecitazioni nella zona di overlap in un giunto a singola sovrapposizione [10]

L'obiettivo dell'analisi degli elementi infinitesimali è quello di valutare i valori degli sforzi longitudinali  $N_1$  ed  $N_2$  e delle tensioni tangenziali  $t_a$  in funzione delle proprietà intrinseche dei materiali degli aderenti/adesivo e dal carico applicato T, considerato per la prova.

Considerando l'aderendo superiore e quello inferiore possiamo scrivere le seguenti equazioni differenziali [10]:

$$(1) N_1 - \left[ N_1 + \left( \frac{dN_1}{dx} \right) dx \right] - t_a dx = 0 \quad \rightarrow \quad \left( \frac{dN_1}{dx} \right) + t_a = 0;$$

$$(2) N_2 - \left[ N_2 + \left( \frac{dN_2}{dx} \right) dx \right] + t_a dx = 0 \quad \rightarrow \quad \left( \frac{dN_2}{dx} \right) - t_a = 0$$

Dove:

- $N_1$  ed  $N_2$  rappresentano le tensioni longitudinali per unità di lunghezza rispettivamente per l'aderendo superiore e inferiore;
- $t_a$  rappresenta la tensione di taglio nello strato adesivo.

Avendo considerato, tra le ipotesi, un comportamento elastico lineare per gli aderenti, possiamo scrivere le seguenti relazioni che legano lo *spostamento longitudinale* “ $u$ ” con la *deformazione* “ $\varepsilon$ ”:

$$(3) \varepsilon_1 = \frac{du_1}{dx} = \frac{N_1}{E_1 h_1};$$

$$(4) \varepsilon_2 = \frac{du_2}{dx} = \frac{N_2}{E_2 h_2}$$

Dove:

- $E_1$  ed  $E_2$  rappresentano rispettivamente i moduli elastici del substrato superiore (nel nostro caso CFRP) e del substrato inferiore (lega di titanio Ti6Al4V);
- $h_1$  e  $h_2$  rappresentano gli spessori dei due aderenti.

Considerando anche lo strato adesivo a comportamento elastico lineare, è possibile legare la tensione di taglio  $t_a$  alla deformazione di taglio  $\gamma_a$  attraverso la seguente relazione:

$$(5) t_a = G\gamma_a = G \frac{(u_2 - u_1)}{s}$$

Dove:

- $G$  rappresenta il modulo di elasticità tangenziale dello strato adesivo (dipenderà dalle proprietà intrinseche della colla utilizzata per l'incollaggio dei due strati aderenti).
- $s$  rappresenta lo spessore dello strato adesivo.

Derivando nuovamente l'equazione 1 e sostituendo quanto trovato nelle equazioni 3, 4 e 5 si ha che:

$$(6) \frac{d^2 N_1}{dx^2} = -\frac{dt_a}{dx} = -\frac{G}{s} \left( \frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} \right) = -\frac{G}{s} \left( \frac{N_2}{E_2 h_2} - \frac{N_1}{E_1 h_1} \right)$$

Poiché la somma dei contributi è pari al carico applicato  $N_1 + N_2 = T$ , è possibile sostituire il valore  $N_2 = T - N_1$  nell'equazione precedente ottenendo:

$$(7) \frac{d^2 N_1}{dx^2} = -\frac{G}{s} \left[ \frac{T}{E_2 h_2} - N_1 \left( \frac{1}{E_2 h_2} + \frac{1}{E_1 h_1} \right) \right]$$

Per semplificare i calcoli è stato introdotto il coefficiente  $\lambda^2 = \frac{G}{s} \left( \frac{1}{E_2 h_2} + \frac{1}{E_1 h_1} \right)$ , che viene sostituito nell'equazione precedente e da cui si potrà ottenere un'equazione di secondo grado:

$$(8) \quad \frac{d^2 N_1}{dx^2} - \lambda^2 N_1 = \frac{TG}{E_2 h_2 s}$$

La soluzione dell'equazione di secondo grado è la seguente:

$$(9) \quad N_1 = A \sinh(\lambda x) + B \cosh(\lambda x) + \frac{T E_1 h_1}{(E_1 h_1 + E_2 h_2)}$$

Per la determinazione delle costanti di integrazione A e B occorrerà imporre le seguenti condizioni al contorno, considerando un sistema di riferimento x-y nella mezzeria della zona di adesione dei due strati:

$$(10) \quad x = l \gg N_1 = 0$$

$$(11) \quad x = -l \gg N_1 = T$$

Sostituendo le equazioni al contorno nella soluzione dell'equazione differenziale si ottiene:

$$(12) \quad N_1 = T \left[ -\frac{\sinh(\lambda x)}{2 \sinh(\lambda l)} + \frac{(E_2 h_2 - E_1 h_1) \cosh(\lambda x)}{2(E_2 h_2 + E_1 h_1) \cosh(\lambda l)} + \frac{E_1 h_1}{(E_2 h_2 + E_1 h_1)} \right]$$

$$(13) \quad N_2 = T \left[ 1 + \frac{\sinh(\lambda x)}{2 \sinh(\lambda l)} + \frac{(E_2 h_2 - E_1 h_1) \cosh(\lambda x)}{2(E_2 h_2 + E_1 h_1) \cosh(\lambda l)} - \frac{E_1 h_1}{(E_2 h_2 + E_1 h_1)} \right]$$

$$(14) \quad t_a = \frac{T \lambda}{2} \left[ \frac{\cosh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)} + \frac{(E_2 h_2 - E_1 h_1) \cosh(\lambda x)}{(E_2 h_2 + E_1 h_1) \cosh(\lambda l)} \right]$$

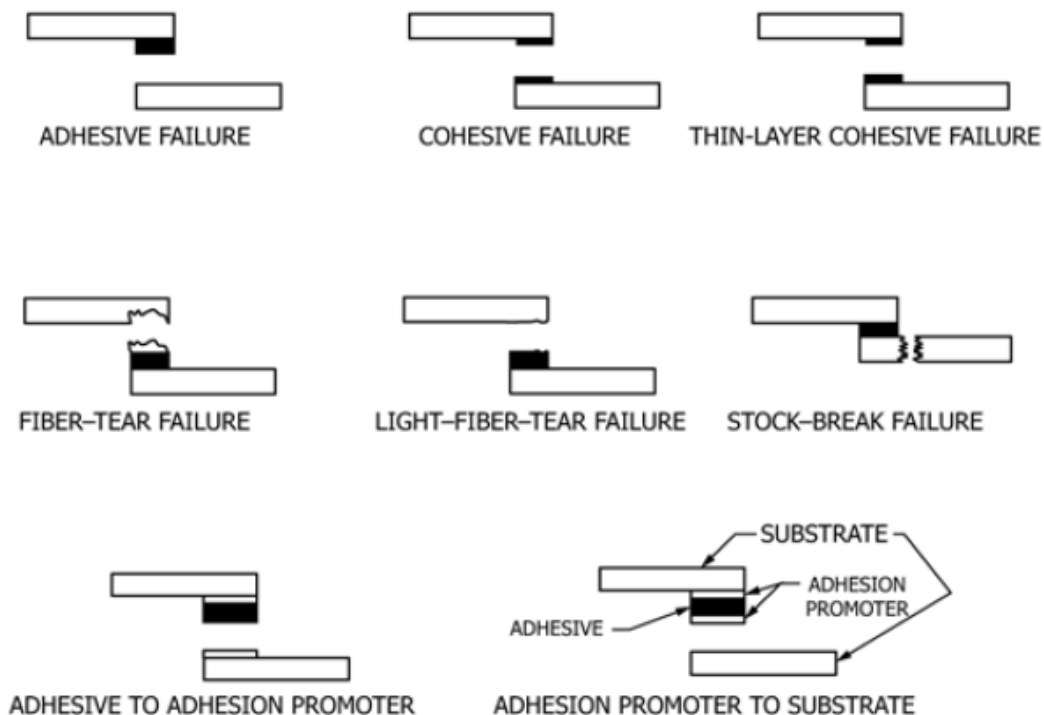
## 2.7 Valutazione delle cause di cedimento

Da normativa ASTM D5573-99 [19] sono stati identificati i principali metodi di cedimento dei giunti incollati per materiali compositi CFRP. Le cause di cedimento, schematizzate in figura 2.9, possono essere applicate non solo al caso di componenti costituiti da un singolo materiale ma anche da giunti ibridi metallo-composito.

- **Adesive Failure:** rottura del giunto incollato in prossimità dell'interfaccia adesivo-aderente (viene anche indicato come rottura interfacciale). Dopo il cedimento le superfici dei due aderenti possono presentare un aspetto lucido ma non ci sono evidenze che dimostrano che l'adesivo si sia trasferito su una o sull'altra superficie.
- **Coesive Failure:** la rottura coesiva è un tipo di cedimento all'interno dell'adesivo stesso che dimostra quanto l'adesivo scelto non fosse adatto all'applicazione strutturale per cui era stato scelto.
- **Thin-layer coesive Failure:** è una causa di rottura simile a quella coesiva, con la differenza che in questo caso il cedimento è molto vicino all'interfaccia adesivo-aderente e quindi dopo la prova una superficie sarà caratterizzata da una "leggera spolverata" di adesivo mentre l'altra da una parte più cospicua di strato adesivo.

- **Fiber-tear Failure:** è una causa di cedimento che si manifesta all'interno della matrice del CFRP ed è caratterizzata dalla presenza di fibre di rinforzo su entrambe le superfici.
- **Light-fiber-tear Failure:** la rottura delle fibre leggere si verifica all'interno del substrato CFRP vicino alla superficie dell'aderente. La causa di cedimento è caratterizzata dalla presenza di matrice del composito che va a depositarsi sullo strato adesivo, mentre non vi è alcuna traccia delle fibre.
- **Stock-break Failure:** la rottura avviene esclusivamente nel substrato del materiale composito e generalmente è circoscritta alla zona prossima a quella di sovrapposizione dei due strati aderenti.
- **Adhesive to adhesion promoter** e **adhesion promoter to substrate** sono tipiche cause di cedimento che si manifestano nel momento in cui viene utilizzato un promotore di adesione per migliorare la tenuta tra lo strato aderente e quello adesivo.

La valutazione del tipo di cedimento risulta complessa per ogni prova, in quanto il provino analizzato è attribuibile non ad una sola modalità di rottura ma alla combinazione di una o più cause. Pertanto, la prova verrà classificata come cedimento misto e andranno specificate le classi presenti e la percentuale di ognuna di esse.



*Fig. 2.9 cause di cedimento da normativa ASTM D5573-99 [19]*

### 3 Presentazione del caso studio: influenza dei parametri Additive sulla tenuta meccanica del giunto

Le prestazioni meccaniche dei giunti adesivi sono generalmente limitate dalle proprietà all'interfaccia tra aderendo e adesivo, pertanto le sollecitazioni massime applicabili sono dettate dal data-sheet dell'adesivo. L'obiettivo di questa tesi è quello di poter realizzare un giunto con proprietà meccaniche all'interfaccia superiori rispetto a quelle dichiarate nel data-sheet dell'adesivo, sfruttando in primis features superficiali ottenibili mediante tecniche di fabbricazione additiva e successivamente opportuni accorgimenti nel processo produttivo della laminazione in autoclave. L'additive Manufacturing rappresenta l'unico processo tecnologico con cui è possibile creare strutture cellulari dell'ordine del millimetro di grandezza, dunque sarà anche il metodo con cui verranno realizzati i substrati metallici successivamente destinati alla creazione del giunto. Per poter valutare i vantaggi/svantaggi dell'utilizzo di features superficiali disposte sulla zona di sovrapposizione dell'aderendo metallico si è deciso di effettuare tre test, sia per giunti semplicemente incollati che per giunti co-curati. Il primo test viene eseguito considerando dei provini metallici "lisci", disposti in macchina con tre diverse orientazioni rispetto alla piattaforma di costruzione, in modo da poter valutare come la rugosità superficiale incida sulla tenuta meccanica del giunto. Il secondo test viene condotto considerando un substrato metallico con una superficie di sovrapposizione non più liscia ma con strutture *lattice*, con lo scopo di avere una penetrazione dell'adesivo all'interno delle unità cellulari ed ottenere dunque un incremento delle proprietà meccaniche all'interfaccia. Il terzo test viene condotto considerando un substrato metallico con una superficie di sovrapposizione contenente strutture *grip*, con l'obiettivo di ottenere non solo una penetrazione dell'adesivo tra le celle ma anche delle fibre.

Il dimensionamento del provino metallico è stato fatto prendendo in considerazione le procedure dettate dalla normativa ASTM 5868-1 [20] nel caso di semplice sovrapposizione (*single-lap joint*). In particolare, la norma descrive una prova di taglio utile a valutare le proprietà all'interfaccia nel caso di materiali metallici e CFRP, applicabile sia per fibre orientate che random.

Il procedimento prevede:

- **valutazione del substrato:** la fase iniziale consiste nella scelta dei materiali da utilizzare durante la prova. Per tutti i test sopra elencati si è deciso di utilizzare una lega metallica Ti6Al4V (con annessi trattamenti termici di ricottura e trattamenti di finitura superficiale quale sabbiatura al corindone/microsfere di vetro) mentre per il substrato in CFRP la scelta è ricaduta sul GG200P, tipicamente utilizzato per applicazioni automotive. In questa fase risulta molto importante valutare anche le dimensioni minime delle due parti aderenti. Nel caso di CFRP, ottenuto mediante laminazione in autoclave di fogli di prepreg, larghezza e lunghezza dovranno essere rispettivamente di 25,4 mm e 100 mm, con spessore nominale di 2,5 mm; mentre per il provino metallico lo spessore minimo dovrà essere di 1,5 mm. Nel caso di realizzazione di un pannello contenente tutti i provini è

consigliabile l'utilizzo di una punta diamantata o un altro metodo di taglio che permetta di ottenere delle superfici regolari.

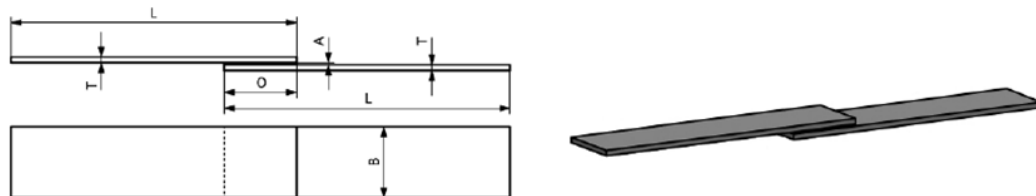
- **Preparazione delle superfici.** Per ridurre al minimo le cause di cedimento per rottura adesiva, in prossimità della superficie in cui entrano in contatto il componente metallico ed il componente *CFRP*, si effettua un pretrattamento delle due superfici. In particolare, l'obiettivo è quello di rimuovere la presenza di strati limite deboli e di favorire la rugosità sulla superficie metallica; infatti, nel primo caso si cerca di rimuovere gli ossidi metallici, olii e grassi protettivi che rappresenterebbero la causa principale della rottura del giunto; mentre nel secondo caso si cerca di massimizzare l'area di contatto sfruttando gli elevati valori di rugosità tipici dei processi *direct metal laser sintering* o l'utilizzo di strutture lattice. Bisogna tener presente che la sola pulizia del componente non basterebbe a realizzare una giunzione ottimale, in quanto il meccanismo di adesione sfrutta le forze interatomiche ed intermolecolari che si instaurano all'interfaccia tra gli atomi/molecole degli aderenti e degli adesivi; dunque, sarà necessaria una preparazione chimica del componente, come ad esempio l'esposizione o l'immersione con solvente. Anche fenomeni ambientali come la temperatura d'esercizio o l'umidità potrebbero interferire con il corretto funzionamento del giunto in quanto si assisterebbe ad un assorbimento da parte della matrice del composito o dell'adesivo delle molecole d'acqua presenti nell'aria, causando un appesantimento della struttura oltre che un'interruzione della zona aderente. Tali trattamenti dovranno tenere in considerazione, oltre alle prestazioni meccaniche del giunto, anche la forma delle strutture incollate ed il materiale sia degli aderenti che dell'adesivo utilizzato e saranno accettabili a condizione che non riducano la massa del *CFRP*. Per i tre test proposti non si è effettuata alcuna preparazione chimica del componente ma solo una pulizia superficiale dell'aderendo metallico.
- **Preparazione del giunto:** la prima fase consiste nell'applicazione dell'adesivo con successivo ciclo di cura in forno, secondo quanto suggerito dal fornitore dell'adesivo. La seconda fase consiste nel controllo della geometria della zona di interfaccia, attraverso l'ausilio di opportuni mezzi di fissaggio come ad esempio microsfere di vetro, garantendo uno spessore minimo dello strato adesivo pari a 0,76 mm. Prima di effettuare i test è necessario attendere che l'adesivo sia indurito, ovvero che siano completate le reazioni di polimerizzazione della resina.
- **Test:** per la prova statica bisogna considerare una separazione iniziale delle prese pari a 75mm ed una velocità di separazione pari a 13 mm/min. Inoltre, è previsto un numero minimo di prove pari a cinque per poter confrontare i risultati nel caso di provini con la stessa geometria.

Le dimensioni dei provini utilizzati per i test fanno riferimento alla normativa ASTM 5868-1 e vengono riportati nella tabella seguente.



	Parametro	Dimensioni [mm]
<b>Spessore strato adesivo</b>	A	0.76
<b>Larghezza del provino</b>	B	25,4
<b>Lunghezza del provino</b>	L	100
<b>overlap</b>	O	25
<b>Spessore del materiale</b>	T	2,5 mm (CFRP) 1,5 mm (Ti64)

*Tab. 3.1 parametri geometrici per la progettazione del giunto incollato [20]*



*Fig. 3.1 dimensioni provini incollati a singola sovrapposizione [20]*

### 3.1 Processo produttivo Selective laser Melting per la produzione degli aderendi metallici

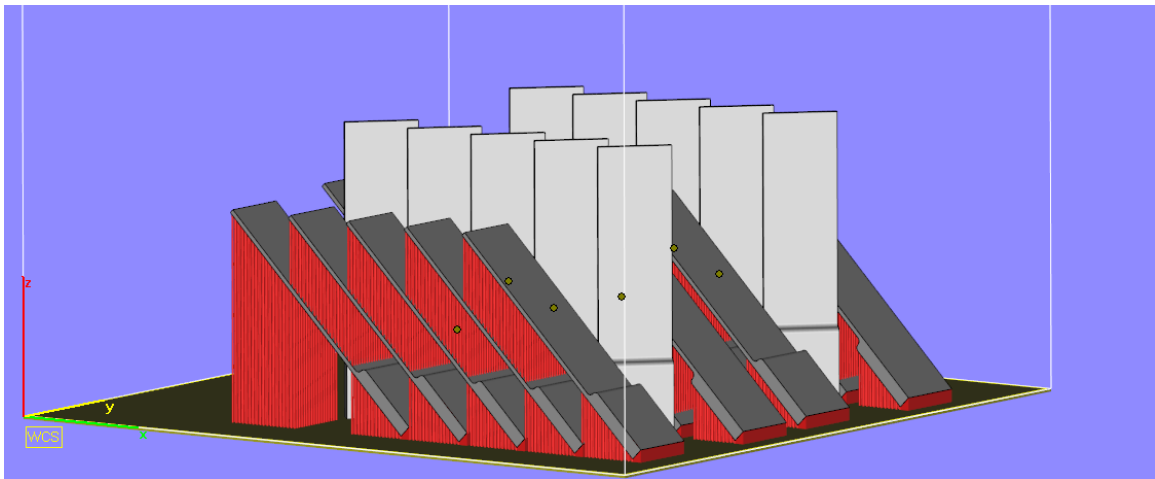
Dopo aver realizzato la geometria CAD del provino è stato necessario effettuare il ciclo di produzione del componente, seguendo gli step tipici di un processo Direct Metal Laser Sintering:

- Creazione del job file;
- Soffiatura/depolverazione e controllo visivo;
- Avvio trattamento termico;
- Taglio a filo e rimozione supporti;
- Finitura superficiale.

#### Creazione del job file

La fase preliminare per la messa in macchina del componente consiste nell'importazione del file STL del modello, caratterizzato da una mesh triangolare di diverse dimensioni che meglio approssimi la superficie, sul software CAM *Magics*. In questo modo sarà possibile effettuare una diagnostica del componente 3D ed eventualmente ripararlo tramite una correzione manuale o automatica, nel caso in cui questo si rivelasse essere corrotto. La fase successiva consiste nell'orientamento in macchina del componente, con l'obiettivo di saturare la piattaforma di costruzione in quanto il tempo richiesto per la realizzazione del prototipo è fortemente influenzata dall'altezza massima del job e non dal numero di componenti presenti. L'orientamento in macchina comporterà, oltre ad una variazione del tempo di costruzione, la presenza più o meno massiva di strutture di supporto; inoltre deve tener conto della direzione di deposizione della polvere per mezzo del recoater (in modo da limitare l'impatto col componente in fase di costruzione) e della rugosità

superficiale. Dopo aver terminato la fase di orientamento si può procedere con la generazione di supporti per le parti non supportate del componente che altrimenti non potrebbero essere realizzate (l'angolo d'inclinazione del componente è funzione del materiale utilizzato per la stampa). Inoltre, è fondamentale che siano facilmente rimovibili e che non modifichino la geometria del componente: vengono realizzate delle configurazioni che tengano conto della dimensione del componente e del suo tensionamento in fase di costruzione (ad esempio leghe metalliche come Ti6Al4V tendono a deformarsi se non correttamente ancorate alla piattaforma di costruzione). Di seguito viene proposto un esempio di messa in macchina del componente, e più in particolare viene presentata la disposizione dei provini metallici destinati al test 1.

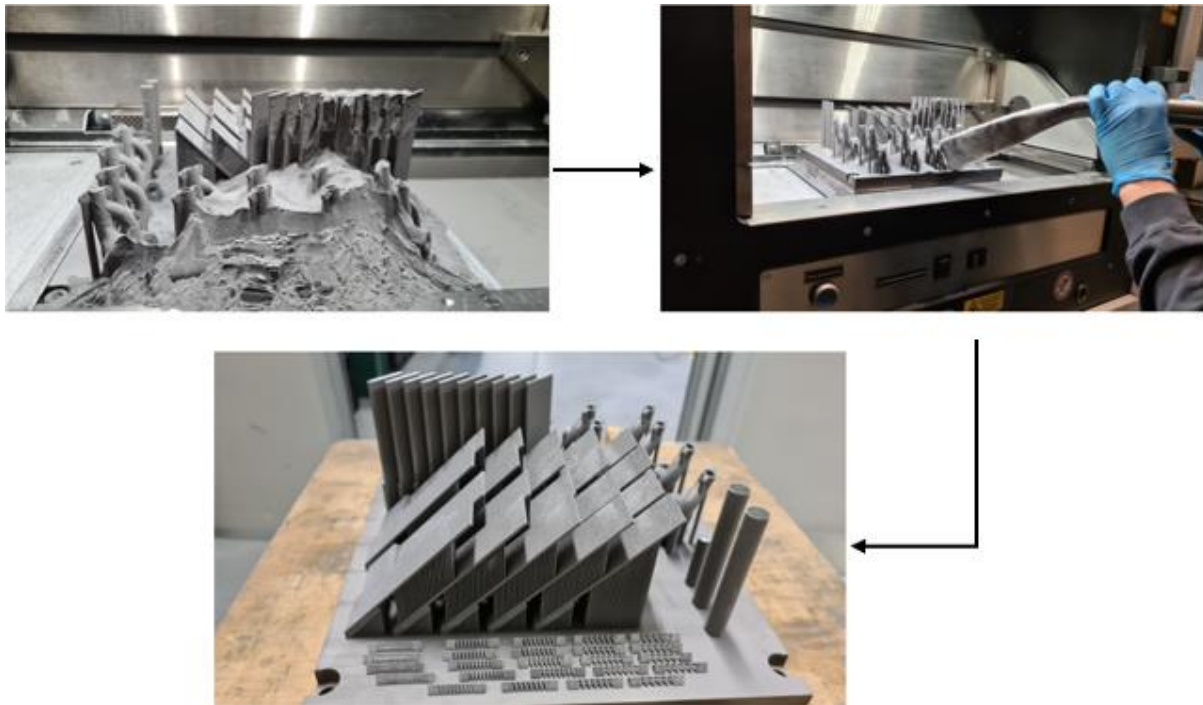


*Fig.3.2 messa in macchina del componente e applicazione dei supporti*

Dopo aver completato le fasi di riparazione, orientamento e generazione dei supporti si procede con la preparazione del file “.slc” che consiste nell’esecuzione dello *slicing* per la definizione delle sezioni di costruzione. Questa operazione può essere effettuata tramite Magics oppure tramite software proprietari delle macchine (ad esempio l’azienda Beamt S.p.A possiede macchine EOS, SLM Solution e Ranishaw ed è pertanto possibile salvare i file per la parte e per i supporti e convertirli successivamente con i software presenti a bordo macchina).

#### Soffiatura/depolverazione e controllo visivo

La tecnica utilizzata per la realizzazione dei componenti della tesi è “powder bed fusion”, in particolare è stata utilizzata una macchina EOS M280 con volumi di lavoro pari a: 250mm x 250mm x 325mm. La macchina presenta un sistema brevettato per l’evacuazione dei fumi che consente di evitare porosità all’interno del componente grazie ad una direzione del flusso dei gas opposta a quella di scansione. I materiali utilizzati processabili con questa tecnologia sono molteplici: dalle leghe di alluminio AlSi10Mg, per applicazioni in campo aerospaziale a quelle di titanio Ti6Al4V, per motorsport o per applicazioni biomedicali, passando per acciai inox (316L/ PH1) e superleghe base nichel (IN625/ IN718). Nella seguente immagine si nota come dopo la fase di completamento del “job” il volume di costruzione risulta ricoperto da una soffice polvere (in questo caso è stata utilizzata una lega di titanio per applicazioni motorsport e aerospaziali: Ti6Al4V). Pertanto, un operatore si occuperà della rimozione della polvere in eccesso tramite un aspiratore e a svincolare la piattaforma di costruzione dalla macchina.



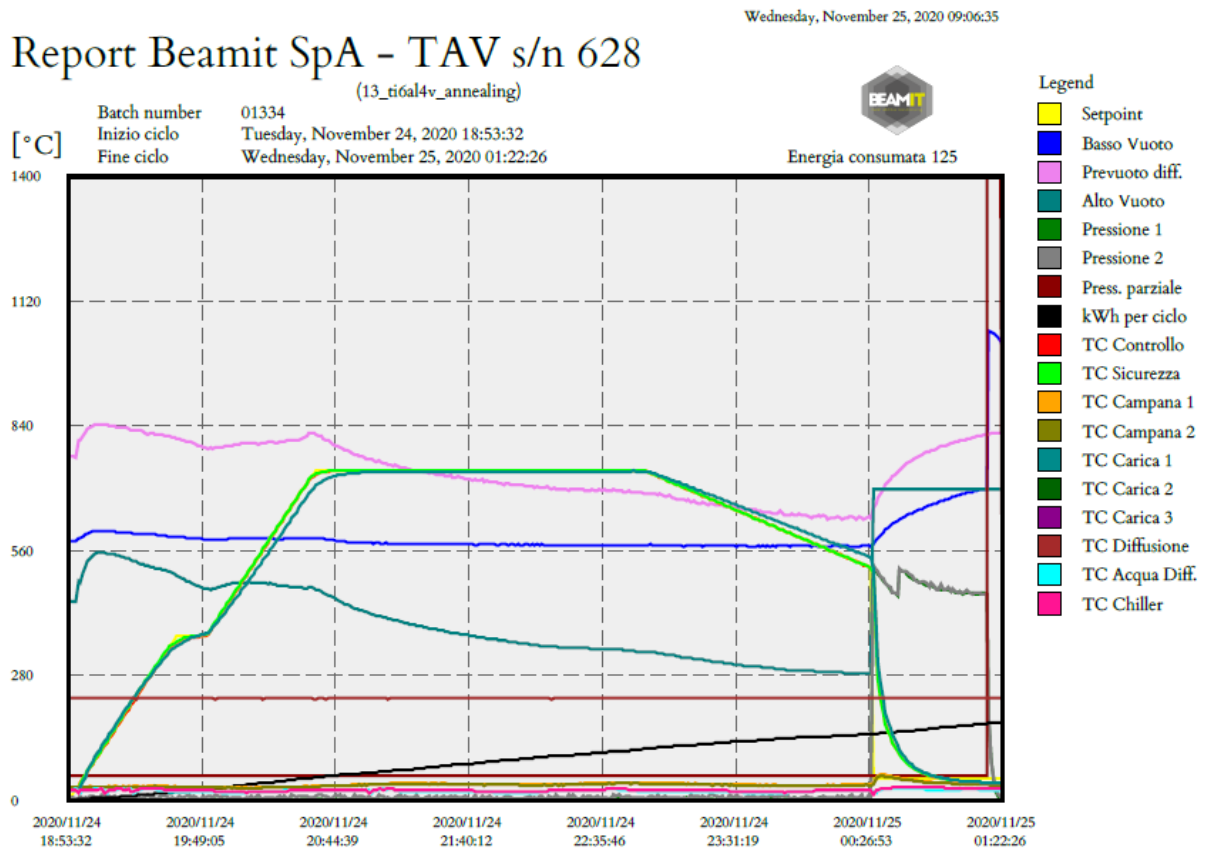
**Fig. 3.3** estrazione job dalla camera di lavoro e rimozione della polvere in eccesso

In questa fase risulta necessario rimuovere tutta la polvere in eccesso, intrappolata all'interno del componente o tra le strutture di supporto, sia per ridurre gli sprechi che per evitare che questa possa essere ri-sinterizzata durante il trattamento termico in forno. L'operazione di soffiatura viene effettuata con l'utilizzo di aria compressa oppure, per componenti più complessi, tramite macchinari che mettono in rotazione la piastra di costruzione. L'ultima fase, prima del trattamento termico, consiste nel controllo visivo per valutare se il componente presenta deformazioni oppure se ci sono evidenti discontinuità o zone mal fuse a causa, ad esempio, di fenomeni di overlapping in cui due laser si incontrano (non è il caso della Eos M280, caratterizzata da un solo laser).

### Avvio trattamento termico

Tutti i componenti realizzati con le tecniche di fabbricazione additiva necessitano di un trattamento termico prima della rimozione dei supporti, in quanto è noto che i componenti *as-built* presentino un tensionamento residuo che porterebbe a rottura il componente stesso se non opportunamente trattato. In particolare, per i manufatti in Ti6Al4V, prodotti nel primo *job*, è stato proposto un trattamento termico distensivo di ricottura "*annealing*" con lo scopo di ridurre le tensioni residue del componente senza alterare la microstruttura dello stesso. In Beamit s.p.a. è stato possibile effettuare tale trattamento sfruttando un forno a vuoto orizzontale T.A.V. a porta battente che permette flessibilità di carico, riscaldamento per convezione e raffreddamento multidirezionale. Di seguito viene riportato il ciclo termico di ricottura, in cui la curva rossa rappresenta la temperatura impostata nel forno (720°C per circa 2 ore) mentre la curva in verde la temperatura raggiunta dal componente durante il ciclo (rilevata tramite una termocoppia disposta nella parte centrale della piastra di costruzione). Nel primo tratto è evidente uno stallo della temperatura per far sì che il cuore raggiunga la stessa temperatura della superficie esterna, seguirà una curva crescente fin al raggiungimento della temperatura

massima impostata. La fase terminale, ovvero quella di raffreddamento, viene effettuata in primo luogo spegnendo le resistenze del forno, facendo sì che il componente possa seguire un raffreddamento normale, e successivamente insufflando argon all'interno della camera, ottenendo così un raffreddamento spinto.



**Fig. 3.4** ciclo termico di ricottura in forno per componenti in Ti6Al4V (concesso da BeamIt)

### Taglio a filo e rimozione supporti

Per la rimozione dei componenti dalla piastra di costruzione viene utilizzata la tecnica dell'elettroerosione a filo EDM che consiste in scariche elettriche che partono una dopo l'altra e generano una sequenza di piccoli fori sulla superficie del pezzo in lavorazione. Il continuo innesco e disinnesco dell'arco elettrico comporta l'asportazione di materiale senza la creazione di truciolo ma di piccole sfere metalliche che vengono eliminate insieme al fluido durante la lavorazione. Dopo aver recuperato i componenti dalla vasca di raccolta si procede con la rimozione dei supporti ancorati alla superficie dei componenti: per questa operazione risultano necessari martello e scalpello oppure, per componenti massivi, dei trapani pneumatici. La rimozione dei supporti lascerà sulla superficie del componente una traccia evidente che può essere rimossa con una smerigliatrice angolare o con carta abrasiva: l'effetto finale sarà quello di avere una superficie levigata che presenta valori di rugosità leggermente più bassi rispetto a quelli iniziali.



*Fig.3.5 Taglio a filo EDM e rimozione manuale dei supporti*

### Finitura superficiale

Le superfici dei componenti reali sono soggette a delle irregolarità micro-geometriche dette rugosità; queste possono essere CASUALI, nel caso di componenti prodotti con tecniche powder bed fusion o per fusione, PREFERENZIALI, nel caso di pezzi sottoposti a lavorazioni con macchine utensili. Per tale motivo risulta necessario effettuare delle operazioni meccaniche che consentano di eliminare le irregolarità macroscopiche dalla superficie dei pezzi lavorati con l'obiettivo di migliorarne [1]:

- Estetica: il componente lavorato presenterà una superficie levigata e non più opaca;
- Accuratezza dimensionale;
- Rugosità superficiale;
- Funzionalità del pezzo;
- Proprietà tribologiche;
- Vita a fatica: la propagazione delle cricche è un fattore determinante nel calcolo della vita a fatica del componente; migliorare il grado di finitura superficiale significa ridurre la possibilità di innesco delle cricche a partire dalla superficie e limitare concentrazioni delle tensioni.

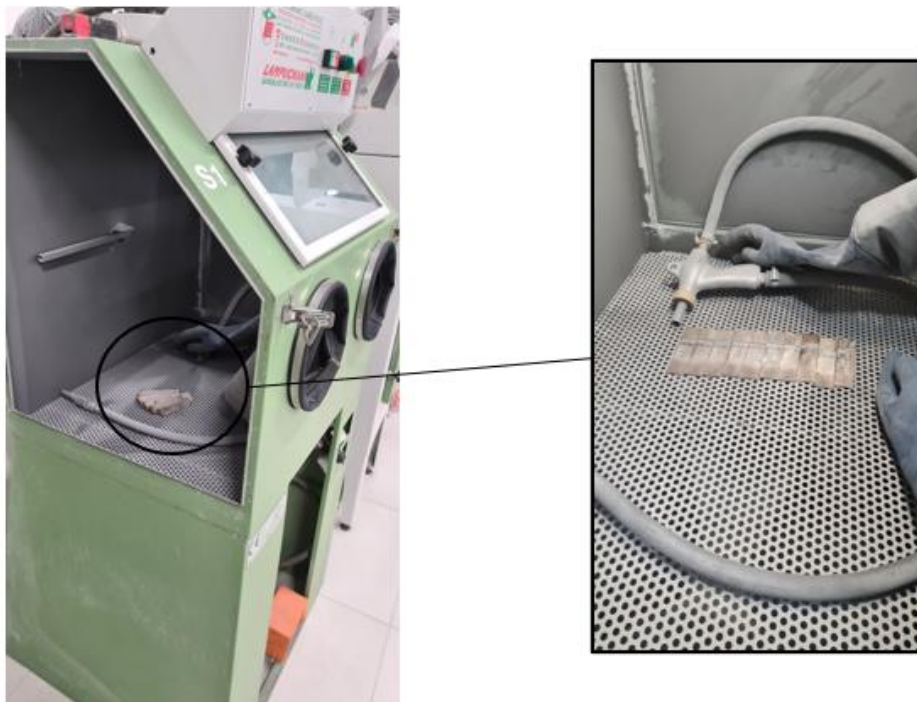
Sicuramente l'impronta di un processo additivo è molto diversa rispetto a quella di componenti realizzati con processi tradizionali per asportazione di truciolo, infatti per le tecniche "laser powder bed fusion" è possibile ottenere una rugosità minima di  $R_a = 5 \div 18 \mu m$ . Tale valore è però da considerare molto variabile a seconda del tipo di macchina, materiale e orientamento del componente nella camera di lavoro.

I metodi di finitura superficiale tipicamente utilizzati per i componenti realizzati in Additive sono i seguenti:

- Lappatura;
- Pallinatura (Shot peening);
- Burattatura;
- Abrasive Flow Machining (AFM);
- Magnetic Abrasive Finishing (MAF);
- Sbavatura termica (Thermal Energy Method, TEM);
- Lucidatura elettrochimica – ECM e Coolpulse;
- CNC.

Per quanto riguarda i componenti prodotti per questa tesi non è stato necessario ricorrere a particolari trattamenti di finitura superficiale e il metodo utilizzato per i provini realizzati in Ti6Al4V è stato la sabbiatura al corindone e con microsfere di vetro. Tale metodo consiste nell'abrasione della superficie metallica mediante un getto d'aria e sabbia (graniglia) con lo scopo di conferire al componente una rugosità uniforme ed omogenea. La rugosità superficiale del componente dipende dalla pressione del getto, dalle dimensioni del componente e dalla granulometria del materiale utilizzato durante la lavorazione:

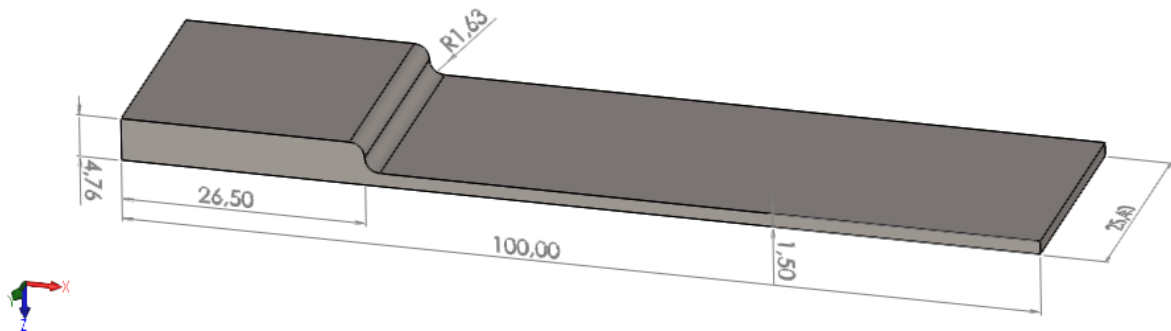
- **CORINDONE ( $Al_2O_3$ )**: è un ossido dell'alluminio. È estremamente duro e resistente alle alterazioni. Si presenta in tutti i colori, come ad esempio il rubino (corindone rosso) o lo zaffiro (corindone blu).
- **MICROSFERE DI VETRO**: presentano forma sferica ed una superficie liscia, non asportano materiale e non incidono le superfici trattate. Generalmente vengono utilizzate per lavorare prodotti finiti in quanto non alterano gli articoli trattati e permettono di ottenere superfici con effetto satinato.



*Fig.3.6 finitura superficiale tramite sabbiatrice al corindone*

### 3.2 TEST 1: valutazione dell'influenza dell'orientamento in macchina sulla rugosità superficiale

Il provino metallico è stato disegnato tramite il software di progettazione CAD "solidworks", con cui è stato possibile applicare i criteri considerati nella normativa ASTM, effettuando una modifica dimensionale del componente che non avrà alcun effetto sui risultati finali della prova. Infatti, per migliorare l'allineamento verticale del provino in macchina è stato considerato uno spessore, in prossimità della zona d'afferraggio, non più di 1,5 mm ma di 4,76 mm in modo da tener conto dello spessore dello strato adesivo (pari a 0,76 mm) e quello dell'aderendo in CFRP (pari a 2,5 mm).



*Fig. 3.7 modellazione CAD del provino metallico TEST 1*

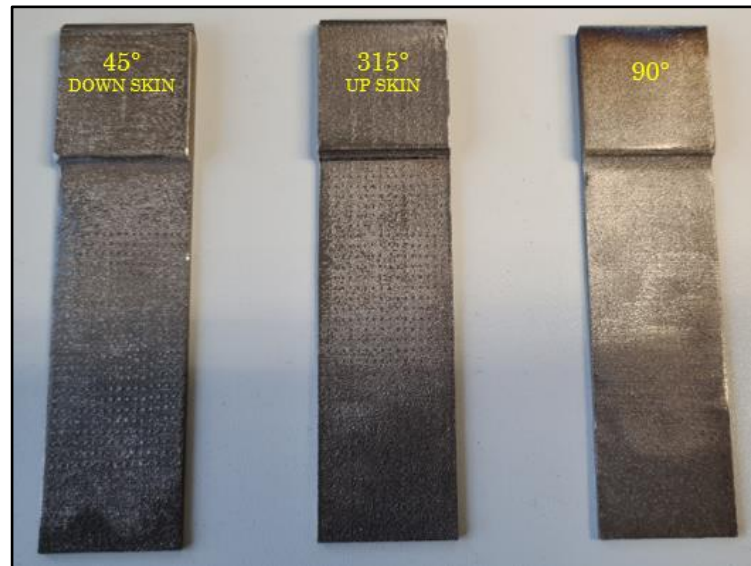
Grazie al Know-how dell'azienda Bercella s.r.l. è stato possibile fare una valutazione sulla zona di overlap in cui andare a sovrapporre i provini, in quanto si è visto con l'esperienza che utilizzando una zona di sovrapposizione lunga 25,4 mm in molti casi non era possibile valutare lo sforzo di taglio raggiunto nell'interfaccia aderendo-adesivo. Infatti, ciò che si vuole evitare è la presenza di "stock-break failure" ovvero la rottura dell'aderendo metallico o CFRP prima di raggiungere la tensione massima che causa rottura coesiva dell'adesivo. Ciò è ottenibile modificando lo spessore dei due substrati oppure modificando la zona di sovrapposizione, mantenendo lo spessore costante. Per evitare una modifica dimensionale del provino e di introdurre una componente flessionale al componente durante la prova statica a causa di un aumento di spessore, si è deciso che una possibile soluzione potesse essere quella di ridurre la zona di overlap da  $624 \text{ mm}^2$  ( $25,4 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm}$ ) a  $254 \text{ mm}^2$  ( $25,4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ) così che, a parità di carico applicato dalla macchina, lo sforzo massimo raggiungibile nella zona di interfaccia potesse essere superiore rispetto a quella dichiarata nel data sheet della colla.

Dopo aver effettuato queste considerazioni sulla zona di sovrapposizione si è proceduto con la messa in macchina del formato stl (solid triangulation language) del provino, tramite software CAM "Magics". Sapendo che la rugosità superficiale dei componenti generati tramite tecniche powder bed fusion risente della strategia di scansione, potenza del laser e orientazione del componente in macchina, si è deciso di mantenere costanti i primi due parametri e di valutare tre diverse configurazioni ottenibili con diverse orientazioni del componente rispetto alla piattaforma di costruzione:

- 45° Up-skin: provino disposto con superficie di interfaccia rivolta verso l'alto;

- 90°: provino disposto trasversalmente rispetto alla superficie di costruzione;
- 315° down-skin: provino disposto con superficie di interfaccia rivolta verso il basso.

La disposizione in macchina dei provini ha richiesto l'utilizzo di strutture di supporto per evitare distorsioni o eventuali deformazioni del componente durante la costruzione, nonostante il materiale utilizzato (lega di Titanio Ti6Al4V) fosse auto-supportante nelle tre configurazioni sopra descritte. I supporti utilizzati sono stati ideati in modo da essere facilmente rimovibili, utilizzando degli opportuni parametri per il diametro dei coni e la spaziatura. Inoltre, per saturare in maniera ottimale il volume di lavoro si è deciso di far ricadere i supporti sugli stessi provini, evitando che questi potessero interferire con le zone di overlap, in cui andare a valutare l'efficacia della rugosità superficiale. Il processo produttivo seguito per la realizzazione dei provini metallici è stato descritto nel paragrafo precedente e i risultati ottenuti, in seguito alla rimozione dei supporti, sono mostrati in figura 3.8.



**Fig. 3.8** provini as-built nelle tre configurazioni (45° down-skin, 315° up-skin, 90°)

I provini as-built hanno richiesto un trattamento termico di ricottura, con lo scopo di ridurre il tensionamento residuo, prima di rimuovere i componenti dalla piattaforma di costruzione col taglio a filo. Dopo aver eliminato i supporti sono state rilevate le rugosità superficiali  $R_a$  ed  $R_z$  dei provini sulla superficie di sovrapposizione tramite l'utilizzo di un rugosimetro portatile di precisione "MAHR: MarSurf RD 18".

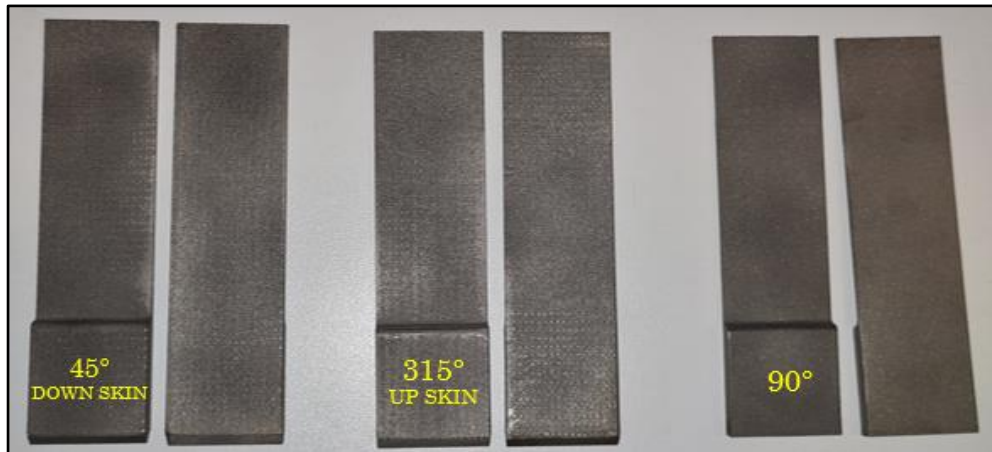
- $R_a$  rappresenta il valor medio aritmetico degli scostamenti (in valore assoluto) del profilo reale della superficie rispetto alla linea media;
- $R_z$  rappresenta la distanza tra due linee parallele alla linea media passanti mediamente fra i cinque picchi più alti e le cinque valli più basse, entro i limiti della lunghezza di base.

I provini, in seguito alla rimozione dei supporti e ad un processo di levigatura tramite smerigliatrice angolare (applicata su tutta la superficie ad esclusione della zona di sovrapposizione in cui si intende effettuare le misurazioni di rugosità), presentano un aspetto opaco con ancora le tracce dei supporti. Ad un primo controllo visivo si può notare come la superficie con rugosità più bassa è quella del provino disposto a 90°



rispetto alla piattaforma di costruzione, mentre quella con rugosità più bassa risulta essere quella del provino disposto a  $45^\circ$  *DOWN SKIN*.

Dopo aver effettuato le misurazioni di tutti i provini as-built si è proceduto con un processo di finitura tramite sabbatura al corindone e microsfere di vetro con lo scopo di levigare la superficie ed eliminare la polvere non sinterizzata rimasta attaccata alla superficie. I componenti trattati, presentati nella figura successiva fronte e retro, non mostrano più traccia dei supporti di costruzione e presentano un aspetto meno rugoso rispetto ai provini as-built.



**Fig. 3.9** provini Ti6Al4V in seguito a sabbatura al corindone/microsfere di vetro

Anche in questo caso sono state effettuate le rilevazioni delle rugosità superficiali di tutti i provini per ogni configurazione ed è stato riportato nella tabella successiva il valor medio di Ra ed Rz prima e dopo il processo di finitura.

	AS-BUILT		SABBIATURA AL CORINDONE E VETRO	
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
90°	13,85	88,23	12,61	78,85
45° DOWN-SKIN	31,47	185,04	36,00	188,22
315° UP-SKIN	21,61	134,50	20,90	124,04

**Tab. 3.2** rilevazioni delle rugosità superficiale sulla superficie di overlap

Dai valori tabellati si evince come effettivamente la rugosità superficiale, misurata nella zona di sovrapposizione, sia più bassa dopo il processo di finitura sia per la configurazione a  $90^\circ$  che per quella a  $315^\circ$  up-skin. Per quanto riguarda invece il provino orientato a  $45^\circ$  down-skin si rileva un aumento di Ra ed Rz, probabilmente perché nel caso as-built le rilevazioni col rugosimetro tenevano conto di polvere non

sinterizzata depositata tra le creste delle superfici lungo il segmento di campionamento e che, inseguito al processo di sabbiatura, sono state rimosse.

Il materiale utilizzato per l'aderendo in CFRP è il GG200P, tipicamente impiegato per applicazioni automobilistiche e aerospaziali. Per ottenere il componente richiesto per la prova, è stata prevista una compattazione degli strati di pre-preg tramite laminazione in autoclave, fino a raggiungere lo spessore nominale di 2,5mm. Il processo consiste nella disposizione dei tessuti di carbonio impregnati su di uno stampo, in cui è stato posizionato un pressure pad per garantire una distribuzione della pressione uniforme in fase di cura, in modo da ottenere uno spessore costante su tutto il pannello. Le superfici esterne del componente sono rivestite da uno strato di peel-ply, una pellicola protettiva che assicura la rugosità superficiale del composito, una volta rimossa. Di seguito vengono tabellate le caratteristiche generali del sistema resinoso, riportate nel data-sheet del materiale.

### TESSUTO DI CARBONIO IMPREGNATO

GG200P-DT120-47 (H 100 cm)

**DELTA**preg

Caratteristiche generali del sistema resinoso:

Natura del formulato	Epossidico termoidurente tenacizzato
Temperatura di cura	110 ÷ 145°C (vedi ciclo raccomandato)
Gel time	8 ÷ 13 min @ 120°C
Tg dopo ciclo di cura	115 ÷ 120°C dopo 90 min @ 120°C (1)
Viscosità	Alta (2)
Trasparenza	Discreta
Stabilità all'ingiallimento	Molto buona
Autoadesività	Molto buona
Applicazioni indicate	Dove siano richiesti: - Alta resistenza all'impatto - Buona trasparenza - Alto livello di finitura superficiale

**Tab. 3.3** caratteristiche generali del sistema resinoso contenuto nel tessuto GG200P [21]

Per quanto riguarda il tessuto impregnato, il tipo di filato è Carbonio ad alta resistenza 3K, con stile di tessitura *tela*. Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche da data-sheet del fornitore.

**DELTA**preg

Fili in ordito:	4,7 ÷ 4,9 fili/cm
Densità fili in trama:	4,8 ÷ 5,0 fili/cm
Contenuto di resina:	47 ± 3 % in peso
Spessore lamina	0,249 mm



**Tab. 3.4** caratteristiche generali del tessuto impregnato GG200P [21]

## Preparazione dei provini per “Adhesive joint”

Per la realizzazione del giunto incollato è stato utilizzato l’adesivo strutturale per applicazioni aerospaziali 3M™ Scotch-Weld™ 9323 B/A. Si tratta di un adesivo epossidico bicomponente che polimerizza a temperatura ambiente, o in forno a temperature poco elevate, con cui è possibile formare legami strutturalmente duri e resistenti agli urti. La scelta della colla è stata fatta insieme al consiglio esperto dell’Ing. Menoni, responsabile del reparto “testing” presso Bercella s.p.a., consapevoli del fatto che questa viene utilizzata anche per l’incollaggio di scocche delle monoposto DALLARA per la Formula 2 e dunque risulta un’ottima soluzione per componenti ad elevate prestazioni. Oltre a presentare un’ottima adesione per una vasta varietà di materiali, quali matalli, vetro, ceramici e compositi (CFRP e GFRP) l’adesivo utilizzato fornisce al giunto resistenza al taglio e alla pelatura estremamente elevata.

Principali caratteristiche dell’adesivo 9323 B/A utilizzato per i test:

- Vasto range di temperature di esercizio;
- Elevata resistenza al taglio e alla pelatura;
- Facilmente applicabile a temperatura ambiente;
- Elevata resistenza a temperatura ambientale.



*Fig 3.10 colla bicomponente 3M™ Scotch-Weld™ 9323 B/A (concessa da Bercella)*

Per l’applicazione della colla si è fatto riferimento al data sheet della colla e sono stati fatti opportuni accorgimenti per allineare i due substrati. Di seguito vengono riportate le linee guida seguite per l’applicazione della colla:

- Preparazione superfici: inizialmente è stato rimosso il peel ply (pellicola che permette il mantenimento ottimale della superficie e della rugosità) dal substrato in CFRP; successivamente con un calibro sono state tracciate le superfici di sovrapposizione per i due aderendi e per i tabs. Infine, le superfici di overlap sono state pulite con degli agenti sgrassanti e abrasivi.
- Applicazione: prima di poter applicare l’adesivo sui due substrati è stato necessario, trattandosi di un adesivo bicomponente, preparare la miscela considerando le opportune proporzioni in peso (100:27 rispettivamente per parte B ed A). Successivamente, tramite l’ausilio di una spatola, è stata applicata la colla sulle superfici degli aderendi: da normativa ASTM veniva riportato uno spessore dello strato adesivo di 0,76 mm, che però non è stato possibile garantire senza l’ausilio di microsfero di vetro o fili di rame dello stesso spessore. Pertanto, lo spessore finale della colla è stato di circa un decimo di millimetro, valore che più si avvicina a quelli reali per applicazioni automobilistiche o aerospaziali.
- Curing: la fase di indurimento della colla può essere effettuata con diverse soluzioni:
  - 14 giorni a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ;

- 2 ore a  $65 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- 15 minuti a  $100 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Nel nostro caso il ciclo di cura ha previsto una soluzione intermedia tra gli ultimi due riportati, ovvero 45 minuti a  $80 \pm 2^\circ\text{C}$ . I provini sono stati disposti in una piattaforma distaccante cercando di mantenere l'allineamento durante l'intero ciclo di cura e lo spessore costante della colla mediante l'utilizzo di opportune pinze.



*Fi g. 3.11 provini allineati con pinze di fissaggio e disposti su un pannello per il ciclo di cura in forno*

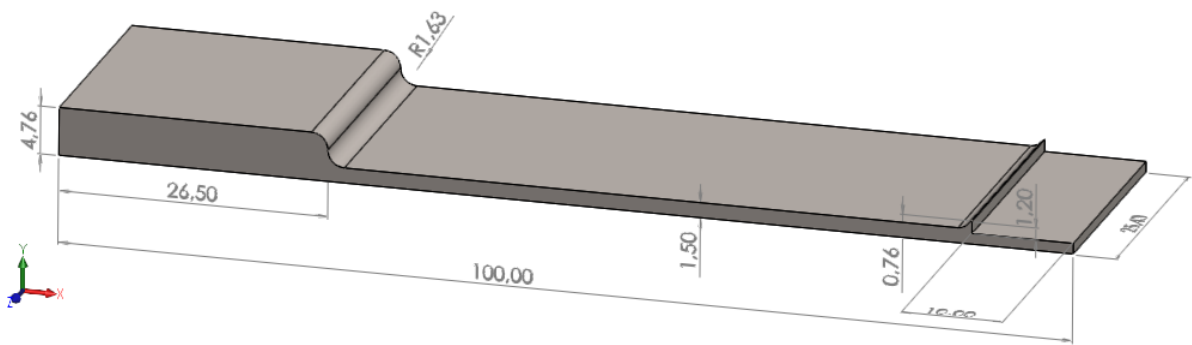
- Pulizia: dopo aver terminato il ciclo di cura i provini è stato necessario rimuovere la colla in eccesso con opportuni solventi ed opportune attrezzature come lime tonde. Il giunto adesivo finale si presenta nella configurazione rappresentata in figura 3.10.



*Fi g. 3.12 giunto incollato*

### 3.3 TEST 2: influenza di features superficiali “LATTICE STRUCTURES”

Il test successivo è stato eseguito con l'obiettivo di ottenere un incremento delle prestazioni meccaniche all'interfaccia, sfruttando una maggiore superficie di contatto aderendo-adesivo. Per ottenere tale risultato si è deciso di modificare la geometria del provino, inizialmente utilizzato per il test 1, riempimento la superficie predisposta al solo adesivo con strutture lattice personalizzate. Inizialmente lo spessore del provino metallico, in prossimità della zona di overlap, era di 1,5 mm e la modifica geometrica ha fatto sì che il nuovo provino senza strutture fosse di 1,06 mm. Tuttavia l'introduzione delle lattice, con spessore massimo di 1,2 mm, porta la zona di overlap ad uno spessore finale di 2,26 mm (lo stesso spessore nel test 1 era ottenuto sommando lo spessore del provino metallico pari a 1,5 mm allo spessore occupato dallo strato adesivo pari a 0,76 mm). Di seguito viene riportato il modello CAD del provino metallico in assenza di strutture lattice. Dalla figura 3.11 si nota con in prossimità della zona in cui andrà inserito il pannello contenente le strutture lattice sia stato disegnato un raccordo che ne garantirà la corretta realizzazione con la tecnica *DMLS*.

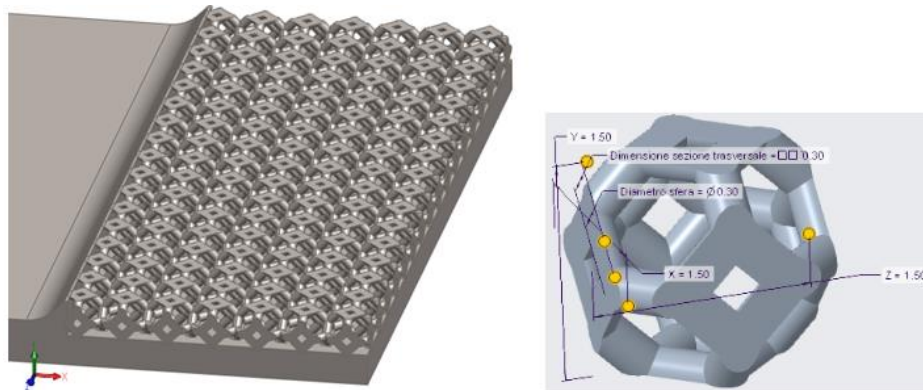


**Fig. 3.13** modellazione CAD del provino metallico TEST 2

L'applicazione di strutture lattice al provino metallico ha richiesto l'utilizzo di un software di progettazione CAD 3D: *Creo Parametric*. Si tratta di un prodotto di modellazione parametrica con cui è possibile realizzare strutture reticolari 2D e 3D a geometria variabile applicabili a superfici piane o curve. Si è proceduto importando il provino metallico sulla piattaforma “*Creo*” e sostituendo al pannello di dimensioni pari a  $10\text{mm} * 25,4\text{mm} * 1,2\text{mm}$  le strutture lattice generate. Per la realizzazione di queste strutture si è scelto di modellarle in modo da ottenere una cella unitaria finale che meglio contenesse l'adesivo al suo interno. Inoltre, si è deciso di mantenere costanti la dimensione e la geometria delle sezioni delle trabeccole che vanno a costituire la cella (sezione circolare avente diametro pari a  $0,35\text{mm}$ ). La scelta delle strutture lattice è riconducibile a tre tipologie di partenza: ottagonale, cubica a facce centrate, star. Di seguito vengono riportati i pannelli contenenti le strutture lattice con accanto la cella unitaria di partenza.

### 1. Ottagonale

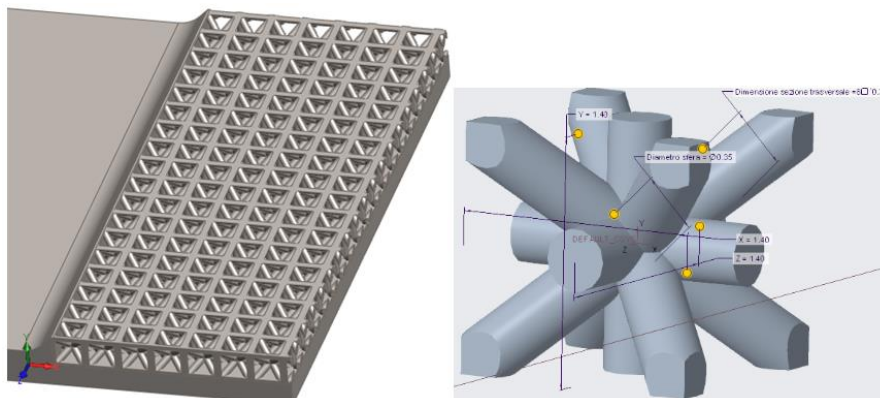
La struttura ottagonale presenta un diametro della sfera pari a  $0,30\text{ mm}$  e una dimensione dell'unità cellulare pari a  $1,5\text{ mm} * 1,5\text{ mm} * 1,5\text{ mm}$ . L'altezza massima del pannello risulta pari a  $1,2\text{ mm}$ , pertanto la struttura viene automaticamente tagliata e adattata alle dimensioni del pannello.



**Fig. 3.13.1** struttura lattice ottagonale

### 2. Cubica a facce centrate CFC1

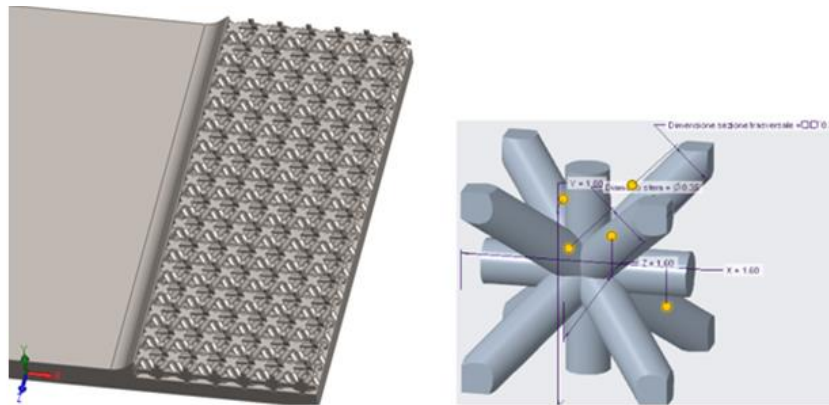
La struttura cubica a facce centrate CFC1 è stata ottenuta considerando un diametro della sfera e della sezione trasversale pari a  $0,35\text{ mm}$ . L'unità cellulare è stata modificata considerando esclusivamente una travatura interna orizzontale, una travatura interna verticale ed una angolare. La dimensione dell'unità cellulare è pari a  $1,4\text{ mm} * 1,4\text{ mm} * 1,4\text{ mm}$  e anche in questo caso viene adattata sul pannello lungo i tre assi di riferimento.



**Fig. 3.13.2** struttura lattice cubica a facce centrate CFC1

### 3. Cubica a facce centrate CFC2

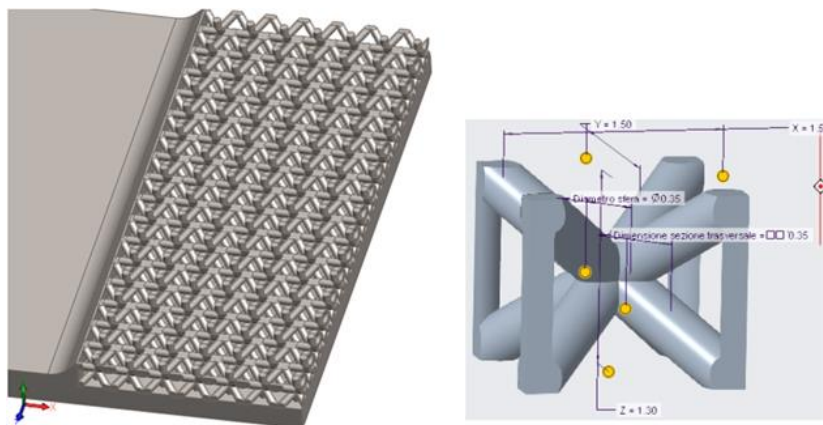
La struttura cubica a facce centrate CFC2 presenta un diametro della sfera e della sezione trasversale pari a  $0,35\text{ mm}$ . La travatura utilizzata per la realizzazione dell'unità cellulare è la stessa della CFC1, tuttavia presenta una modifica sulle dimensioni della cella che risulta pari a  $1,6\text{ mm} * 1,6\text{ mm} * 1,6\text{ mm}$ .



**Fig. 3.13.3** struttura lattice cubica a facce centrate CFC2

#### 4. Cubica a facce centrate CFC3

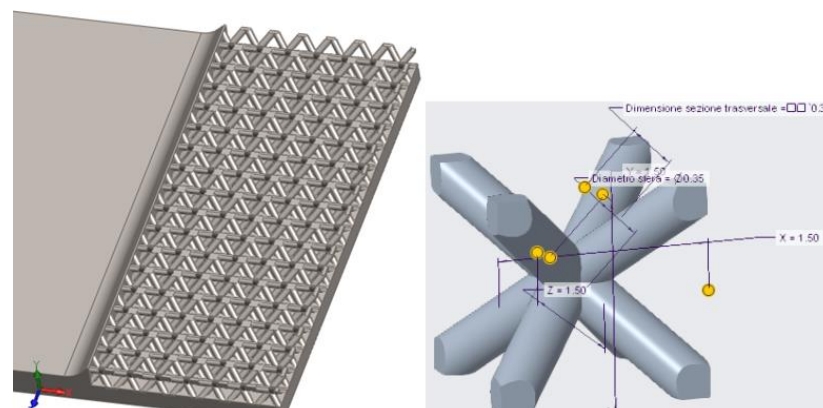
La struttura CFC3 è stata realizzata considerando un diametro della sfera e della sezione trasversale pari a  $0,35\text{mm}$ . L'unità cellulare presenta una travatura esterna verticale ed una travatura angolare. La dimensione dell'unità cellulare è pari a:  $1,5\text{mm} * 1,5\text{mm} * 1,3\text{mm}$ .



**Fig. 3.13.4** struttura lattice cubica a facce centrate CFC3

#### 5. STAR

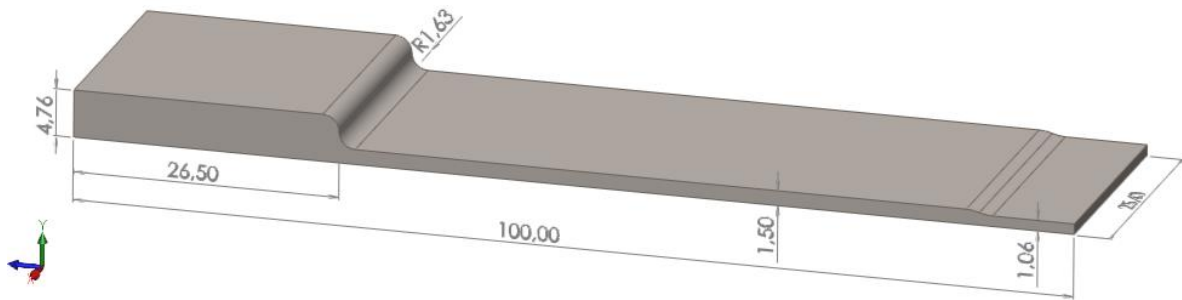
La struttura STAR presenta un diametro della sfera e della sezione trasversale pari a  $0,35\text{mm}$ . Per la realizzazione dell'unità cellulare, di dimensioni pari a  $1,5\text{mm} * 1,5\text{mm} * 1,5\text{mm}$ , è stata utilizzata solamente una travatura angolare.



**Fig. 3.13.5** struttura lattice STAR

### 3.4 TEST 3: influenza di features superficiali “GRIP STRUCTURES”

Il test 3 è stato condotto con lo stesso obiettivo del test 2, ovvero quello di ottenere un incremento delle prestazioni meccaniche all'interfaccia aderendo-adesivo. In particolare, si cerca di ottenere dei valori di sforzi di taglio nella zona di overlap superiori a quelli dichiarati nel data-sheet dell'adesivo utilizzato (pari a 27 MPa). Per ottenere i risultati sperati è stata effettuata un'ulteriore modifica all'aderendo metallico di partenza, in prossimità della zona di interfaccia. Il nuovo provino è stato disegnato considerando un pannello di dimensioni pari a  $25,4\text{mm} * 10\text{mm} * 1,2\text{mm}$ , in cui aggiungere delle features superficiali col duplice scopo di aumentare la superficie di contatto con l'adesivo e di compenetrare il substrato composito, intrecciando le fibre tra di esse. Di seguito, in figura 3.12, viene rappresentato il nuovo provino in assenza del pannello contenente le features superficiali.



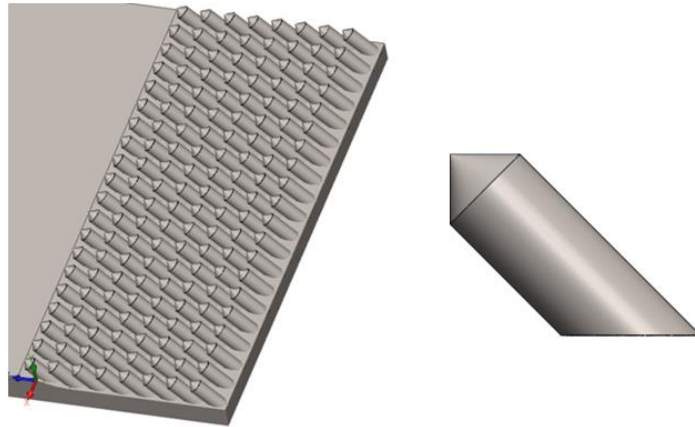
**Fig. 3.14** modellazione CAD del provino metallico TEST

Le features superficiali sono state disegnate mediante software di modellazione CAD “solidworks”. La geometria è stata studiata in modo che potesse agganciare la fibra del substrato in composito ed è stata successivamente applicata al provino metallico mediante ripetizione lineare lungo gli assi di riferimento x e z. Di seguito vengono riportate le cinque configurazioni di strutture GRIP, utilizzate per il test.

#### 1. Cono a 45°

La geometria cono a 45° presenta una sezione di base circolare dal diametro di  $0,27\text{ mm}$  ed è inclinata di 45° rispetto al piano del pannello. L'altezza massima raggiunta dalla struttura è la stessa utilizzata per le altre geometrie, ovvero pari a  $1,2\text{ mm}$ . La distanza tra una struttura e la successiva è pari a  $0,57\text{ mm}$  lungo l'asse x e  $0,24\text{ mm}$  lungo l'asse z

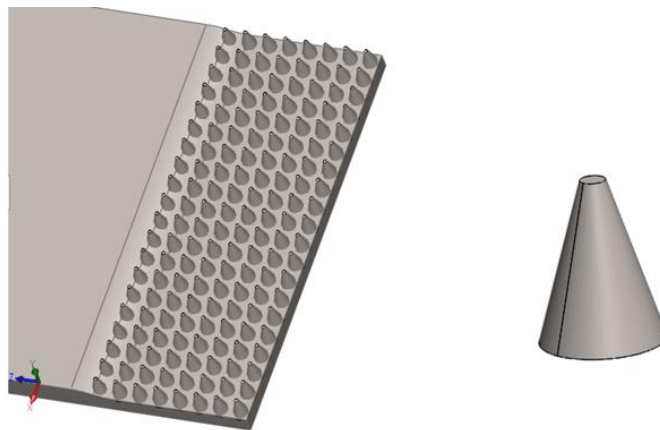




**Fig. 3.14.1** struttura GRIP: cono inclinato a  $45^\circ$

### 2. Cono verticale

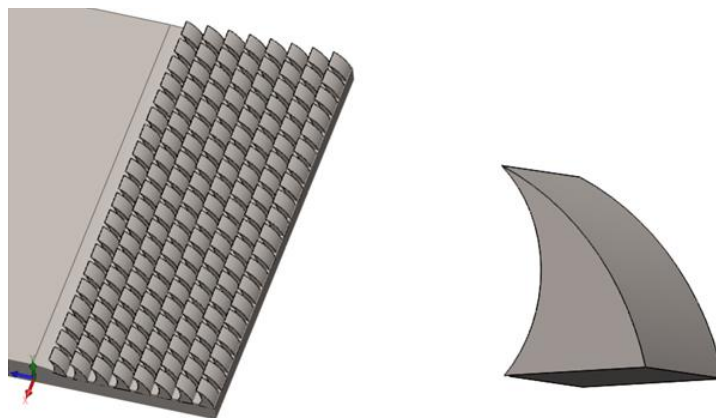
La struttura presenta un diametro maggiore alla base pari ad  $1\text{ mm}$  ed un diametro minore di  $0,2\text{ mm}$ . La struttura è spaziata lungo l'asse x di  $0,28\text{ mm}$  e lungo l'asse z di  $0,25\text{ mm}$



**Fig. 3.14.2** struttura GRIP: cono verticale

### 2. Dente orientato

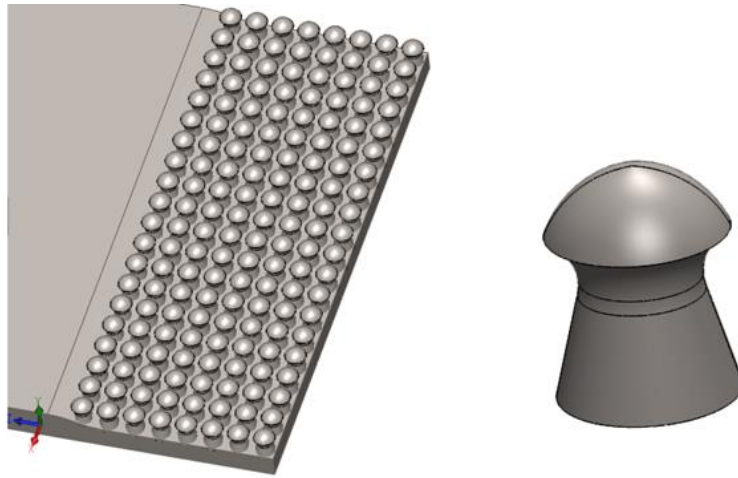
La struttura seguente presenta una sezione di base quadrata di lato pari ad  $1\text{ mm}$  e viene spaziata lungo l'asse x di  $0,28\text{ mm}$  e lungo l'asse z di  $0,26\text{ mm}$ .



**Fig. 3.14.3** struttura GRIP: dente orientato

#### 4.Pin

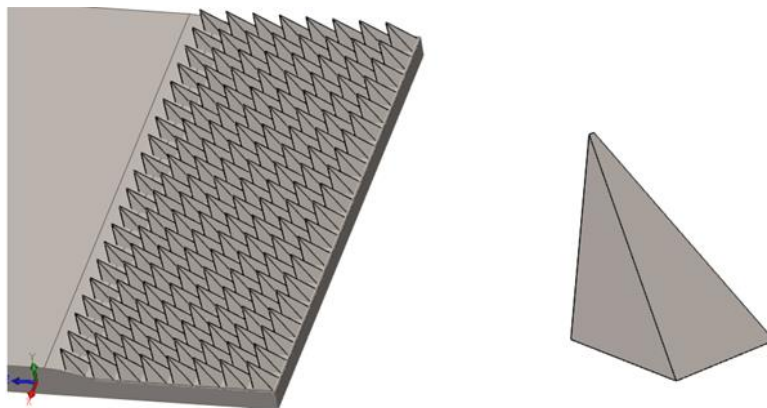
La struttura pin presenta un diametro di base pari ad 1 mm ed è spaziata lungo l'asse x di 0,28 mm e lungo l'asse z di 0,25 mm.



*Fig. 3.14.4 struttura GRIP: pin*

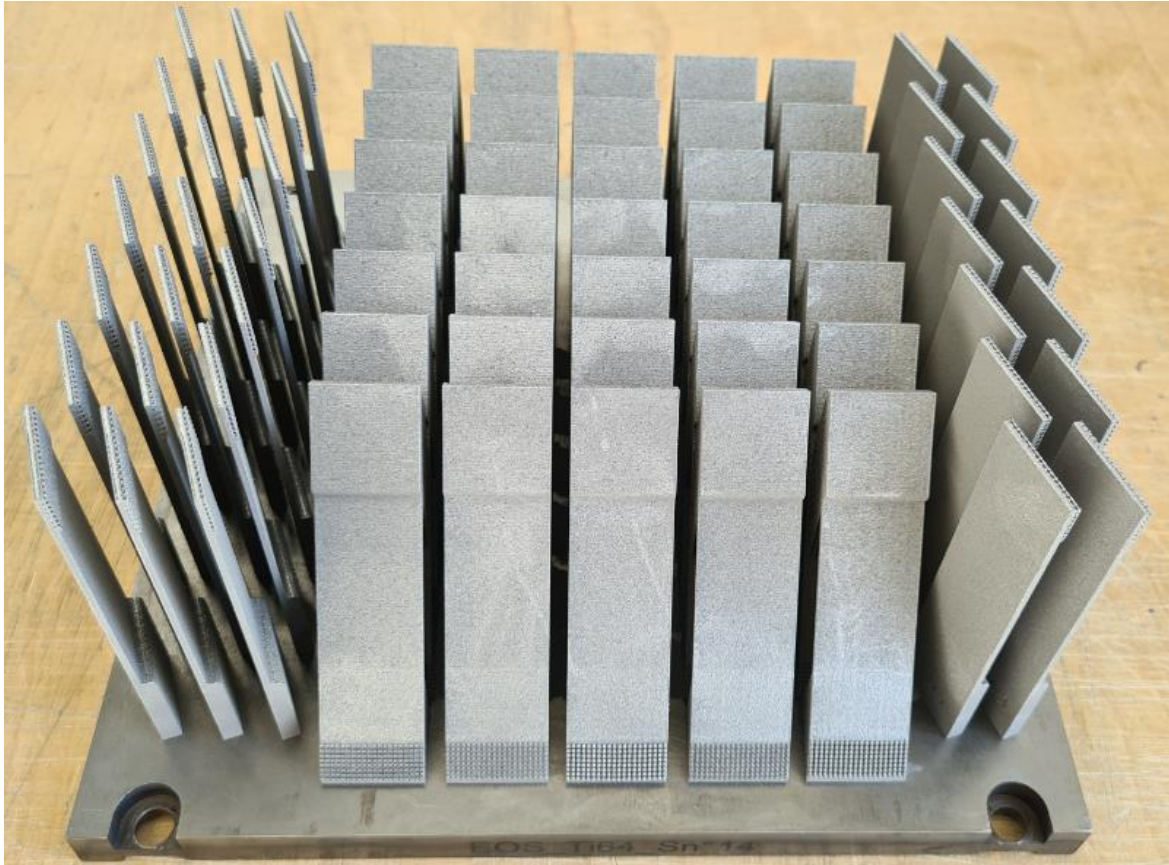
#### 5.Piramide

La struttura seguente presenta una sezione di base quadrata di lato pari ad 1 mm e viene spaziata lungo l'asse x di 0,28 mm e lungo l'asse z di 0,25 mm.



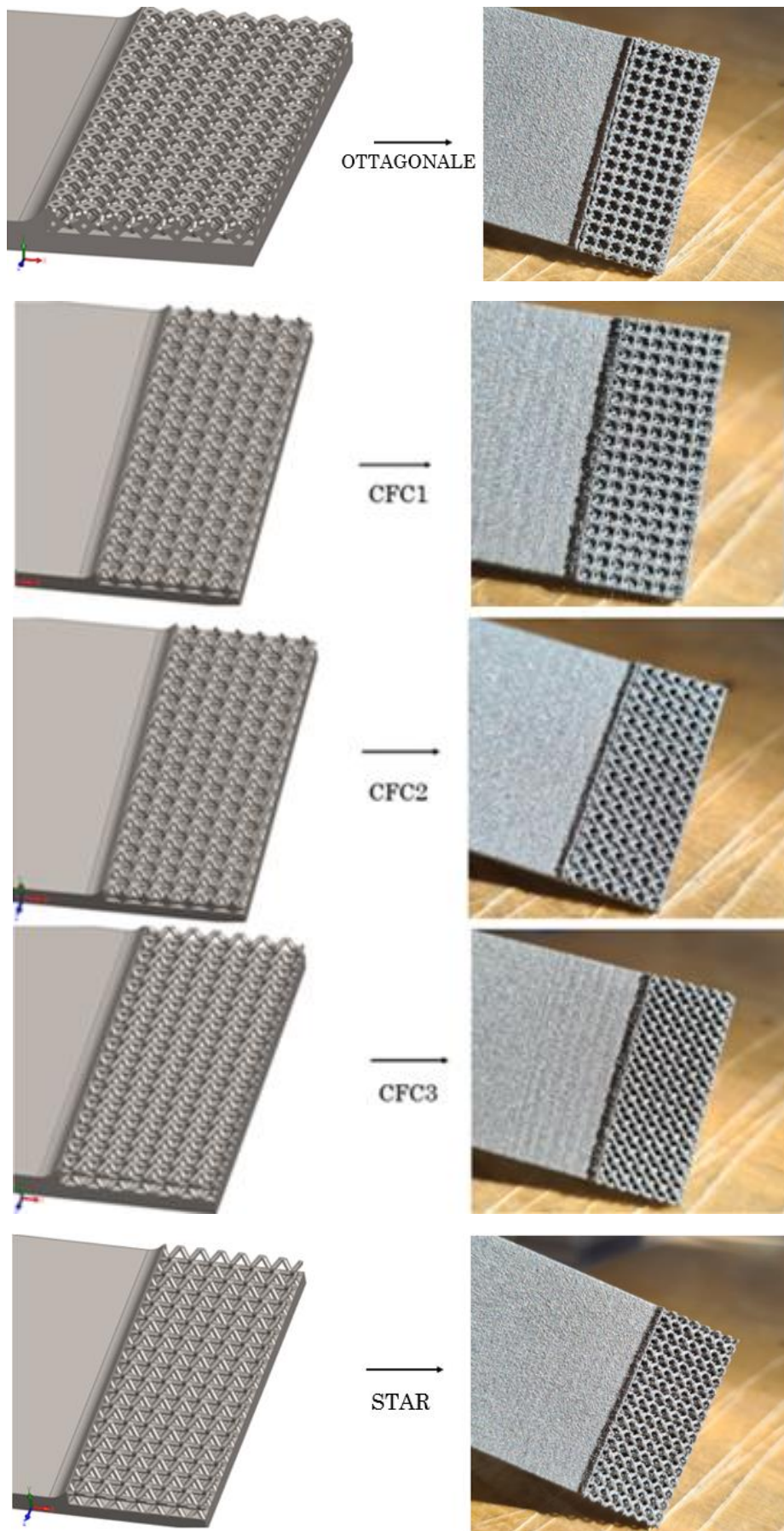
*Fig. 3.14.5 struttura GRIP: piramide*

I provini in Ti6Al4V sono stati realizzati con la tecnica DMLS sfruttando gli stessi principi utilizzati per la produzione dei provini metallici del *test 1* e lo stesso ciclo di lavoro trattato nel capitolo 3.1. I componenti contenenti strutture grip nella zona di sovrapposizione sono stati disposti sulla piattaforma di costruzione con orientamento a 45° in modo da garantire una crescita lungo l'asse z delle strutture personalizzate. Per ottimizzare il volume a disposizione all'interno della camera di lavoro si è deciso, inoltre, di sovrapporre tra di loro i provini, facendo in modo che i supporti non ricadessero sulle strutture grip. Per quanto riguarda invece i provini contenenti le strutture lattice si è deciso di disporli a 90° rispetto alla piattaforma, sfruttando il raccordo fatto in prossimità della zona di overlap, per garantire la corretta realizzazione delle unità cellulari. Di seguito viene riportato il *job* contenente i provini as-built destinati all'incollaggio, prima del trattamento termico e del taglio a filo.

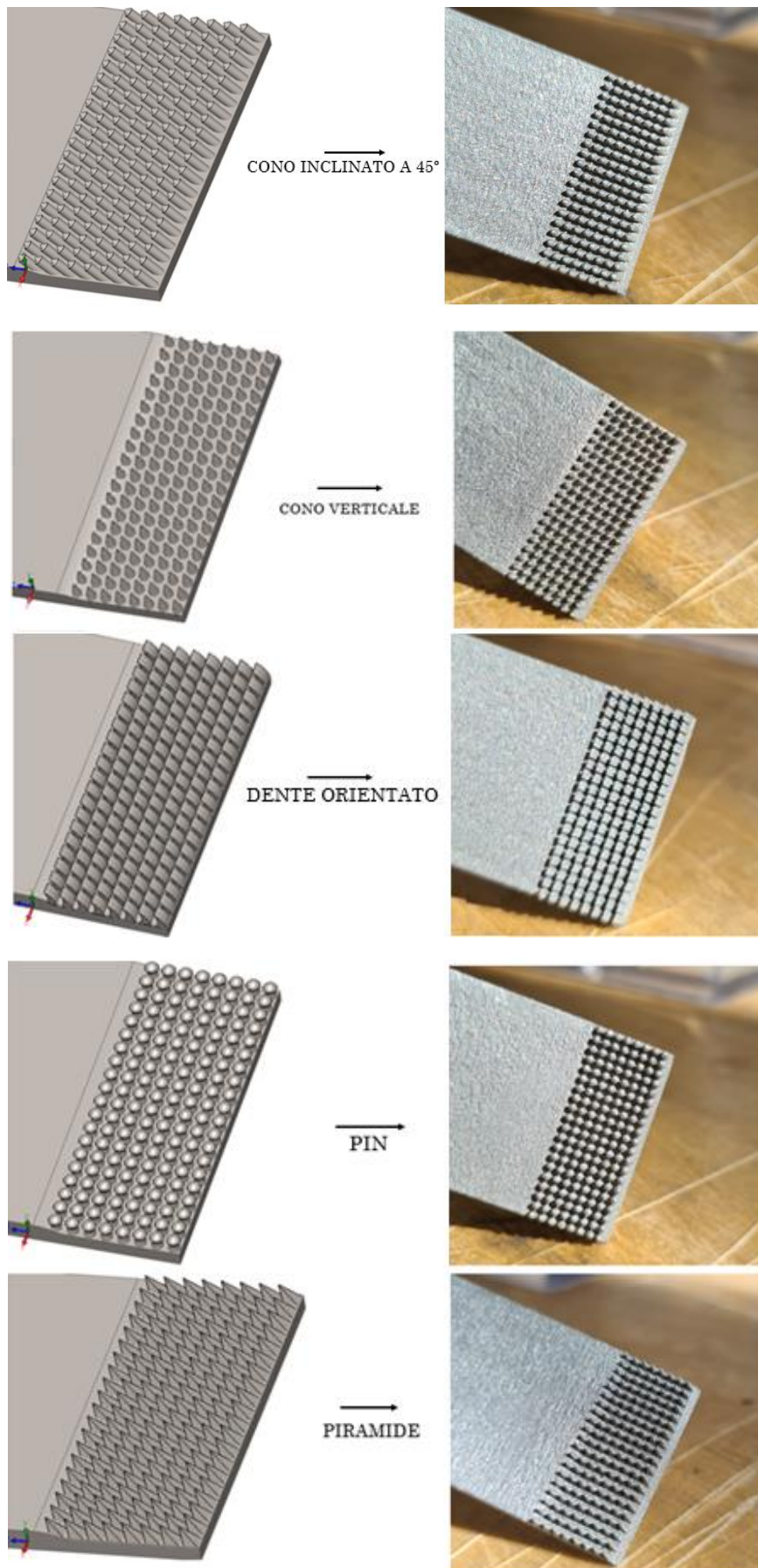


**Fig.3.15** produzione provini Ti6Al4V con tecnica DMLS tramite macchina EOS M-280

Dalla figura si nota come siano stati realizzati sette provini per ogni configurazione in modo da prevedere sia le cinque prove con la macchina di trazione, come richiesto da normativa ASTM 5868-01, sia i possibili scarti, dovuti a difetti di incollaggio. Anche in questo caso è stato previsto un trattamento termico di ricottura e un trattamento di finitura con corindone e microsferi di vetro, in seguito alla rimozione dei supporti. Nella figura successiva vengono messi a confronto i modelli CAD delle geometrie realizzate mediante software di modellazione 3D e le rispettive geometrie in seguito alla produzione DMLS e ai processi di finitura.



*Fig.3.16 geometrie lattice: confronto tra modelli CAD e rispettivi componenti realizzati*



**Fig.3.17** geometrie grip: confronto tra modelli CAD e rispettivi componenti realizzati

## 4 Giunzione co-curata: laminazione in autoclave

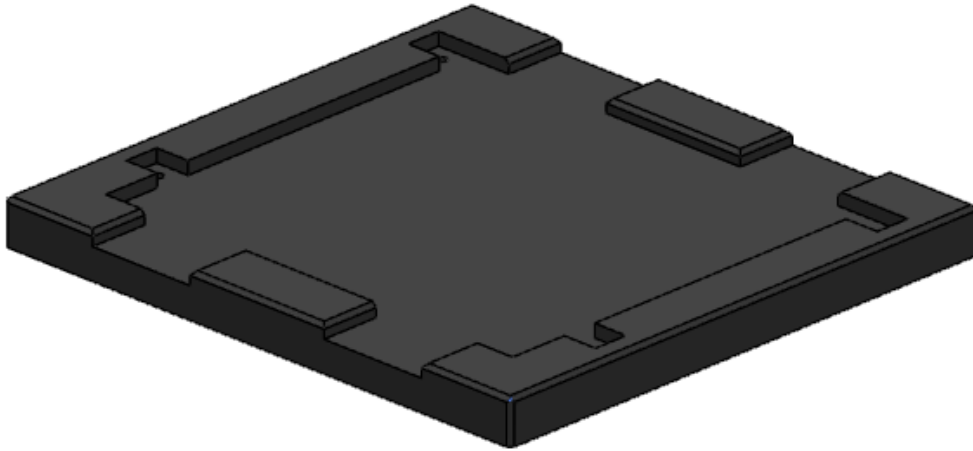
La laminazione in autoclave è il processo tecnologico tramite cui si può ottenere una compattazione degli strati di prepreg disposti su uno stampo, che a sua volta conferisce al composito la forma finale desiderata. La progettazione dello stampo deve tenere in considerazione sia il corretto ciclo di cura, per ottenere un pannello CFRP compatto, sia una fuoriuscita direzionale della resina in eccesso contenuta nei fogli di prepreg, per poter realizzare il giunto ibrido Ti6Al4V-CFRP. Il materiale utilizzato per lo stampo dipende dai particolari che si vogliono realizzare e dal numero di cicli di cura da affrontare. Il progetto iniziale prevede la valutazione di giunti contenenti strutture *lattice* e *grip*, presentati nel paragrafo precedente, e dunque la maschera di laminazione deve essere realizzata in modo da considerare almeno un ciclo di cura per ogni configurazione di provino metallico. Dati gli elevati valori di pressioni a cui è sottoposto il sacco, all'interno del quale è inserito lo stampo, si cerca di evitare presenza di porosità e di considerare l'eventuale dilatazione dello stampo trattandosi di un processo che sfrutta elevate temperature per attivare le reazioni di polimerizzazione della resina termoidurente. Il processo di realizzazione del laminato in composito può essere schematizzato nelle seguenti fasi [22]:

- Estrazione del rotolo di prepreg dal frigorifero a temperatura controllata;
- Taglio: il rotolo viene portato all'interno di una clean room (ambiente in cui vi è un costante controllo della temperatura, umidità e pulizia) e portato a temperatura ambiente. Successivamente, si procede con la fase di taglio semiautomatizzata con macchine fustellatrici con lo scopo di tagliare i fogli di prepreg della forma desiderata ed evitare sprechi.
- Laminazione: dopo aver applicato un agente distaccante, i fogli di prepreg vengono disposti uno sopra l'altro su uno stampo aperto fino a raggiungere lo spessore voluto. Per evitare la presenza di sacche d'aria tra gli strati si applica una piccola pressione manuale con dei rulli o spatole.
- Sacco a vuoto: prima di inserire la maschera all'interno del sacco a vuoto si procede con la stesura di uno strato di peel ply sul laminato in modo da garantire una rugosità superficiale ottimale ed evitare il danneggiamento della fibra di carbonio. Il sacco in Nylon presenta delle valvole direttamente collegate all'autoclave per garantire i corretti valori di pressione e temperatura. Infine, viene applicato un sigillante per il sacco ("vacuum sealer-tape") con cui si assicura una tenuta ermetica fra lo stampo ed il sacco.

### 4.1 Progettazione dello stampo e attrezzatura ausiliaria

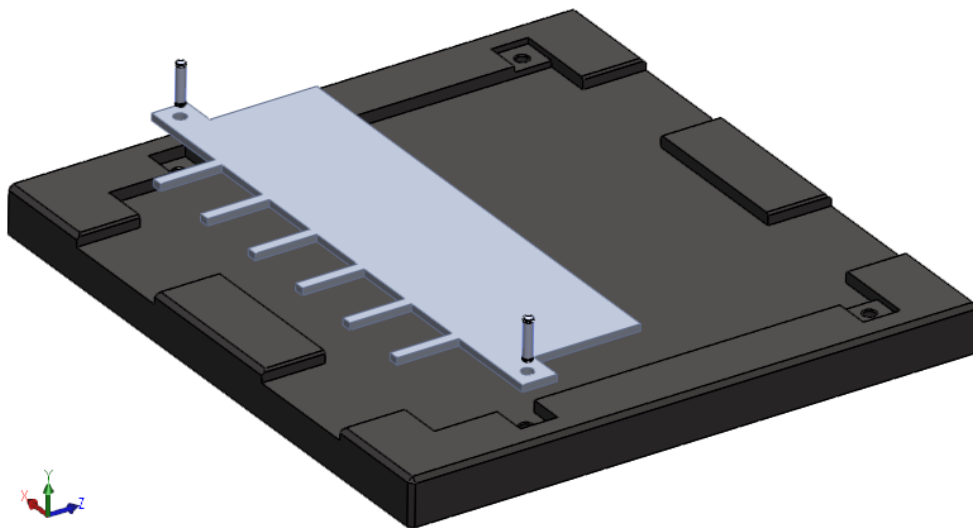
La progettazione dello stampo per la realizzazione della giunzione ibrida deve garantire non solo l'alloggiamento del CFRP ma anche dei provini metallici. Essendo un processo sottoposto ad elevate pressioni si è deciso di realizzare non più singoli provini ma un pannello contenente sette provini, con l'obiettivo di evitare deformazioni in fase di cura. In figura 4.1 viene presentato il *cad 3D* della maschera di laminazione,

in cui successivamente verranno inseriti: il pannello CFRP, il pannello Ti-6Al-4V, i laminati di supporto, i tabs per l'allineamento e le spine cilindriche di centraggio.



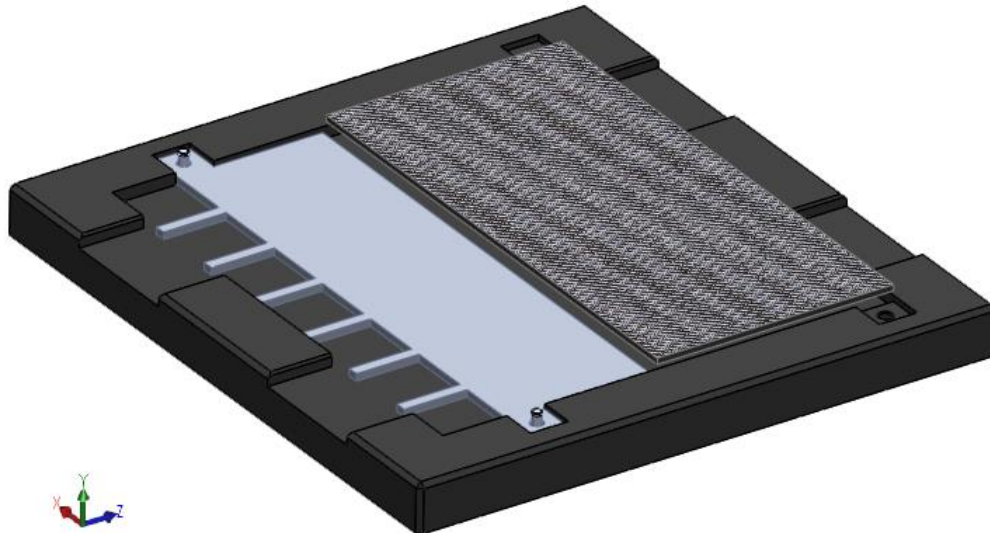
*Fig. 4.1 CAD 3D dello stampo per laminazione in autoclave*

Di seguito viene riportato il processo di *layup* dei componenti dello stampo, a partire dalla disposizione del supporto per l'aderendo metallico. Il laminato di supporto è stato realizzato con uno spessore tale da garantire la giusta altezza dell'aderendo Ti6Al4V rispetto al pannello in CFRP e sono state create delle tasche con lo scopo di poter inserire all'interno la faccia inferiore del provino destinata all'afferraggio delle pinze con la macchina di trazione. Per bloccare sia il laminato di supporto che il pannello contenente i provini metallici sono state inserite due spine cilindriche di fissaggio per fori dal diametro  $\varnothing = 5,30 \text{ mm}$ .



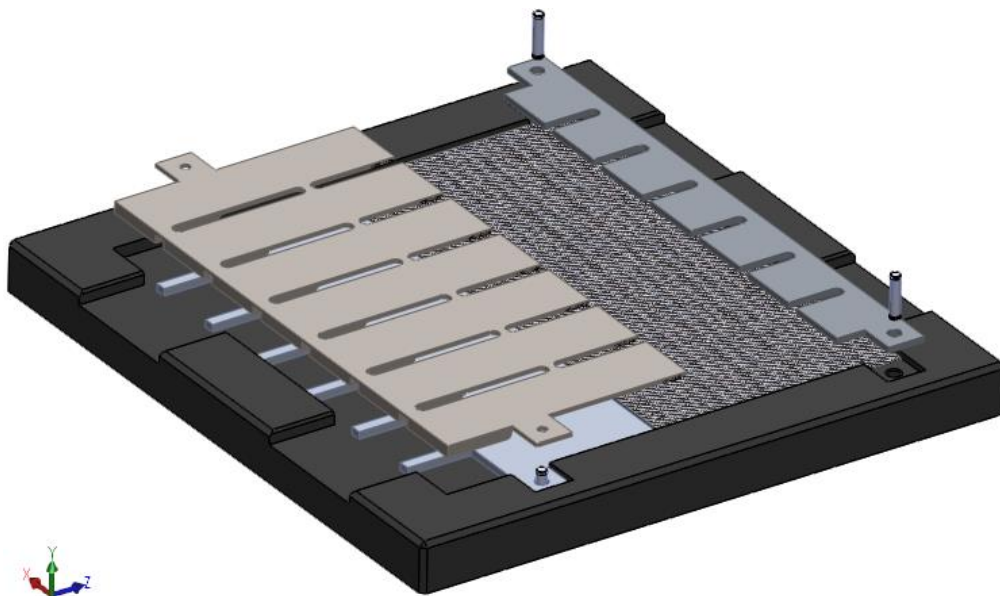
*Fig. 4.2 posizionamento del laminato di supporto per l'aderendo metallico*

Il passo successivo consiste nella disposizione del pannello CFRP contenente i fogli pre-impregnati. Sono state create delle tasche simmetriche nello stampo per permettere la fuoriuscita della resina in eccesso contenuta nella matrice del materiale composito.



**Fig. 4.3** layup aderendo in composito

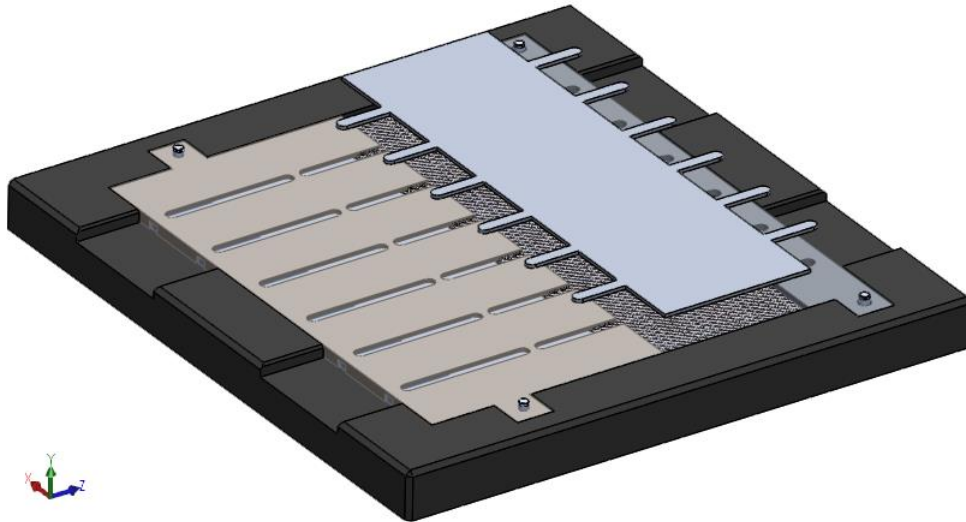
Una volta posizionato il pannello CFRP sono stati disposti i tabs in alluminio, per garantire l'allineamento del giunto a singola sovrapposizione nella macchina di trazione, e due spine cilindriche per evitare spostamenti durante il ciclo di cura in autoclave. Il passo successivo consiste nella disposizione del pannello Ti6Al4V in modo che le strutture *lattice/grip* siano a favore dell'aderendo CFRP così da ottenere la giunzione. La lunghezza dello stampo è di 190 mm, in quanto la lunghezza degli aderendi è di 100 mm e la zona di sovrapposizione considerata pari a 10 mm.



**Fig. 4.4** posizionamento tabs, fissaggio con spine cilindriche ed alloggiamento aderendo metallico

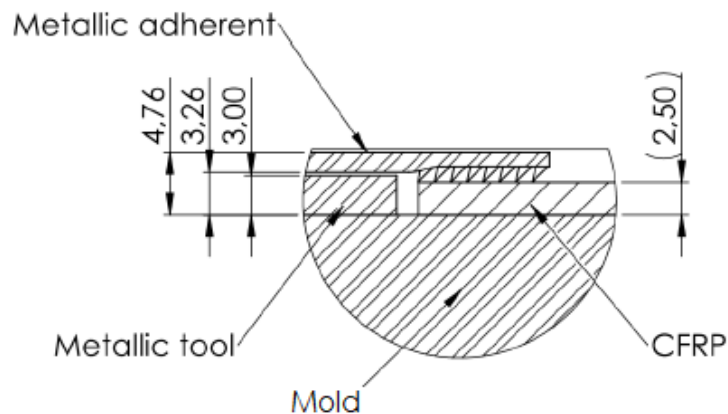
L'ultimo step consiste nella disposizione del lamierino metallico, sovrapposto sul pannello in composito, per ottenere una compressione dei fogli di prepreg ed assicurarsi una corretta fuoriuscita della resina termoidurente dopo aver posto sotto pressione lo stampo.





**Fig. 4.5** *posizionamento lamierino per ottenere compressione dei prepreg*

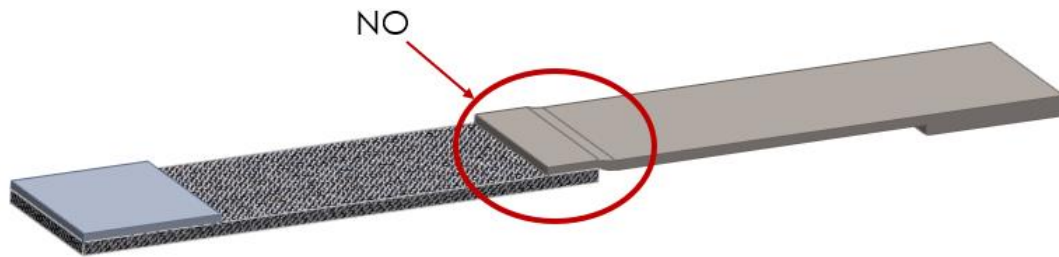
L'obiettivo del ciclo di cura in autoclave è quello di ottenere una fuoriuscita della resina in eccesso contenuta nella matrice e direzionarla verso la zona di interfaccia, dove si realizzerà l'adesivo necessario a garantire la tenuta meccanica del giunto. Per tale motivo risulta fondamentale soffermarsi sulla zona di overlap, di cui è stato riportato il dettaglio nella figura 4.6.



**Fig. 4.6** *vista in dettaglio della zona di overlap*

Dalla figura si nota come il *tool* metallico, inserito per garantire la giusta altezza del pannello Ti6Al4V rispetto al pannello in composito, abbia uno spessore di 3,00 mm, mentre l'altezza dell'aderendo risulta di 3,26 mm. Questa scelta è dovuta al fatto di poter ottenere una compenetrazione delle strutture *lattice/grip* all'interno dell'aderendo in CFRP ed evitare dunque una possibile deformazione dell'aderendo metallico durante il ciclo di cura in autoclave.

Ciò che si vuole infatti evitare è una situazione simile a quella evidenziata in figura 4.7 dove, a causa dell'elevata pressione a cui è sottoposto il sacco in nylon, si genera una deformazione dell'aderendo metallico.

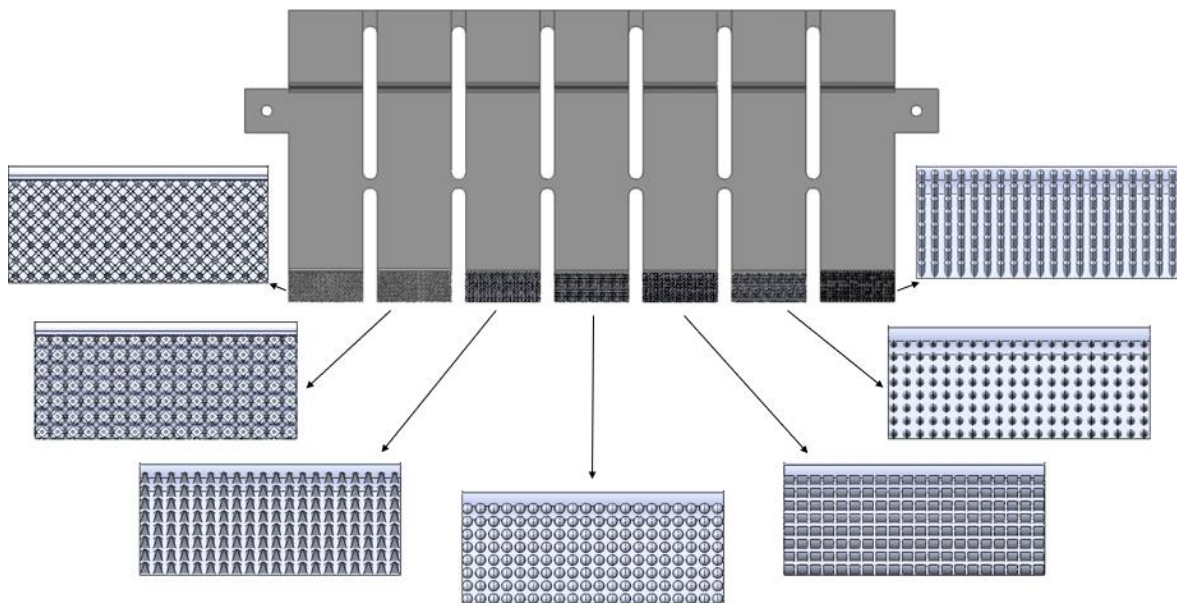


**Fig. 4.7** condizione di giunzione indesiderata: deformazione aderendo metallico

Per evitare tale condizione di deformazione si è deciso pertanto di considerare un ciclo di cura preventivo in cui valutare il comportamento degli aderendi metallici a seconda delle features superficiali che sono state realizzate. Dal primo ciclo di prova si potranno fare le prime considerazioni su:

- Corretta quantità di strati di prepreg sovrapposti;
- Spessore del tool metallico di supporto al pannello in Ti6Al4V;
- Compenetrazione delle features superficiali.

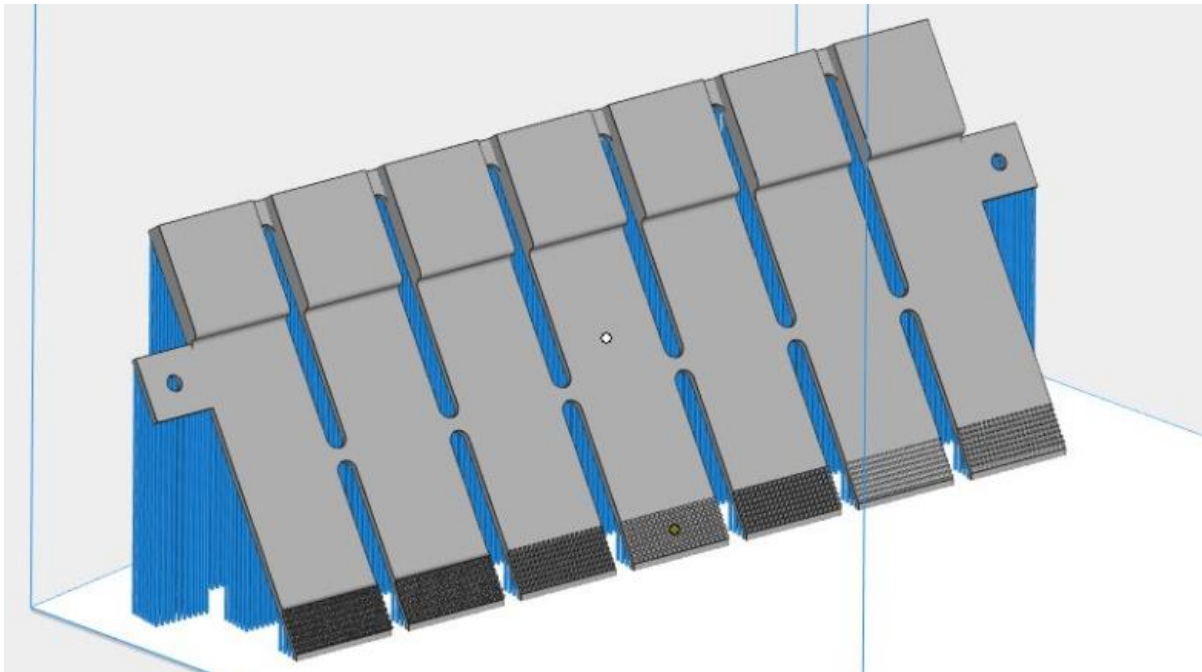
Se da un primo controllo visivo si riscontra che una particolare configurazione non ha raggiunto le condizioni target (provino metallico non deve deformarsi) allora quella struttura non verrà presa in carico nei successivi cicli di cura e verrà eventualmente sostituita. Di seguito viene riportato il pannello misto, contenente cinque strutture *grip* e due strutture *lattice*, che verrà utilizzato per il primo ciclo di laminazione.



**Fig. 4.8** vista 2D del pannello Ti6Al4V contenete diverse configurazioni di strutture lattice/grip per il primo ciclo di cura in autoclave

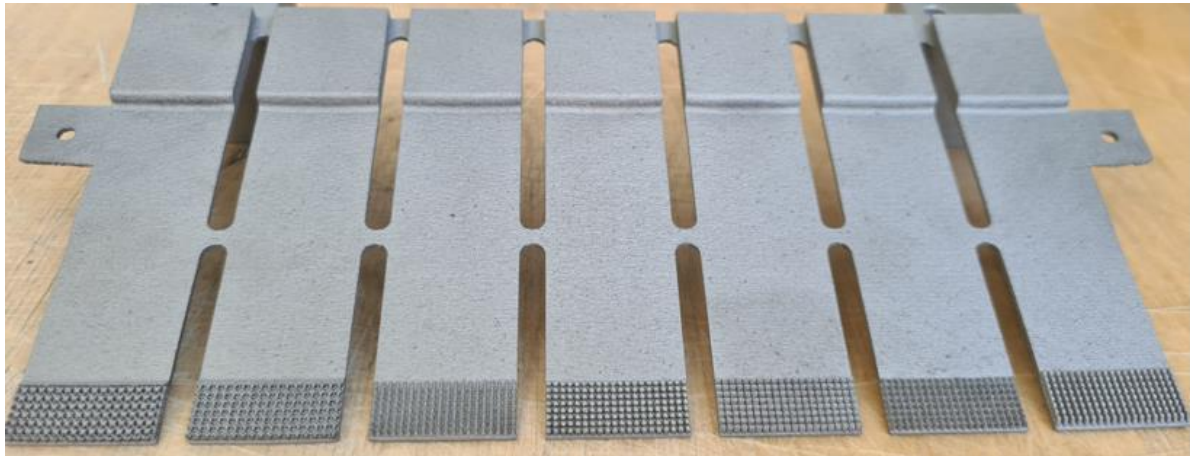
La realizzazione di tutta l'attrezzatura necessaria per i cicli di cura in autoclave è avvenuta mediante operazioni per asportazione di truciolo, per mezzo di macchine a controllo numerico computerizzato (questa scelta scaturisce dal fatto di dover ottenere oggetti con la massima precisione e che rientrassero nelle tolleranze dimensionali prestabilite). Per quanto riguarda il pannello contenente i provini in

Ti6Al4V si è proceduto con la tecnica DMLS, tramite la macchina EOS M-280, con cui sono stati realizzati tutti gli altri provini singoli. Il pannello contiene sia strutture *lattice* che *grip*, pertanto, si è deciso di orientarlo a 45° rispetto alla piattaforma di costruzione, in modo da garantire la corretta crescita delle strutture lungo l'asse z.



**Fig. 4.9** job pannello Ti6Al4V con supporti, disposto a 45° rispetto alla piattaforma.

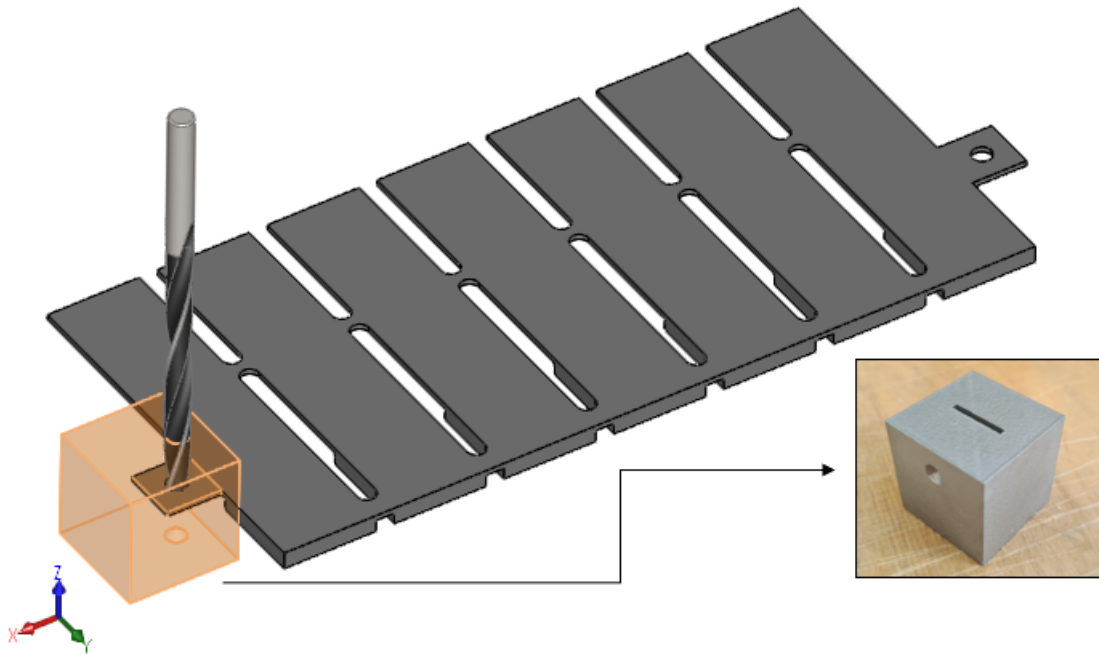
Anche in questo caso è stato previsto un trattamento termico di ricottura e, in seguito alla rimozione dei supporti, è stata disposta una finitura superficiale con corindone e microsferine di vetro. Il risultato finale è visibile in figura 4.10.



**Fig. 4.10** pannello Ti6Al4V in seguito a trattamento termico e di finitura superficiale.

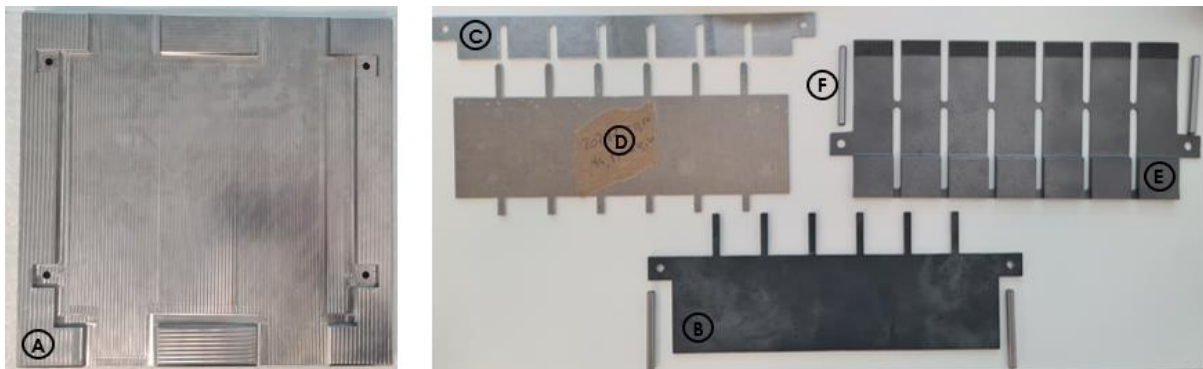
Il pannello era stato disposto a 45° per garantire la corretta crescita delle strutture personalizzate, tuttavia, questa orientazione non permette un'adeguata crescita dei fori disposti lateralmente. Per tale motivo era stato disposto preventivamente un sovrametallo di 1,5 mm, per poi effettuare successivamente l'operazione di foratura con cui sarebbe stato possibile raggiungere il diametro desiderato pari a  $\varnothing = 5,30 \text{ mm}$ . È stato, dunque, necessario realizzare una dima per tenere il pannello in lega di titanio in posizione e guidare l'utensile da taglio durante l'operazione di foratura.

L'assieme, nella figura successiva, è stato realizzato per valutare le effettive dimensioni della maschera di foratura, di cui si può cogliere l'aspetto finale in basso a destra, in seguito alla produzione mediante tecniche di fabbricazione additiva. Le maschere sono generalmente realizzate con materiali molto duri in quanto devono guidare uno strumento in una posizione specifica, la scelta del materiale è allora ricaduta su un acciaio *EOS Stainless Steel 14-4PH*.



**Fig. 4.11** assieme pannello Ti6Al4V con punta di foratura e maschera (realizzata tramite tecnica DMLS in acciaio 14-4PH)

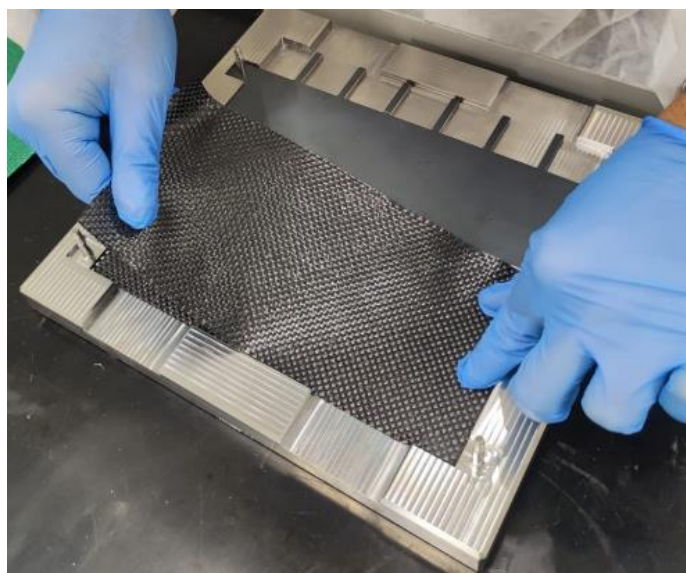
Lo stampo in acciaio “AISI 31d6” è stato realizzato nel reparto macchine a controllo numerico dell’azienda *Bercella* e il risultato è presentato in figura 4.12.



**Fig. 4.12** componenti realizzati mediante processi per asportazione di truciolo: (A) stampo per laminazione in AISI 316; (B) tool metallico di supporto, (C) tabs per allineamento, (D) tool metallico per compressione pre-preg, (F) spine cilindriche di fissaggio realizzati in alluminio. (E) pannello Ti-6Al-4V realizzato mediante processi di fabbricazione additiva.

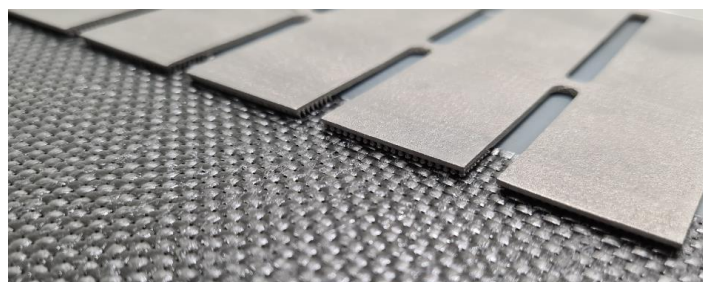
## 4.2 Laminazione

Per il processo produttivo necessario alla realizzazione del giunto co-curato è stata redatta una scheda di laminazione “ply-book”, contenente le istruzioni operative per la corretta laminazione. Nella scheda sono presenti, non solo tutte le specifiche relative ai materiali da utilizzare, ma anche i passi da seguire per la corretta disposizione dei componenti per garantire le specifiche progettuali. In particolare, il primo step consiste nel distaccare lo stampo e l’attrezzatura ausiliaria, ad eccezione del pannello Ti-6Al-4V, in modo da evitare l’adesione degli strati di pre-preg nello stampo in seguito al ciclo di cura in autoclave. Dopo aver fissato il tool metallico per lo spessore con le due spine cilindriche, sono state posizionate dieci *plies GG200P DT120-47* dalla dimensione  $208,8\text{mm} \times 101,5\text{mm}$  facendo attenzione a non creare pieghe o a danneggiare la fibra. In figura 4.13 si può apprezzare il processo di deposizione degli strati di prepreg dallo spessore di  $0,22\text{ mm}$ , avvenuto all’interno della “clean-room” termoregolata e pressurizzata.



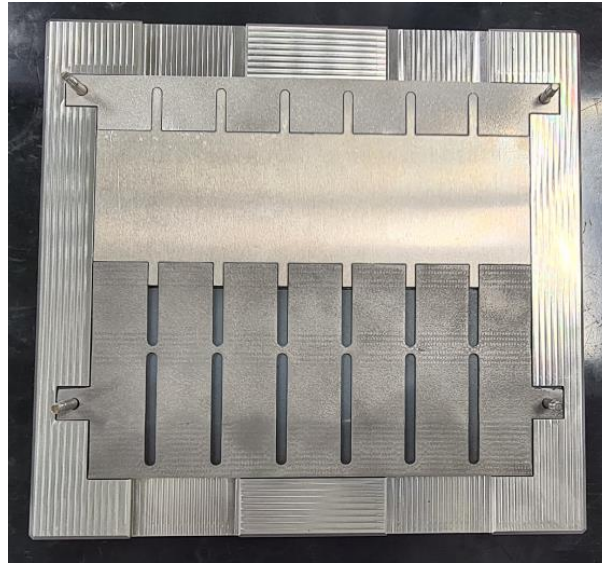
**Fig. 4.13** processo di laminazione: posizionamento plies sullo stampo

Dopo aver completato la fase la fase di stesura del materiale composito si è proceduto con la deposizione del pannello in lega di titanio, facendo in modo che le strutture lattice/grip andassero in battuta con l’ultimo strato in carbonio. Nella figura successiva si può notare una vista in dettaglio della zona di *overlap* che si intende co-curare in autoclave.



**Fig. 4.14** vista in dettaglio degli aderenti CFRP-Ti6Al4V prima del ciclo di cura in autoclave

L'ultima fase consiste nel fissare tramite spine cilindriche i *tabs*, precedentemente sabbiati per garantire l'incollaggio tra due superfici lisce, e del controstampo per garantire la compattazione degli strati di CFRP. Nell'immagine successiva viene presentato lo stampo prima della fase di creazione del sacco a vuoto.



*Fig. 4.15 stampo completo prima della creazione del sacco a vuoto*

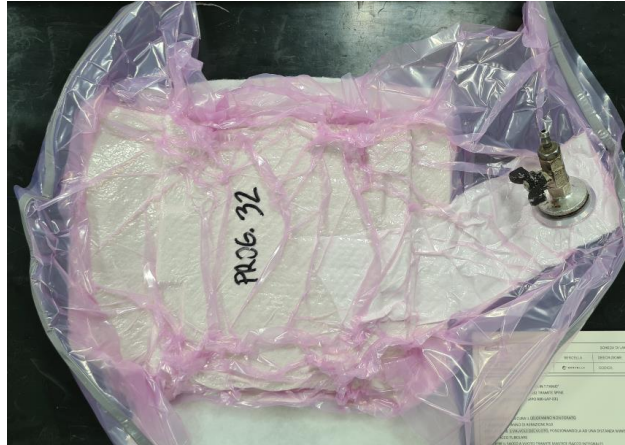
### 4.3 Creazione del sacco a vuoto

Una volta completate le fasi di co-laminazione delle parti in CFRP e in Ti-6Al-4V all'interno dello stampo, il componente dovrà essere preparato per il ciclo di cura in autoclave. Gli step da seguire per far sì che il componente CFRP subisca una corretta polimerizzazione e che la pressione venga distribuita in modo omogeneo sul giunto sono i seguenti:

- Avvolgimento dello stampo all'interno di un film microfiltrato: tale operazione serve ad evitare la fuoriuscita di resina o di sostanze volatili dello stampo;
- Posizionamento sacco di areazione: in questa fase risulta fondamentale rivestire lo stampo con un *bleeder*, un materassino in cotone, che ha la funzione di assorbire l'eventuale fuoriuscita di resina, evitare che la presenza spine cilindriche possano forare il sacco una volta posto in autoclave e distribuire in maniera omogenea la pressione;
- Creazione del sacco da vuoto: lo stampo viene posto all'interno di un sacco in nylon tubolare, che viene appositamente tagliato dall'operatore in funzione delle dimensioni dello stampo da inserire all'interno. Per la realizzazione dei provini co-curati è stata predisposta una sola valvola del vuoto, posizionata ad una distanza di 200mm dallo stampo. Infine, il sacco viene chiuso tramite l'applicazione di mastice e sigillato per evitare la fuoriuscita di aria durante il ciclo di polimerizzazione. La fase di creazione del sacco risulta quella che necessita maggior attenzione per favorire l'adesione degli strati di prepreg, evitare la presenza di bolle o inclusioni, facilitare la distribuzione omogenea

della pressione (evitando pieghe tra le fibre) ed evacuare le bolle d'aria presenti nel laminato. [22]

Di seguito viene presentato lo stampo all'interno del sacco in vuoto, in cui viene designato anche il codice del programma che dovrà seguire in autoclave. In particolare, è stato predisposto un ciclo di cura in autoclave a 6 bar alla temperatura di 130°C.



*Fig. 4.16 creazione del sacco a vuoto*

Dopo aver completato la fase di polimerizzazione, il componente è stato estratto dall'autoclave e distaccato dallo stampo. La co-cura in autoclave ha portato a dei risultati che sicuramente si discostano da quelli ipotizzati in fase di progettazione, infatti, seppur sia stato realizzato il componente in composito, grazie alla compattazione dei laminati, la resina in eccesso non è stata sufficiente a realizzare la tenuta meccanica tra i due aderenti, portando di fatto ad un fallimento della prima prova.

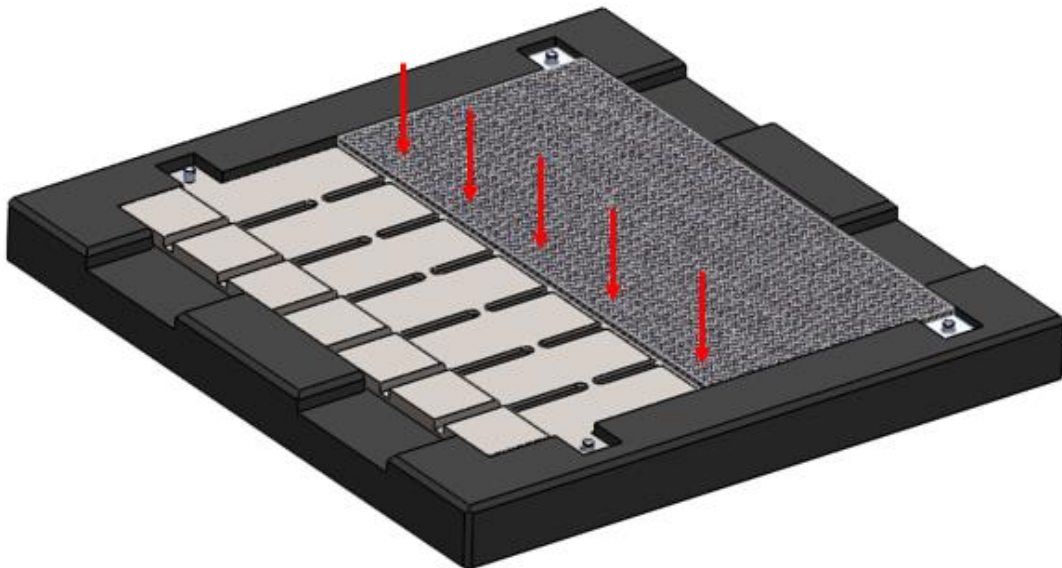
Da un'analisi del componente si evidenzia come le cause che non hanno portato alla realizzazione del giunto ibrido sono da attribuire a diversi fenomeni:

- Tensionamento residuo del pannello Ti-6Al-4V. Il pannello in lega di titanio è stato disposto superiormente rispetto al pannello in CFRP, ad una distanza di 0,26mm dal *tool metallico* di supporto. Questa distanza era stata pensata per garantire un abbassamento del pannello una volta applicata la pressione in autoclave, in modo da seguire gli strati di prepreg in seguito alla compattazione. Tuttavia, una volta cessata la pressione, il pannello in Ti-6Al-4V è ritornato alla posizione originaria distaccandosi dall'aderendo in CFRP e vincendo la forza minima necessaria a rompere il giunto.
- Struttura di overlap troppo densa. Le strutture *lattice* presentavano un'unità cellulare di 1 mm<sup>3</sup> per far sì che la resina in eccesso potesse essere sufficiente a riempire tutte le cavità all'interno e con lo stesso principio erano state spaziate tra di loro le strutture *grip*. Tuttavia, questa scelta non ha portato a dei vantaggi in quanto le strutture sono risultate troppo fitte non permettendo una compenetrazione all'interno del composito.
- *Tabs* lisci. Se in prossimità della zona di overlap si è assistito ad una parziale delaminazione del carbonio, dovuto ad una struttura metallica rugosa che in

minima parte ha garantito l'incollaggio, in prossimità dei *tabs*, precedentemente sabbiati, la resina non è stata sufficiente a garantire la tenuta. Dunque, risulterà fondamentale incollare separatamente i *tabs*, in fase successiva, per allineare il giunto in fase di testing.

#### 4.4 Variazione dell'attrezzatura e orientamento componenti

Il risultato ottenuto nella prima prova non ha portato dei risultati soddisfacenti in quanto non è stata raggiunta la tenuta meccanica necessaria a collegare i due aderendi e dunque non è stato possibile testare il giunto. Per tale motivo è stato necessario, in seguito ad un'analisi delle cause di fallimento della prima prova, pensare una nuova soluzione che potesse produrre risultati migliori. Per evitare la realizzazione di una nuova maschera di laminazione, si è deciso di non progettare un nuovo stampo e di valutare la possibilità di utilizzare un'attrezzatura diversa in modo da orientare diversamente i componenti all'interno. In particolare, visto il comportamento del pannello in Ti-6Al-4V, si è deciso di disporre quest'ultimo nella parte bassa dello stampo con la superficie di overlap rivolta verso l'alto, così da evitare possibili deformazioni. Inoltre, è stata prevista una superficie piana dalle dimensioni di  $2,26mm$  per garantire la giusta altezza del pannello in *CFRP* rispetto a quello in lega di titanio. Questa soluzione, visibile in figura 4.17, permette di tenere in posizione il pannello in titanio e al contempo di apprezzare una discesa dei laminati in carbonio in seguito a compattazione, una volta applicata la pressione di  $6\text{ bar}$  in autoclave.

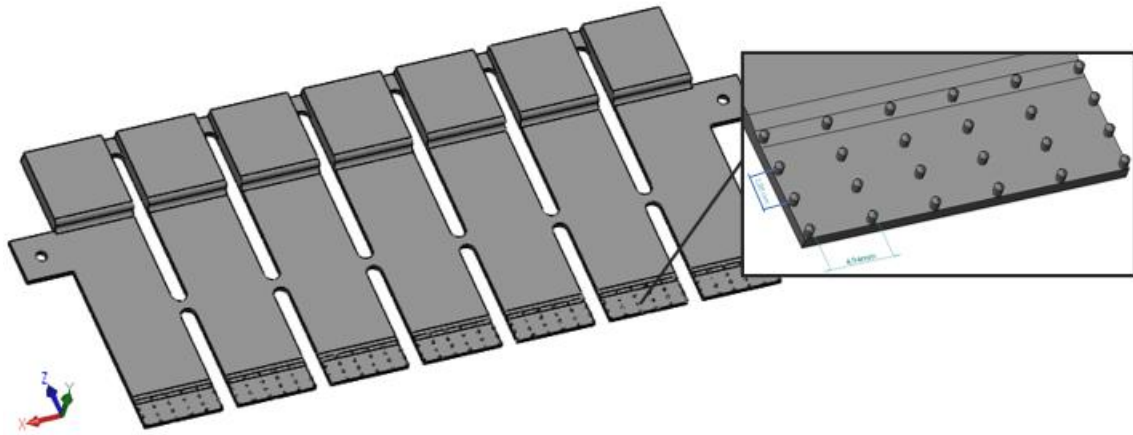


*Fig. 4.17 assieme dello stampo contenente i componenti disposti nella seconda configurazione*

L'obiettivo di questa seconda prova è ottenere una compenetrazione delle strutture metalliche cellulari all'interno delle composito, tra le fibre che formano il tessuto intrecciato. Per apprezzare tale risultato si è deciso di non utilizzare delle strutture *lattice* con geometria complessa, bensì delle strutture geometriche con forma cilindrica e punta conica con spaziatura maggiore rispetto a quelle disegnate per la



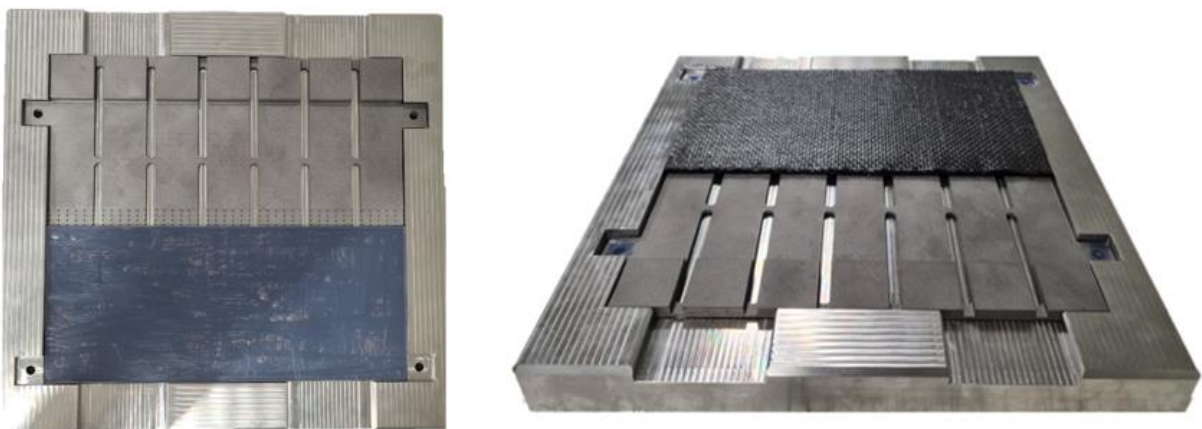
prova precedente. Per ottenere il massimo risultato dal punto di vista produttivo sono state disegnate delle strutture metalliche dalla sezione di  $0,70\text{ mm}$  per favorire il processo di compenetrazione, consapevoli del fatto che strutture così sottili risulterebbero molto più fragili se sollecitate a carichi di trazione. Il CAD 3D del pannello metallico presente in figura 4.18 è stato messo in macchina con una orientazione a  $45$  gradi rispetto alla piattaforma di costruzione, per garantire la corretta costruzione delle strutture cilindriche nella zona di overlap.



**Fig. 4.18** CAD 3D del pannello Ti-6Al-4V con strutture cilindriche nella zona di overlap

Il pannello in lega di titanio è stato realizzato con le stesse tecniche produttive del precedente (*direct metal laser sintering*) e ha subito lo stesso trattamento termico di ricottura in forno.

Per quanto riguarda l'attrezzatura necessaria al completamento dello stampo, nella figura successiva si nota come per garantire la corretta laminazione dei prepreg sia stato necessario utilizzare una lastra di alluminio, rivestita con il nastro distaccante, in battuta con la superficie laterale del pannello in titanio. In figura 4.19 (a destra) si può inoltre notare come i laminati siano stati disposti sopra il *tool metallico* distaccato, in modo da ricoprire anche i  $10\text{ mm}$  della zona di overlap in cui si intende realizzare la giunzione.

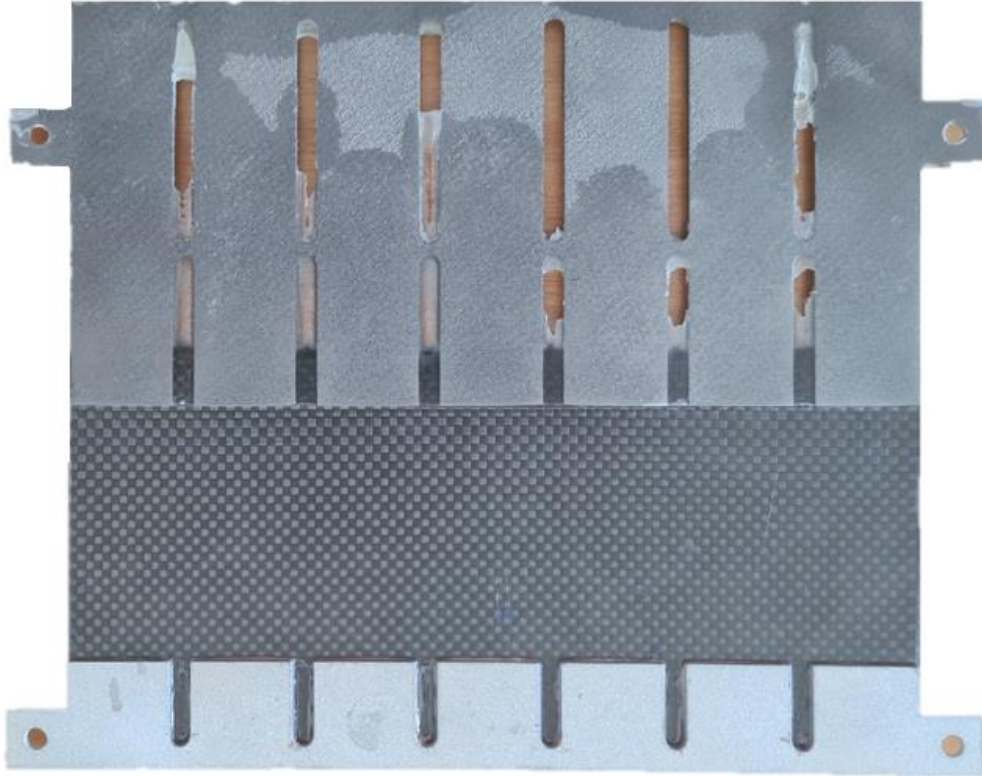


**Fig. 4.19** stampo completo prima della laminazione (a sinistra) e dopo laminazione (a destra)

Dopo aver disposto un'altra lastra in alluminio con funzione di controstampo, sopra la superficie esposta dell'ultimo strato di prepreg, è stato eseguito tutto il processo di

preparazione alla cura in autoclave. Anche in questo caso è stato disposto un programma che prevede un ciclo a 6 bar alla temperatura di 130°C.

Terminato il processo di co-cura in autoclave il componente è stato distaccato dallo stampo ed è stato applicato il tab in alluminio con adesivo bicomponente 9323 B/A. Il giunto ibrido finale viene presentato nella figura successiva.

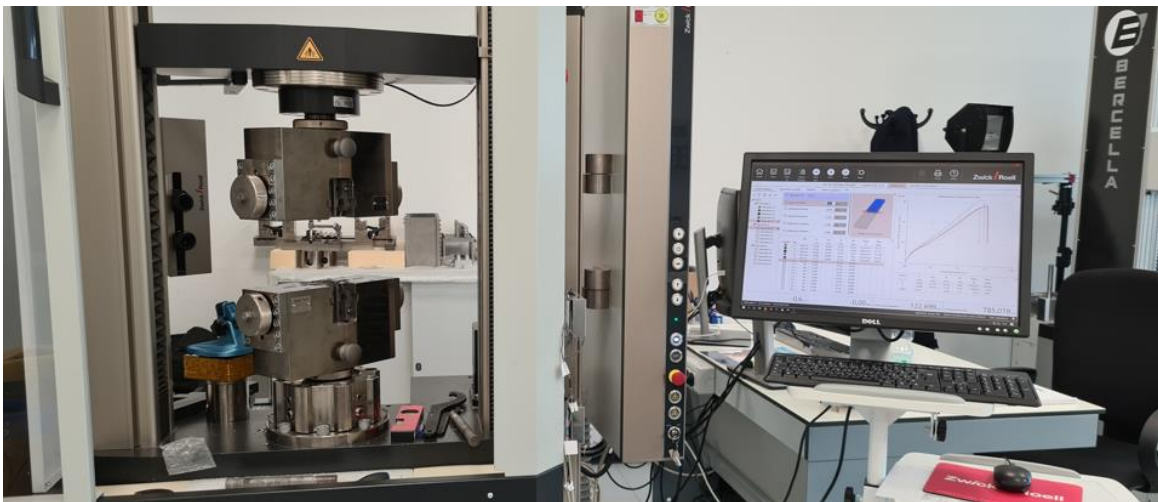


*Fig. 4.20* giunto ibrido Ti-6Al-4V – CFRP realizzato tramite co-cura in autoclave

Dopo aver ricavato i sette aderenti ibridi dal pannello unico, tramite l'ausilio di una fresa a controllo numerico computerizzato, i provini a singola sovrapposizione sono stati preparati per la fase di testing, i cui risultati vengono presentati nel capitolo successivo.

## 5. Analisi quasi statiche con macchina di trazione e valutazione delle cause di cedimento

Le prove di trazione sono state condotte nei laboratori di Bercella sfruttando il know-how degli ingegneri di reparto, esperti in test di lap-shear. La macchina quasi statica utilizzata per le prove di trazione è la Zwick/Roell Z100, con una capacità di carico massimo pari a 100 kN e a cui è stato impostato uno spostamento con loading rate pari a 13 mm/min, come specificato da normativa ASTM D5868-01. Tutti i test vengono condotti in condizioni di temperatura controllate, pari a 23°C. I risultati ottenuti dalla macchina di trazione consistono nella rilevazione dello spostamento, dato dall'allontanamento delle pinze di presa, e della massima tensione tangenziale, calcolata come rapporto tra il carico applicato e la superficie di overlap (inserita dall'operatore).



*Fig.4.1* Macchina di trazione Zwick/Roell Z100 nei laboratori BERCELLA

Da normativa, il distanziamento iniziale delle pinze di presa deve essere superiore a 75 mm (in questo caso risulta pari a 137 mm). Il precarico di trazione è stato posto pari a 100 N, mentre la frequenza di acquisizione è stata impostata a 500 rilevazioni al secondo.



Customer	Carboni e Metalli
Job no.	INT-0-21
Test standard	Apparent shear strength - ASTM D3163
Adherends	GG200P-DT120 / Titanium Ti-6Al-4V
Adhesive	EA 9323
Specimen type	B00-PRO-018_11
Test climate	RT - T=23.0°C / RH=50.0%
Tester	J.Musumeci
Machine data	Zwick/Roell Z100

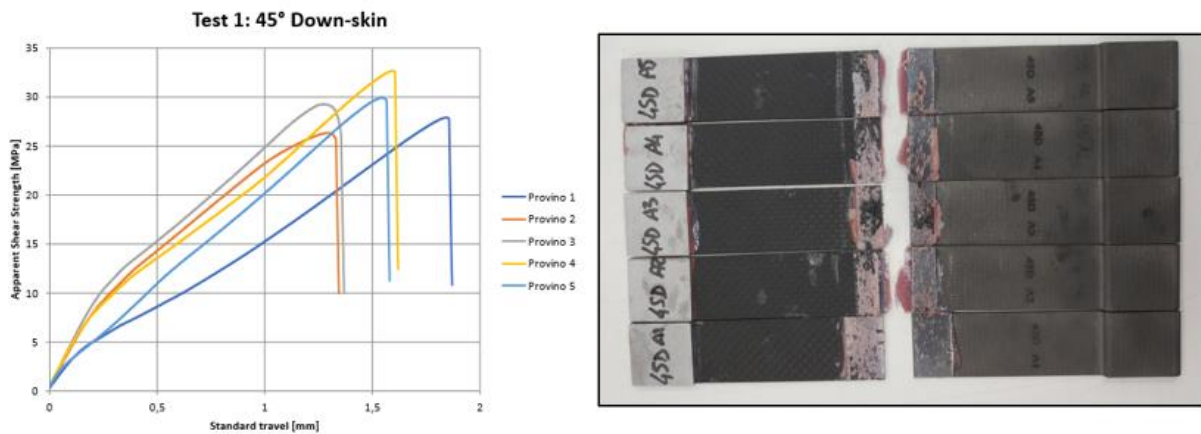
*Fig.4.2* Distanziamento iniziale delle pinze di presa

La prima campagna sperimentale è stata effettuata per valutare le prestazioni all'interfaccia nei giunti semplicemente incollati, senza alcuna struttura lattice o

personalizzata. I provini del test 1 sono stati realizzati come benchmark per valutare se effettivamente la superficie di overlap, che era stata ipotizzata modificando la geometria rispetto alla normativa di riferimento, portasse a rottura la zona di interfaccia e non gli aderendi. In questo modo si potrà determinare nei test successivi, con l'aggiunta di strutture lattice/grip, l'effettivo miglioramento apportato nell'interblocco meccanico. Pertanto, ciò che ci si vorrebbe ottenere da questi primi test è una rottura coesiva, in cui l'adesivo rimanga depositato in quantità omogenee sulle superfici dei due aderendi.

Di seguito vengono riportate le curve di tensione-spostamento per ogni configurazione di provino Ti6Al4V realizzato (45°Down-Skin, 45°Up-Skin, 90°) oltre che i valori dimensionali misurati dagli aderendi ed i dati statistici calcolati dalle prove di ogni serie da cinque test.

### 5.1 Test 1: 45° Down-Skin



**Fig.4.3** Lotto di provini con configurazione a 45°Down-Skin

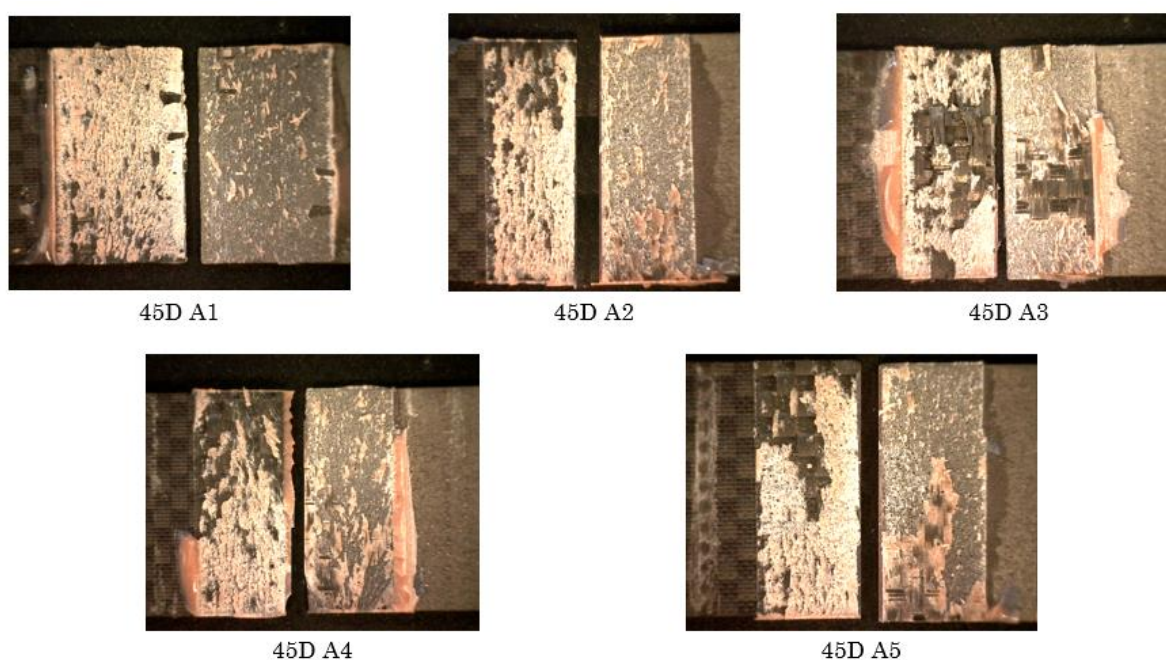
Dalle curve di tensione-spostamento si nota come solo il provino 4 ha raggiunto valori di tensioni tangenziali superiori ai 30 MPa, mentre lo spostamento massimo è stato raggiunto dal provino 1 (1,87 mm). I valori di tensione massima tangenziale sono risultati mediamente superiori a quelli dichiarati nel data-sheet dell'adesivo, ciò può essere attribuito al fatto di aver incrementato la superficie esposta alla colla e dunque di non aver ottenuto un incollaggio ottimale: l'adesivo è fuoriuscito dalla superficie di overlap che si intendeva valutare, aggiungendo un contributo non trascurabile alla tenuta meccanica del giunto. Per quanto riguarda i tipi di cedimento, di seguito sono state riportate le principali cause che hanno portato a rottura il giunto: si nota come nessun provino testato è attribuibile ad un solo tipo di cedimento ma misto, inoltre si evince che è stato raggiunto uno dei principali obiettivi da questa prima campagna sperimentale, ovvero portare a rottura la zona di interfaccia e non gli aderendi CFRP/Ti6Al4V. Infatti, anche se nel lotto non è stato raggiunta rottura coesiva dell'adesivo, in nessuno provino testato si riscontra *Stock-break failure*.

DOWN-SKIN	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza a Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,1	0,05	0,05			

Provino 1	15,39	25,39	0,07	1,93	1,57	1,87	27,92	Adhesive/light -fiber tear
Provino 2	10,61	25,99	0,44	2,19	1,61	1,34	26,34	Adhesive/light -fiber tear
Provino 3	9,84	25,52	0,24	1,68	1,6	1,36	29,28	Adhesive/ fiber tear
Provino 4	9,84	25,58	0,12	2,14	1,64	1,62	32,68	Adhesive/ fiber tear
Provino 5	10,5	25,5	0,12	2,48	1,62	1,58	29,94	Adhesive/ fiber tear

**Tab. 5.1** risultati statistici prova di trazione del lotto "DOWN\_SKIN"

Dalla tabella soprastante si nota come lo spessore della colla sia, in tutti i provini, al di sotto di quello specificato da normativa (pari a 0,76 mm) dovuto al fatto di non aver utilizzato sfere di vetro dallo spessore costante all'interno della miscela bicomponente in fase di deposizione dell'adesivo. In questo modo non è stato possibile avere controllo sullo spessore di colla depositato con la conseguenza di non aver ottenuto *cohesive failure*. Grazie ad un microscopio ottico digitale è stato possibile rilevare le superfici di frattura in seguito all'applicazione del carico di trazione e, come si evince dalla figura successiva, nel caso dei provini 45D A1 e 45D A2 si è raggiunto prevalentemente rottura adesiva, mentre negli altri casi si assiste prevalentemente ad una delaminazione della fibra, rimasta sulla superficie dell'aderendo metallico. Si nota, infatti, che gli ultimi tre provini presentano valori di tensione tangenziale superiori rispetto ai primi due.



**Fig. 4.4** Superfici di frattura degli aderendi (45Down-Skin) in seguito a prova di trazione

Le statistiche sul primo lotto con configurazione 45°Down-skin vengono riportate nella tabella successiva.

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	3,89	2,084	1,608	0,198	25,59	11,23	8354,90	29,23
s	0,34	0,29	0,025	0,149	0,23	2,34	1487,04	2,37
n [%]	8,82	14,35	1,60	75,28	0,90	20,91	17,79	8,114

Tab. 5.2 valori medi prova di trazione del lotto "DOWN-SKIN"

## 5.2 Test 1: 45° Up-Skin

Anche nel lotto di giunti contenente aderendi Ti6Al4V cresciuti a 45° Up-skin rispetto alla piattaforma di costruzione si nota come la superficie di sovrapposizione, posta a 10 mm di lunghezza, non abbia portato a rottura i due aderendi bensì la zona di incollaggio. In figura 4.3 vengono riportate le curve tensione-deformazione riferite ai 5 provini.

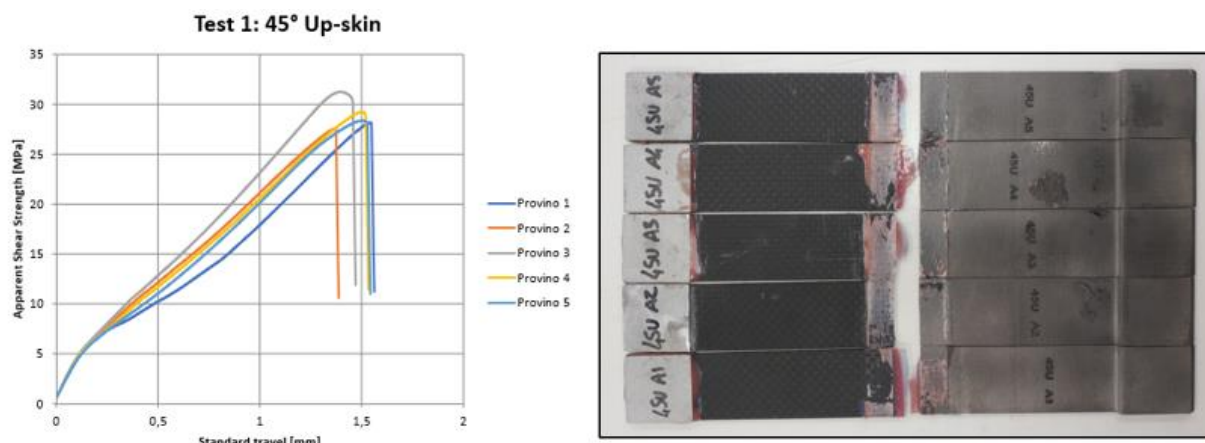


Fig.4.5 Lotto di provini con configurazione a 45°Up-Skin

Anche in questo caso si evidenzia come sia stato evitato lo *Stock-break failure* ma non è stato possibile apprezzare effettivamente l'efficacia dell'adesivo, ottenendo la rottura coesiva. Infatti, come nel caso precedente, lo strato adesivo è al di sotto da quello definito da normativa e, nel caso dei provini 4 e 5, è addirittura al di sotto del decimo di millimetro. La valutazione delle superfici tramite microscopio digitale ha permesso di valutare i principali tipi di cedimento, non riconducibili ad una sola causa.

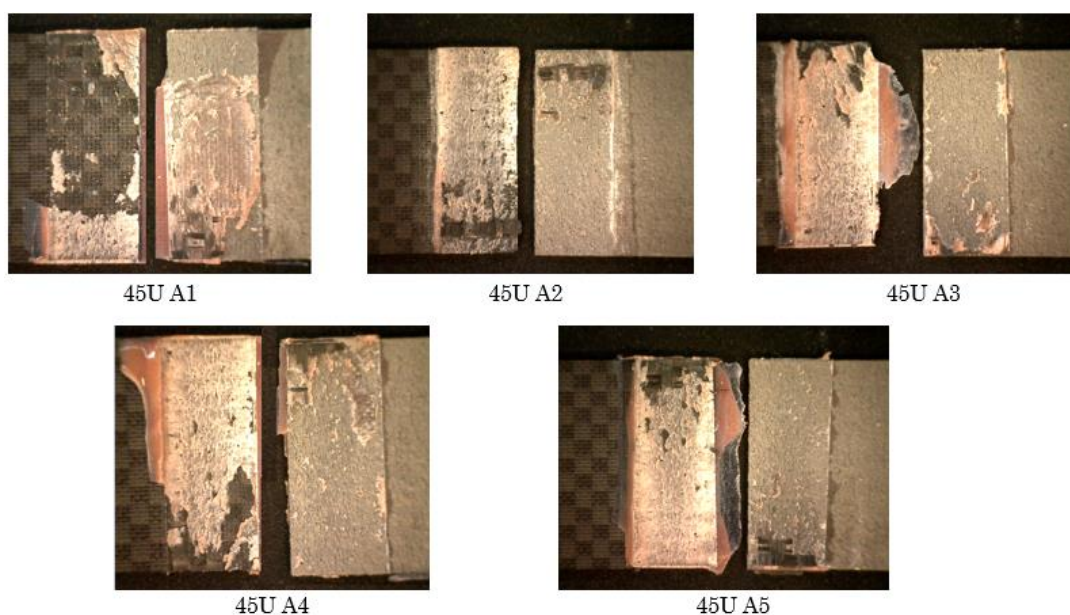
UP-SKIN	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza a Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,1	0,05	0,05			
Provino 1	10,05	25,56	0,52	2,14	1,62	1,56	27,17	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	10,06	25,24	0,15	1,80	1,69	1,38	27,57	Adhesive/light-fiber tear

Provino 3	9,65	25,29	0,44	2,11	1,61	1,47	31,26	Adhesive/light -fiber tear
Provino 4	9,81	25,52	0,06	1,96	1,66	1,53	29,26	Adhesive/ light- fiber tear
Provino 5	9,82	25,30	0,07	1,97	1,63	1,54	28,40	Adhesive/ light- fiber tear

**Tab. 5.3** risultati statistici prova di trazione del lotto "UP-SKIN"

Dall'immagine seguente si nota come in alcuni punti delle superfici vi è la presenza di matrice del composito che va a depositarsi sullo strato adesivo, tuttavia non si ha una vera e propria delaminazione dell'aderendo. Inoltre, è possibile che la massima tensione tangenziale raggiunta nel provino 3 sia più alta rispetto alle altre a causa di un'eccessiva fuoriuscita di colla, durante la fase di deposizione, comportando un aumento della superficie bagnata che ha contribuito alla tenuta del giunto.

Dall'immagine sottostante si può osservare come l'adesivo intrappolato tra le creste della superficie metallica sia minore di quello riscontrato nel lotto 45° Down-Skin, caratterizzato da una rugosità maggiore.



**Fig. 4.6** Superfici di frattura degli aderendi (45Up-Skin) in seguito a prova di trazione

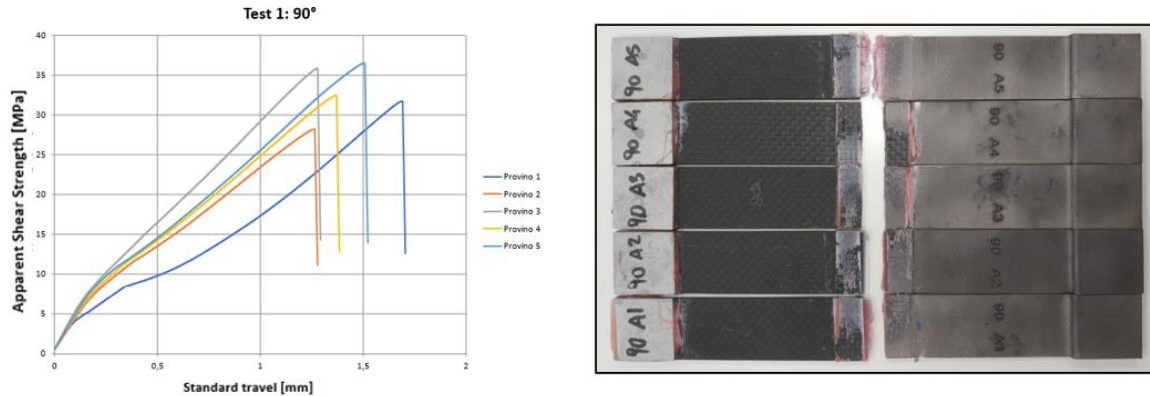
Dalle statistiche dell'analisi riportate nella tabella sottostante si nota, inoltre, che l'analisi ha portato ad una maggiore coerenza di risultati in termini di sforzo di taglio con un valore medio pari a 28,93 MPa, poco al di sotto rispetto a quello trovato nel lotto precedente.

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
	mm	Mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	3,786	2,01	1,642	0,13	25,38	9,878	7249,97	28,93
s	0,308	0,133	0,032	0,231	0,146	0,17	250,04	1,437
n [%]	8,140	6,637	1,99		0,577	1,77	3,44	4,96

**Tab. 5.4** valori medi prova di trazione del lotto "UP-SKIN"

### 5.3 Test 1: 90°

La campagna di sperimentazione per il test 1 si è conclusa con la configurazione a 90°, di cui viene riportato il grafico tensione-deformazione ed i provini in seguito alle prove di trazione, in figura 4.7.



**Fig.4.7** Lotto di provini con configurazione a 90°

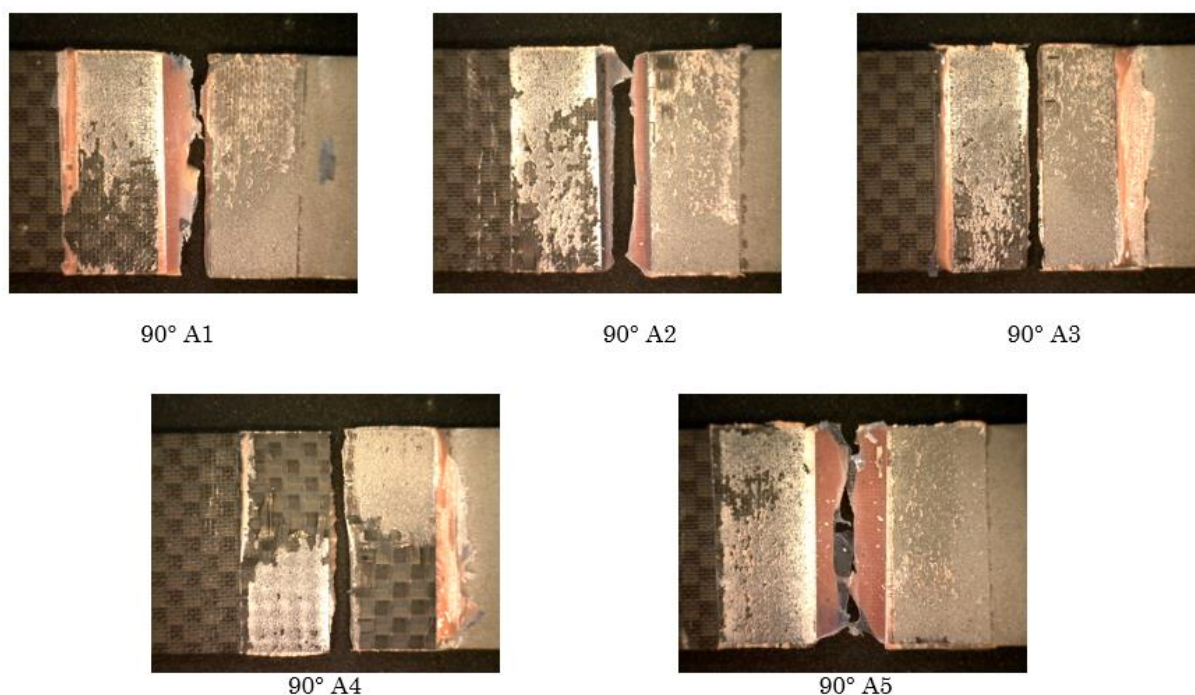
È evidente come in questa prova siano stati raggiunti valori di sforzi di taglio superiori rispetto ai due lotti precedenti, fino a 36,54 MPa nel caso del provino 5. Anche in questo caso si apprezzano cause di cedimento miste e solo per il provino 4 si nota la presenza di fibre di rinforzo su entrambe le superfici dei due aderendi.

90°	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,1	0,05	0,05			
Provino 1	9,63	25,42	0,13	2,17	1,56	1,72	31.74	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	10,90	25,76	0,28	2,21	1,53	1,27	28.29	Adhesive/light-fiber tear
Provino 3	8,88	25,72	0,08	1,63	1,50	1,29	35.87	Adhesive/light-fiber tear
Provino 4	9,92	25,83	0,28	2,38	1,48	1,38	32.48	Adhesive/ fiber tear
Provino 5	10,09	25,81	0,11	2,01	1,47	1,52	36.54	Adhesive/ light- fiber tear

**Tab. 5.5** risultati statistici prova di trazione del lotto "90°"

I provini 3 e 5 presentano valori di tensione tangenziale massima superiori dovuti ad un incremento di superficie bagnata, in seguito ad una fuoriuscita di colla durante la fase di deposizione. Tali valori diminuiscono quando si ha uno spessore di colla superiore nella zona di overlap.





**Fig. 4.8** Superfici di frattura degli aderendi (90°) in seguito a prova di trazione

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
X	3,764	2,174	1,508	0,082	25,70	9,884	8346,27	32,97
S	0,37	0,286	0,037	0,092	0,166	0,73	689,05	3,369
n [%]	9,88	13,15	2,454		0,648	7,41	8,255	10,21

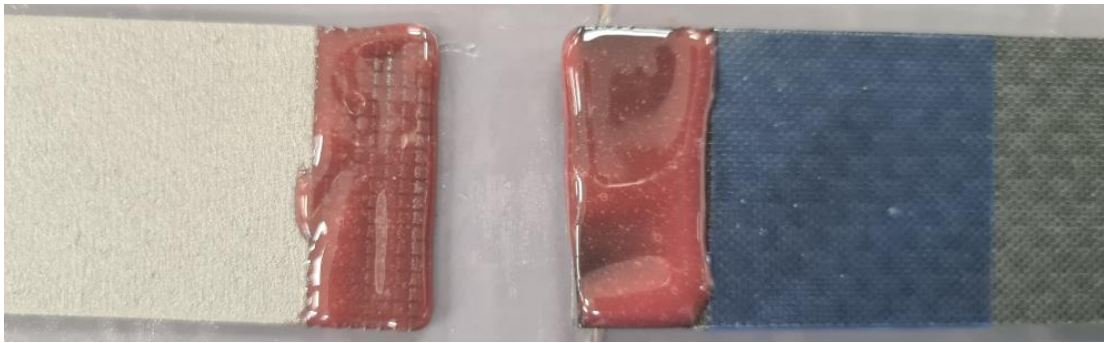
**Tab. 5.6** valori medi prova di trazione del lotto "90°"

In definitiva, dai dati della prima campagna sperimentale, si può dedurre che il lotto contenente provini con configurazione a 90° ha raggiunto valori di tensione massima tangenziale superiore rispetto agli altri due, seppur la superficie di interfaccia presentasse una rugosità inferiore. Tuttavia, le variazioni di rugosità superficiale tra i diversi lotti sono trascurabili rispetto ad altri fattori, che sono risultati molto più variabili a causa di difetti tecnologici (ad esempio nella realizzazione della lastra in CFRP) o dovuti all'applicazione dello strato adesivo sui due aderendi. Infatti, se la variazione di spessore di colla ha causato modalità di cedimento diverse rispetto a quelle sperate, la variazione di spessore degli aderendi in CFRP ha causato l'introduzione di sollecitazioni flessionali durante la prova di trazione. Tali sollecitazioni sono state più rilevanti nei provini con configurazione *45° Down-skin* e *45° Up-Skin*, portando a valori di sforzo tangenziale massimo pari a 28/29 MPa mentre sono risultate meno presenti nel lotto a 90° determinando una t<sub>MAX</sub> pari a 32,9 MPa.

## 5.4 Test 2: Giunzioni incollate per mezzo di strutture *lattice*

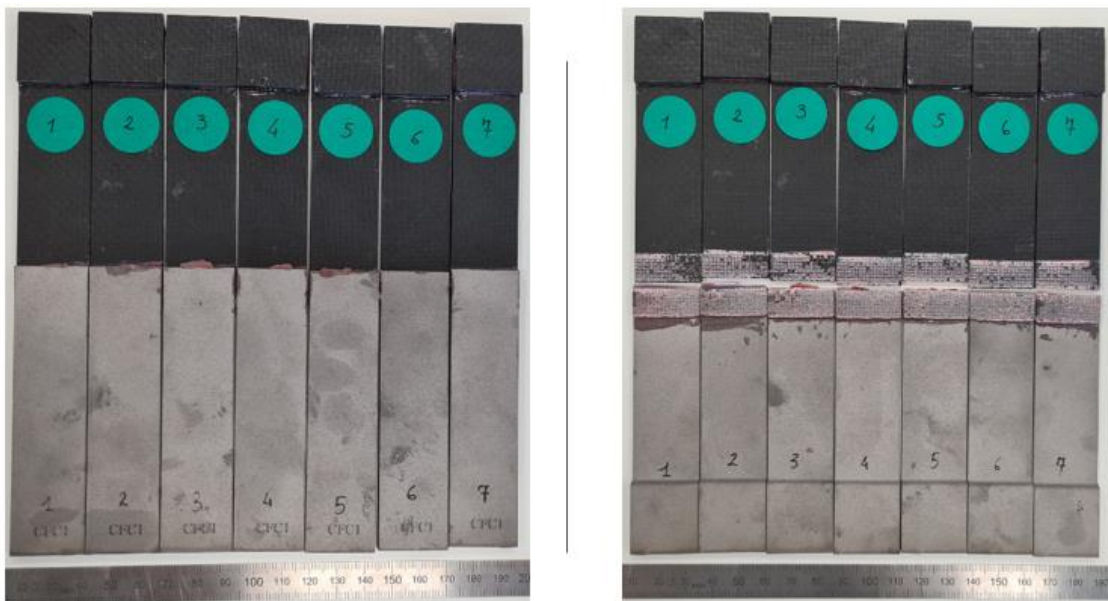
Tramite l'esperienza della prima campagna sperimentale "test 1" è stato possibile effettuare delle valutazioni sulle massime sollecitazioni raggiunte, fortemente influenzate da un processo tecnologico poco preciso. Infatti, si è visto come la fuoriuscita di colla durante la fase di *curing* in forno ha ampliato la superficie a contatto tra i due aderendi comportando un incremento dei valori di  $t_{MAX}$  raggiunti. L'introduzione di *features* superficiali nei test 2 e 3 ha fatto sì che il processo di deposizione dell'adesivo fosse guidato dalle stesse strutture cellulari comportando una maggior precisione sia sullo spessore di adesivo finale che sulla lunghezza di overlap, più prossima al valore nominale di 10 mm rispetto al test 1.

In figura 4.7 si può notare un esempio del processo di deposizione dell'adesivo sull'aderendo in Ti6Al4V e sull'aderendo in CFRP, rivestito da nastro biadesivo per delineare la zona predisposta all'incollaggio.



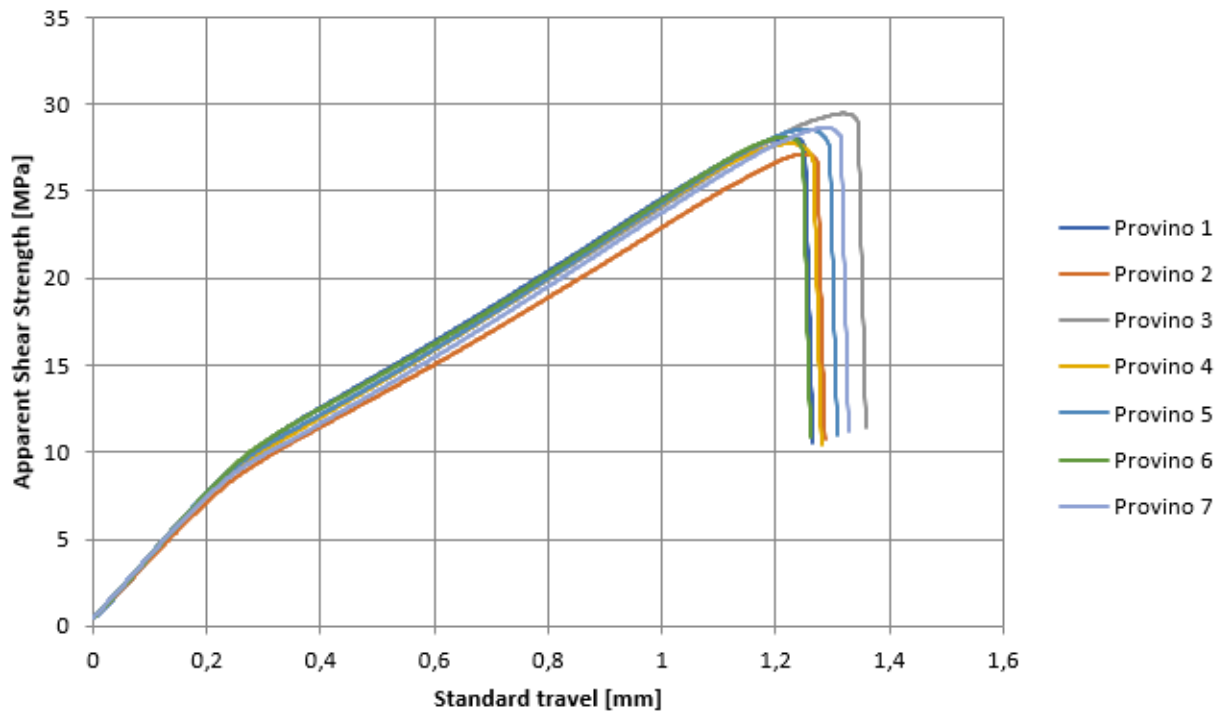
**Fig. 4.9** deposizione dell'adesivo bicomponente sulle superfici dei due aderendi

- Struttura lattice cubica a facce centrate "CFC1"



**Fig.4.10** provini con struttura lattice "CFC1" prima e dopo rottura

## Test 2: CFC1



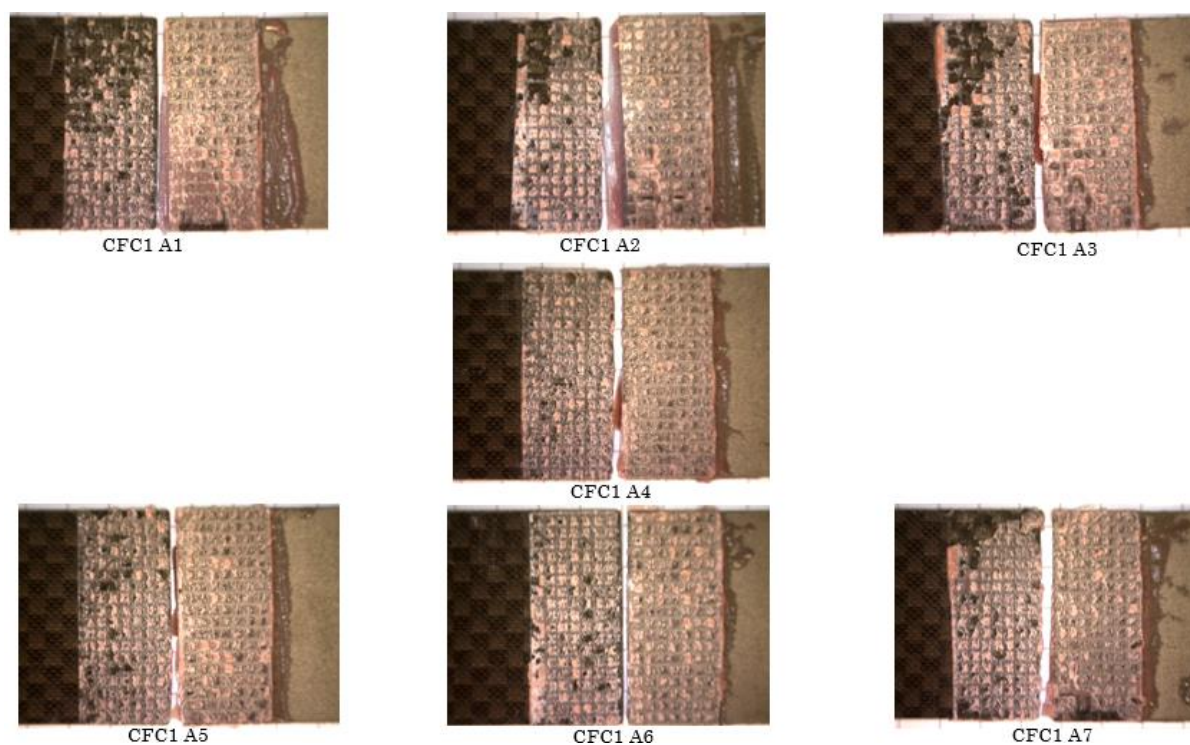
**Fig.4.11** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura lattice “CFC1”

Dal grafico tensione-deformazione si può notare come siano stati ottenuti valori di  $t_{MAX}$  intorno ai 28 MPa, con una variabilità molto più bassa rispetto alla campagna di sperimentazione del test 1. Questo risultato è indice del fatto che l'introduzione di strutture lattice ha reso il processo di deposizione della colla più preciso e ripetibile. Le massime tensioni tangenziali raggiunte sono leggermente inferiori al caso di prima in quanto precedentemente si era verificato una fuoriuscita di colla che aveva contribuito all'incremento della superficie incollata

CFC1	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,61	25,27	1,07	2,13	1,35	1,27	28,10	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	10,96	25,39	0,99	2,34	1,45	1,29	27,14	Adhesive/light-fiber tear
Provino 3	10,76	25,23	0,97	2,38	1,48	1,36	29,47	Adhesive/light-fiber tear
Provino 4	10,44	25,26	1,00	2,32	1,45	1,28	27,75	Cohesive/light-fiber tear
Provino 5	10,48	25,27	1,02	2,46	1,48	1,31	28,58	Cohesive/light-fiber tear
Provino 6	10,62	25,3	0,94	2,24	1,47	1,26	28,13	Cohesive/light-fiber tear
Provino 7	10,27	25,21	0,97	2,35	1,48	1,33	28,65	Adhesive/light-fiber tear

**Tab. 5.7** risultati statistici prova di trazione del lotto “CFC1°”

Dalla tabella soprastante si nota come i valori degli spessori dei due aderendi si avvicinano maggiormente ai valori nominali (2,5 mm per CFRP e 1,5 mm per Ti6Al4V) e ciò ha permesso di evitare l'introduzione di carichi flessionali in fase di testing. In figura 4.12 vengono riportate le superfici di frattura dei sette provini con struttura CFC1 rilevate al microscopio ottico. Si può notare come nei provini 4,5 e 6 sia stata raggiunta rottura coesiva del giunto e come in tutti gli aderendi metallici la colla abbia permeato le strutture cellulari cubiche a facce centrate.

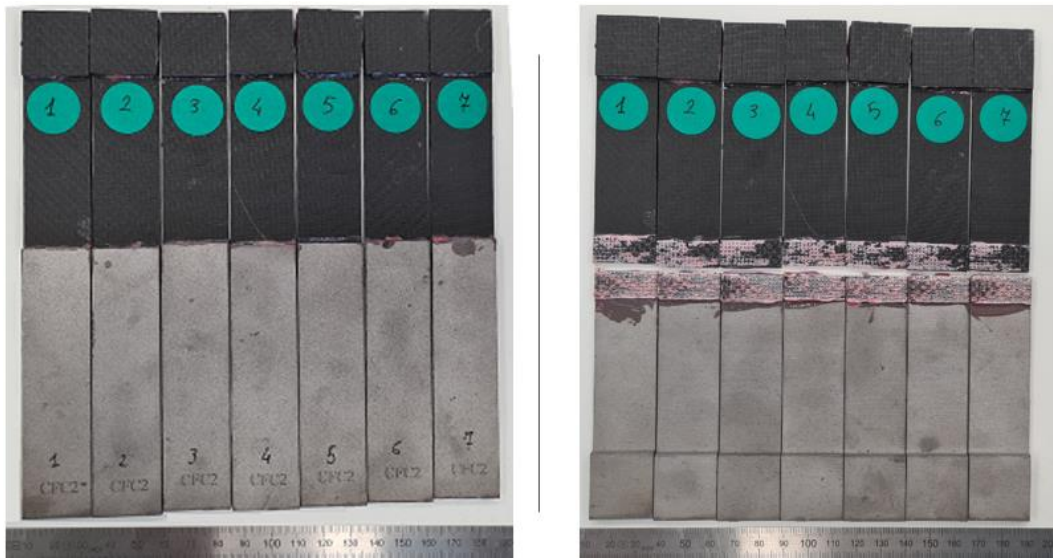


**Fig. 4.12** Superfici di frattura degli aderendi (CFC1) in seguito a prova di trazione

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,763	2,317	1,451	0,994	25,276	10,591	7564,281	28,260
s	0,131	0,106	0,047	0,042	0,058	0,225	214,272	0,741
n [%]	2,753	4,559	3,218	4,222	0,231	2,126	2,833	2,624

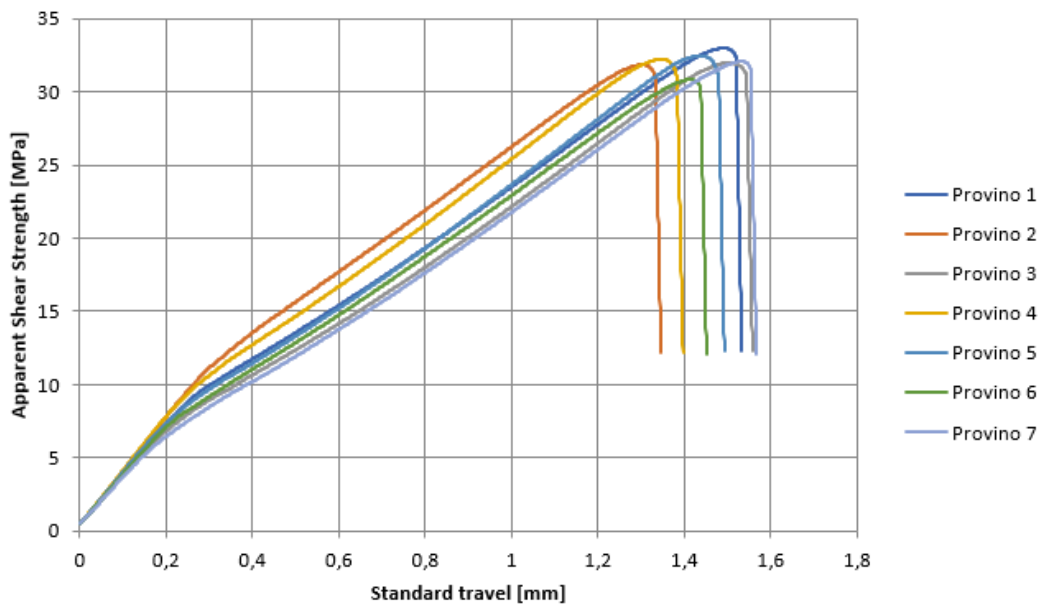
**Tab. 5.8** valori medi prova di trazione del lotto "CFC1"

- Struttura lattice cubica a facce centrate “CFC2”



**Fig.4.13** provini con struttura lattice “CFC2” prima e dopo rottura

### Test 2: CFC2



**Fig.4.14** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura lattice “CFC2”

Anche in questo caso si nota dal grafico come i valori di massima tensione tangenziale raggiunti siano intorno ai 32 MPa per i sette provini, con una variabilità del 2,05%. Il provino 1 è stato sollecitato ad una tensione  $t_{MAX}$  pari a 32,97 MPa prima di giungere a rottura, dimostrando che l'introduzione di una struttura cubica a facce centrate, di tipo CFC2 ha portato ad un incremento delle prestazioni meccaniche del giunto rispetto ad una superficie liscia.

CFC2	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,86	25,29	1,06	2,43	1,44	1,53	32,97	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	10,54	25,4	1,02	2,40	1,42	1,35	31,84	Adhesive/light-fiber tear
Provino 3	10,52	25,37	1,04	2,26	1,43	1,56	31,98	Adhesive/light-fiber tear
Provino 4	10,20	25,39	0,95	2,32	1,46	1,40	32,23	Adhesive/light-fiber tear
Provino 5	10,36	25,28	0,97	2,37	1,45	1,49	32,46	Adhesive/light-fiber tear
Provino 6	10,90	25,12	0,94	2,45	1,45	1,45	30,83	Adhesive/light-fiber tear
Provino 7	11,00	25,39	1,01	2,38	1,42	1,57	32,06	Adhesive/light-fiber tear

**Tab. 5.9** risultati statistici prova di trazione del lotto "CFC2°"



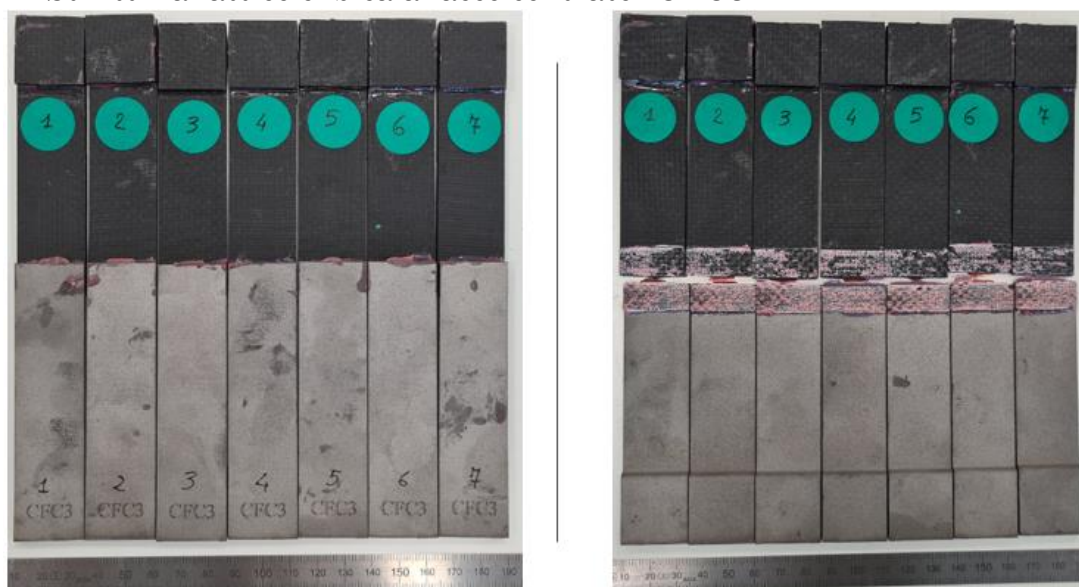
**Fig. 4.15** Superfici di frattura degli aderendi (CFC2) in seguito a prova di trazione

Dalla tabella sottostante si nota come seppur le  $t_{MAX}$  raggiunte siano mediamente di 32,05 MPa, e dunque inferiori rispetto al *test 1: 90°*, la macchina ha registrato un carico longitudinale di 8622 N, superiore a quello raggiunto nel caso di provini lisci disposti a 90° rispetto alla piattaforma di costruzione.

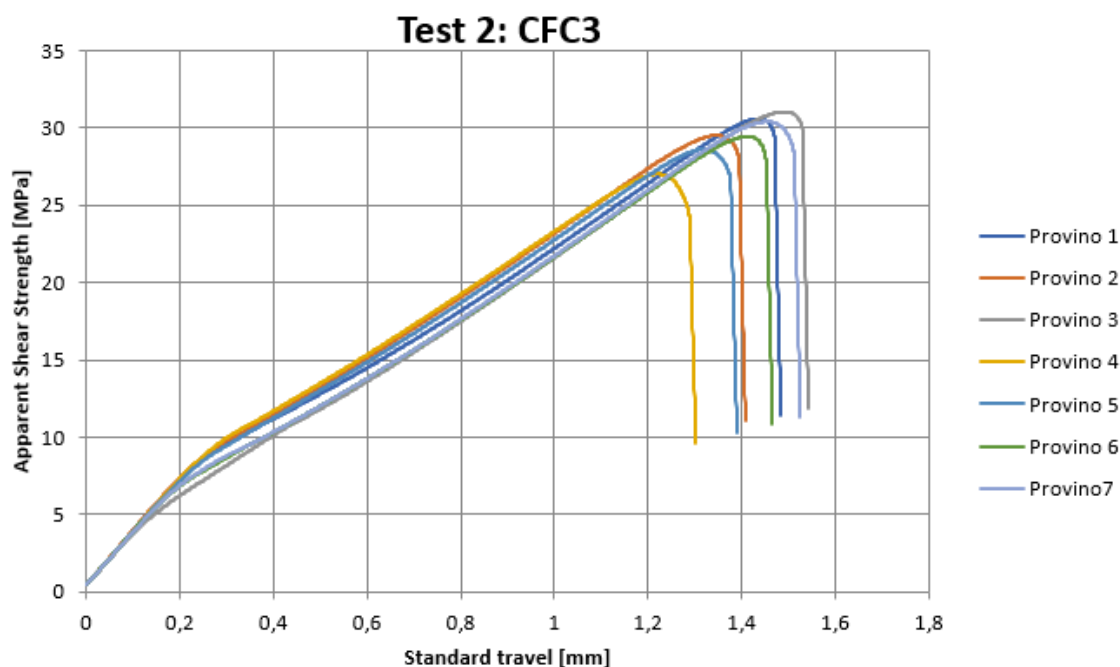
STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,81	2,37	1,44	1,00	25,32	10,63	8622,51	32,05
s	0,07	0,07	0,02	0,05	0,10	0,30	270,43	0,66
n [%]	1,46	2,75	1,09	4,60	0,40	2,82	3,14	2,05

**Tab. 5.10** valori medi prova di trazione del lotto “CFC2”

- Struttura lattice cubica a facce centrate “CFC3”



**Fig.4.16** provini con struttura lattice “CFC3” prima e dopo rottura



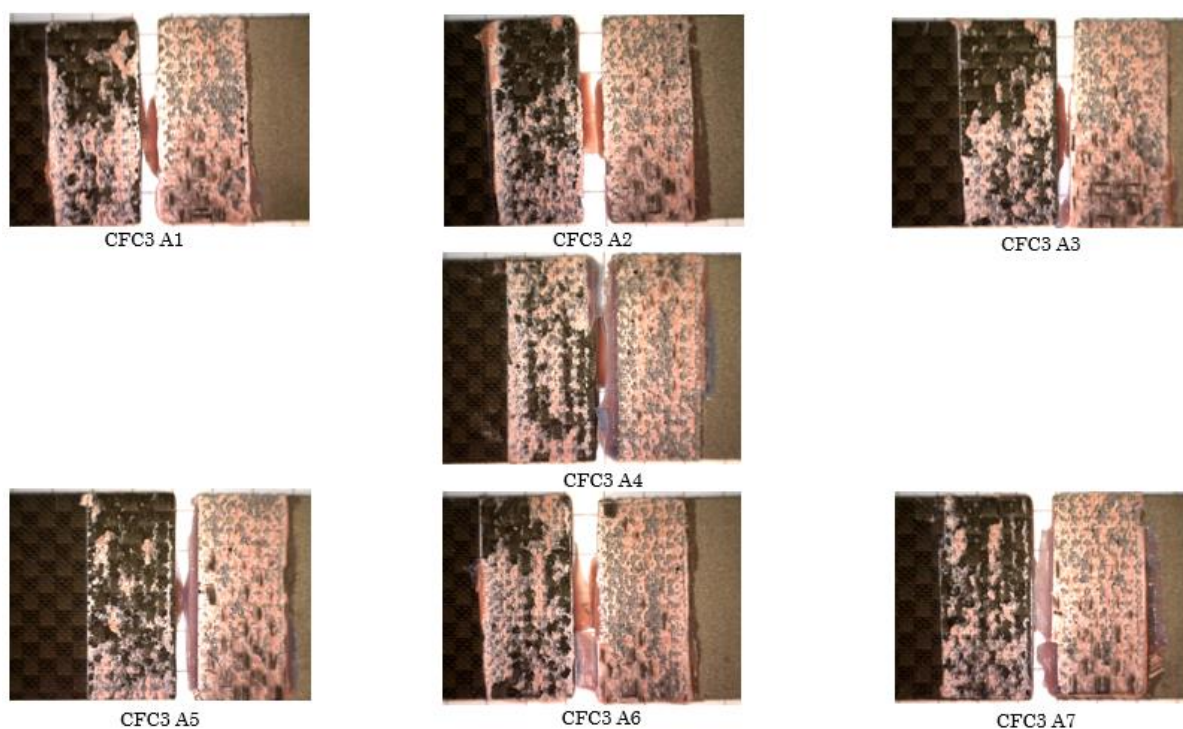
**Fig.4.17** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura lattice “CFC3”

La terza struttura cubica a facce centrate *CFC3* ha raggiunto valori di massime tensioni tangenziali superiori alla prima ma inferiori alla seconda tipologia. Questo risultato, a parità di altre condizioni, può essere attribuito all’introduzione di

trabecole esterne verticali nella struttura lattice che non hanno permesso una corretta penetrazione della colla all'interno di essa, a discapito di una tenuta meccanica meno prestante rispetto al caso precedente. Nonostante ciò, sono stati rilevati dalla macchina di trazione valori di  $t_{MAX}$  superiori rispetto a quelli dichiarati nel data-sheet della colla, con valori massimi di 31,04 MPa nel caso del provino 3.

CFC3	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza a Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,80	25,29	0,88	2,41	1,48	1,48	30,59	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	10,83	25,22	0,95	2,28	1,46	1,41	29,52	Adhesive/light-fiber tear
Provino 3	11,08	25,41	0,92	2,21	1,49	1,54	31,04	Adhesive/light-fiber tear
Provino 4	11,06	25,28	0,93	2,33	1,48	1,30	27,01	Adhesive/light-fiber tear
Provino 5	11,15	25,16	0,96	2,25	1,47	1,39	28,62	Adhesive/light-fiber tear
Provino 6	10,84	25,4	0,94	2,06	1,48	1,47	29,45	Adhesive/light-fiber tear
Provino 7	10,87	25,32	0,92	2,24	1,45	1,53	30,39	Adhesive/light-fiber tear

**Tab. 5.11** risultati statistici prova di trazione del lotto "CFC3"



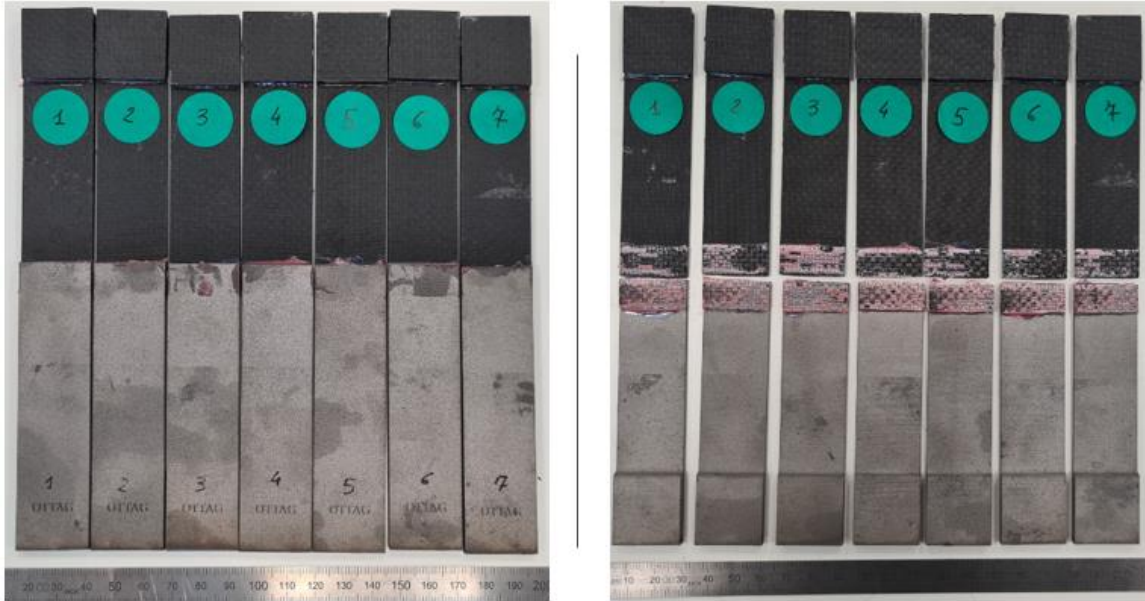
**Fig. 4.18** Superfici di frattura degli aderendi (CFC3) in seguito a prova di trazione



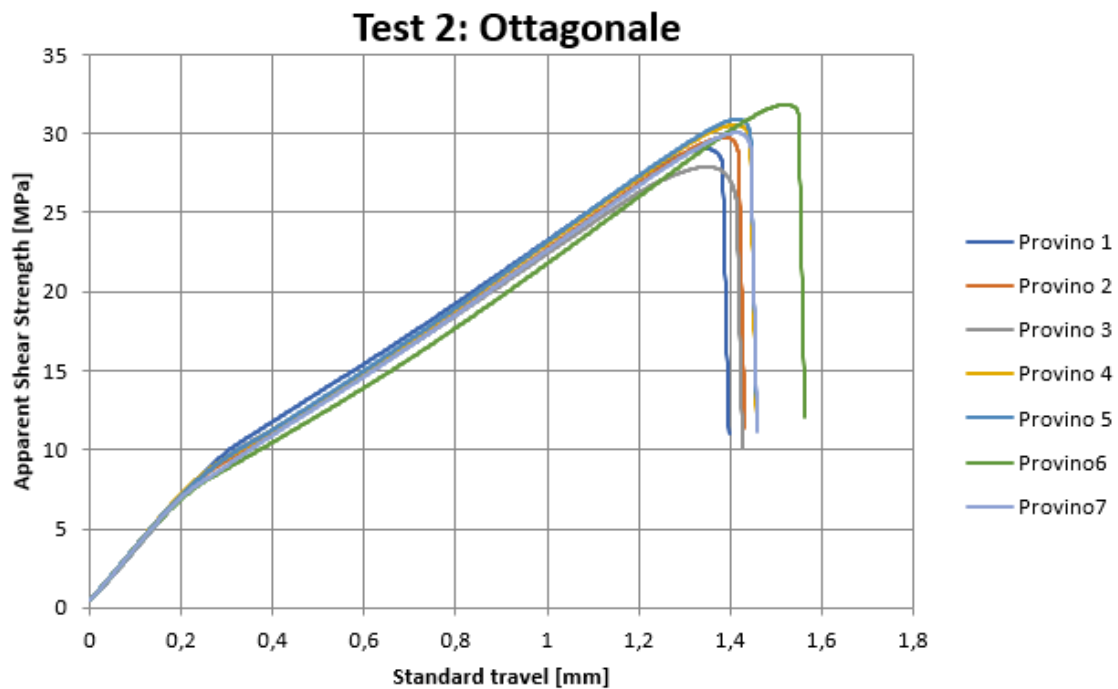
STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,66	2,25	1,47	0,93	25,30	10,95	8173,27	29,52
s	0,10	0,11	0,01	0,03	0,09	0,14	368,24	1,37
n [%]	2,08	4,81	0,94	2,81	0,36	1,32	4,51	4,66

*Tab. 5.12 valori medi prova di trazione del lotto "CFC3"*

- Struttura lattice ottagonale "Ottag"



*Fig.4.19 provini con struttura lattice "Ottagonale" prima e dopo rottura*

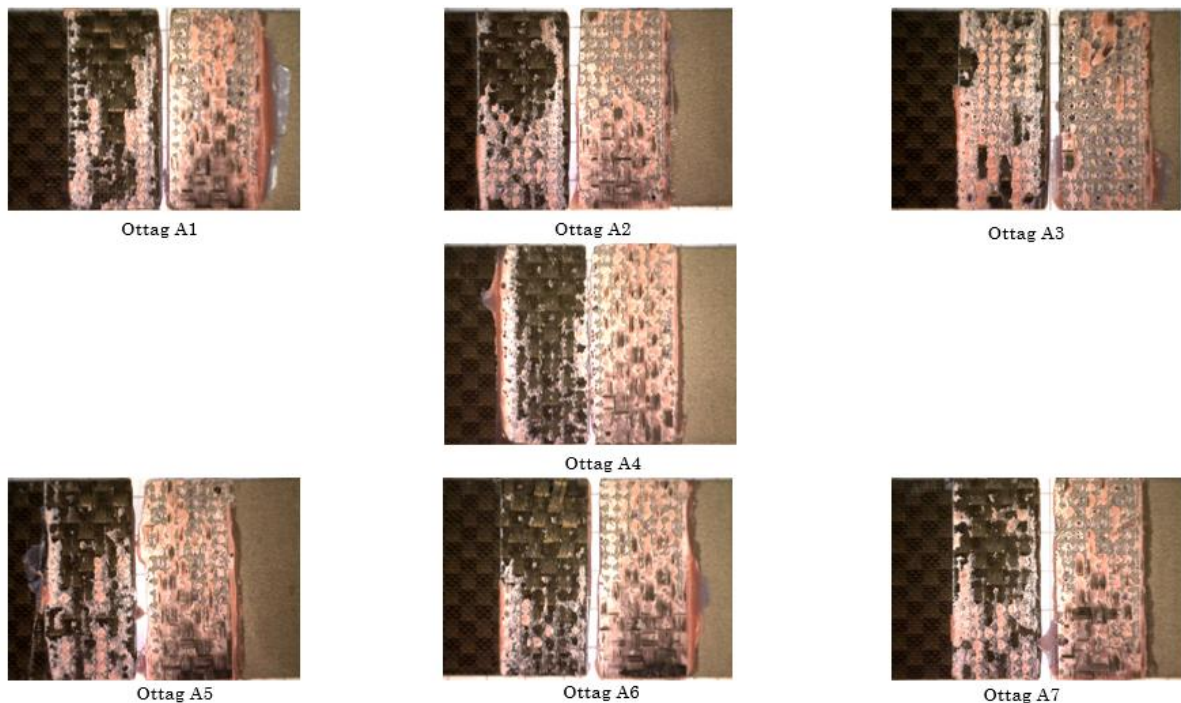


*Fig.4.20 Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura lattice "Ottagonale"*

Ottagonale	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	11,08	25,30	1,05	2,47	1,44	1,40	30,59	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	10,89	25,28	1,01	2,43	1,42	1,43	29,52	Adhesive/light-fiber tear
Provino 3	11,05	25,37	1,10	2,37	1,43	1,43	31,04	Adhesive/light-fiber tear
Provino 4	10,91	25,18	1,07	2,31	1,38	1,46	27,01	Adhesive/light-fiber tear
Provino 5	10,87	25,06	1,00	2,4	1,45	1,46	28,62	Adhesive/light-fiber tear
Provino 6	10,85	25,37	0,99	2,46	1,43	1,56	29,45	Adhesive/light-fiber tear
Provino 7	10,80	25,21	0,97	2,49	1,44	1,46	30,39	Adhesive/light-fiber tear

**Tab. 5.13** risultati statistici prova di trazione del lotto "Ottag"

La struttura ottagonale risulta l'unica struttura, tra quelle lattice disegnate per questa prima campagna di sperimentazione, che non ha permesso un'ottima permeazione della colla in fase di deposizione. Questo aspetto può essere legato al fatto di aver realizzato una cella unitaria troppo densa, la cui morfologia non ha permesso alla colla di entrare all'interno; ciò è evidente nelle rilevazioni al microscopio ottico tramite i punti scuri tra il rosa dell'adesivo.

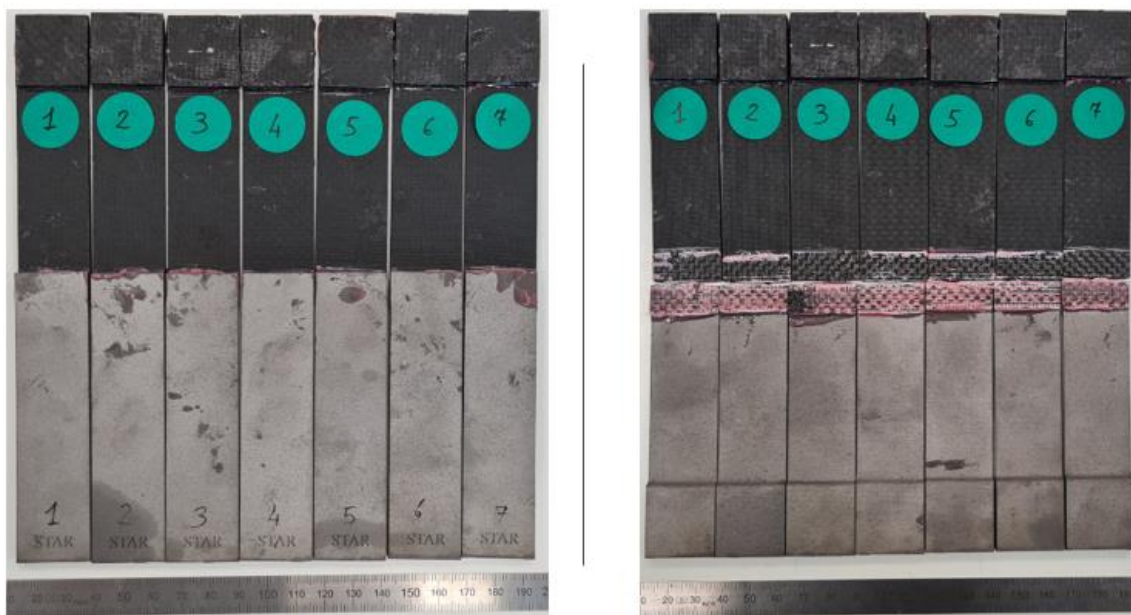


**Fig. 4.21** Superfici di frattura degli aderendi (Ottagonale) in seguito a prova di trazione

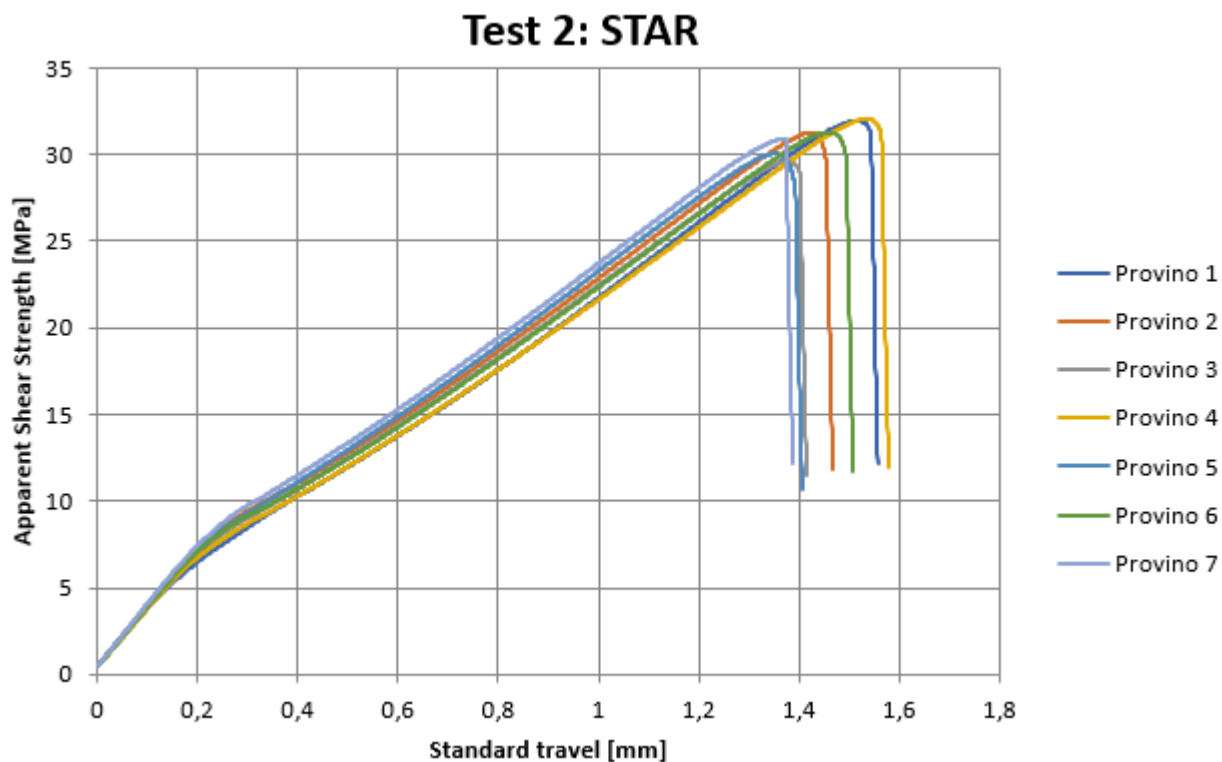
STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,87	2,42	1,43	1,03	25,25	10,92	8272,94	30,01
s	0,06	0,06	0,02	0,05	0,11	0,10	292,70	1,29
n [%]	1,26	2,62	1,60	4,59	0,44	0,96	3,54	4,29

*Tab. 5.14 valori medi prova di trazione del lotto "Ottag°"*

• Struttura lattice "STAR"



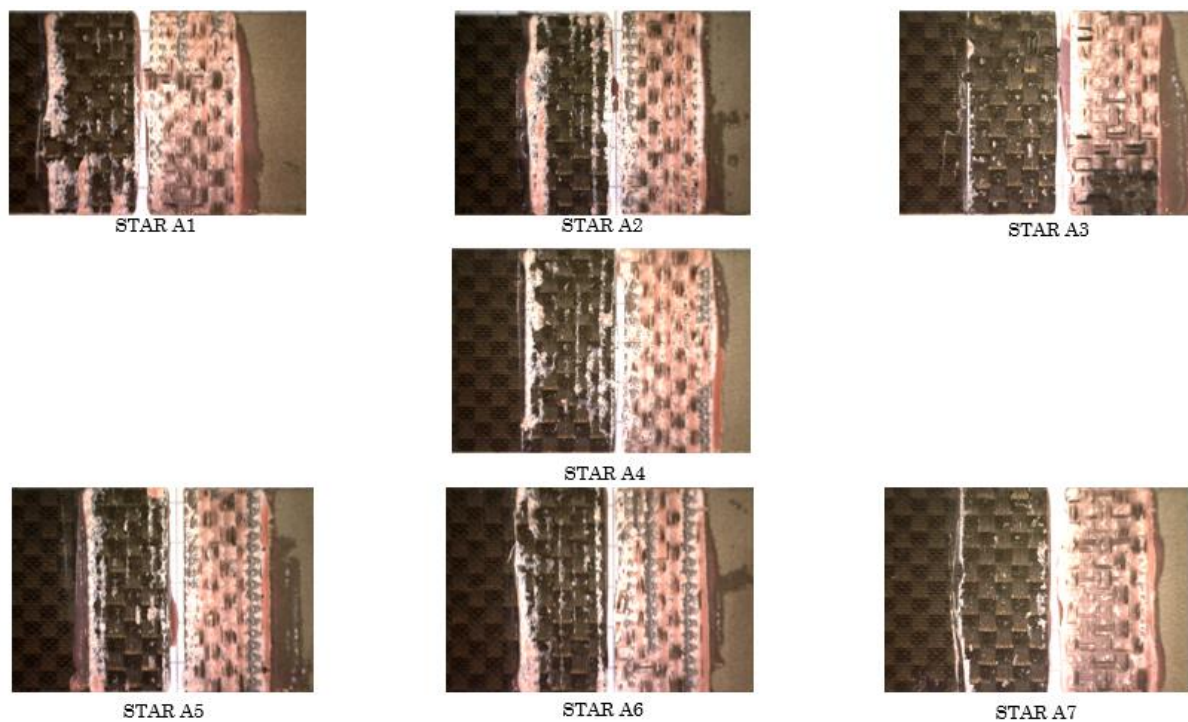
*Fig.4.22 provini con struttura lattice "STAR" prima e dopo rottura*



*Fig.4.23 Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura lattice "STAR"*

STAR	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,54	25,35	0,88	2,28	1,48	1,40	31,93	Adhesive/fiber tear
Provino 2	10,4	25,17	0,94	2,33	1,45	1,43	31,26	Adhesive/fiber tear
Provino 3	10,78	25,21	1,01	2,38	1,38	1,43	29,57	fiber tear
Provino 4	10,98	25,1	0,98	2,41	1,43	1,46	32,08	Adhesive/fiber tear
Provino 5	10,28	25,24	0,91	2,46	1,5	1,46	30,04	Adhesive/fiber tear
Provino 6	10,73	25,25	0,9	2,37	1,44	1,56	31,27	Adhesive/fiber tear
Provino 7	10,25	25,35	0,91	2,41	1,41	1,46	30,93	Adhesive/fiber tear

**Tab. 5.15** risultati statistici prova di trazione del lotto “STAR”



**Fig. 4.24** Superfici di frattura degli aderendi (Star) in seguito a prova di trazione

La struttura lattice *star*, caratterizzata da una cella unitaria con trabecole angolari, si distingue dalle altre per la bassa densità e dunque per la possibilità di integrare al suo interno l’adesivo necessario a realizzare l’incollaggio. I risultati, in termini di tensioni massime raggiunte, sono sicuramente positivi se comparati con quelli del test 1. In nessun caso si è ottenuta rottura coesiva del giunto, bensì si è registrata rottura per delaminazione dell’aderendo in CFRP nel caso del provino 4.

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,75	2,38	1,44	0,93	25,24	10,57	8271,09	31,01
S	0,08	0,06	0,04	0,05	0,09	0,28	359,81	0,93
n [%]	1,60	2,47	2,82	5,02	0,36	2,60	4,35	2,98

Tab. 5.16 valori medi prova di trazione del lotto "STAR"

## 5.5 Test 3: Giunzioni incollate per mezzo di strutture grip

- Struttura grip "dente"

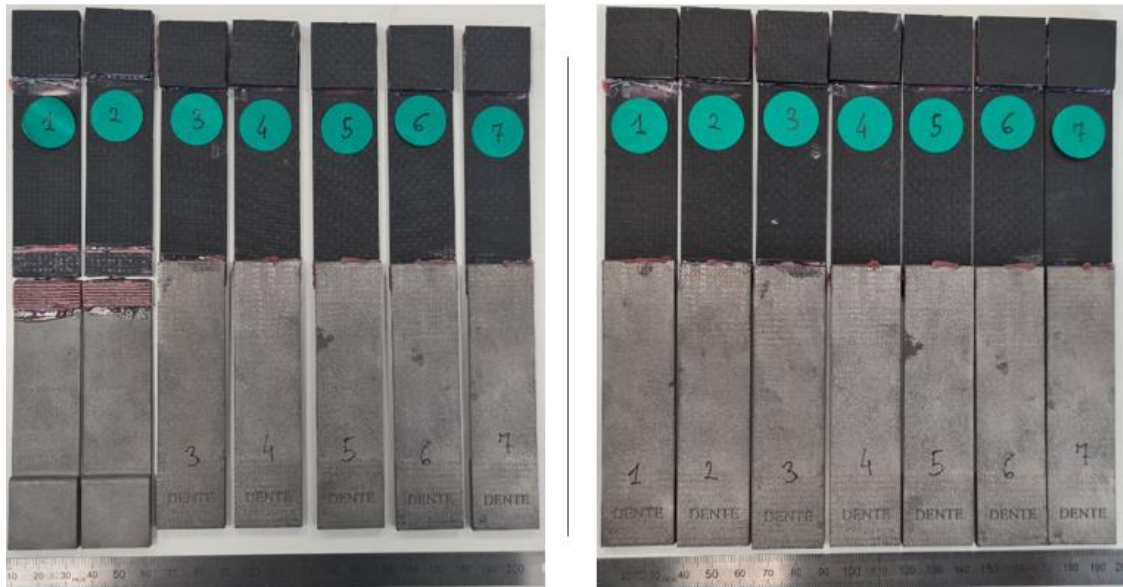


Fig.4.25 provini con struttura grip "DENTE" prima e dopo rottura

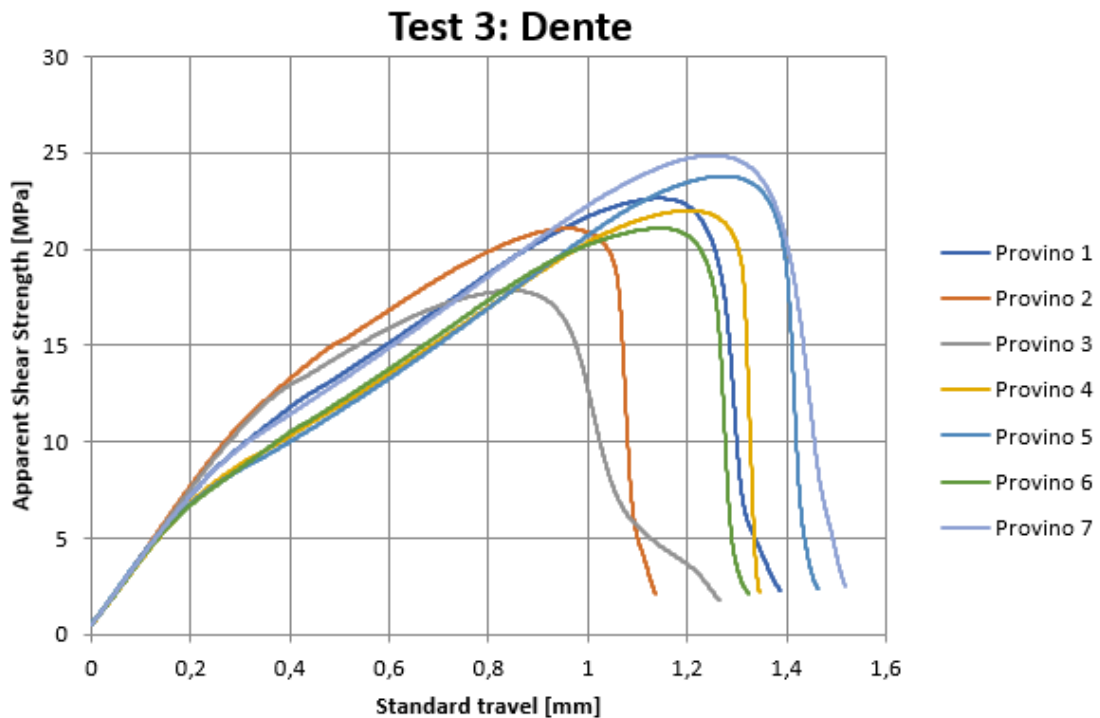


Fig.4.26 Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura grip "dente"

Dal grafico si nota subito come non sono stati raggiunti i requisiti minimi di sforzo di taglio nella prima tipologia di struttura *grip* testata. Dalla tabella sottostante si nota, infatti, come il valor medio di  $t_{MAX}$  sia pari a 21,89 MPa e che il carico massimo raggiunto dalla macchina sia pari a 5569,08 N, in entrambi i casi ben al di sotto rispetto a quelli visti fin ora nel test 2 e comunque rispetto a ciò che si auspicherebbe ottenere da un provino a singola sovrapposizione.

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,98	2,38	1,59	1,04	25,44	10,00	5569,08	21,89
s	0,17	0,16	0,09	0,09	0,08	0,00	563,33	2,24
n [%]	3,45	6,62	5,67	9,04	0,30	0,00	10,12	10,23

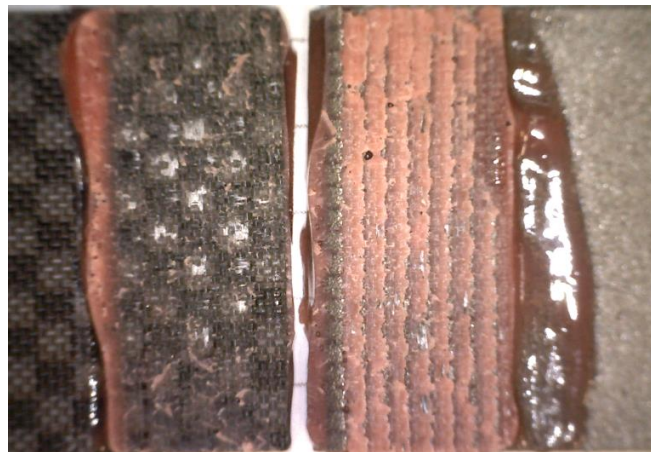
**Tab. 5.17** valori medi prova di trazione del lotto "DENTE"

Da una prima analisi del provino testato si nota un distacco significativo dell'adesivo dalla struttura metallica realizzata. Questo aspetto può essere imputato a due fattori: il primo di tipo geometrico, infatti è possibile che una forma dentellata e ricurva verso l'interno causi la formazione di cricche e, come si nota nella figura successiva, la loro propagazione da una superficie dell'aderendo all'altra.



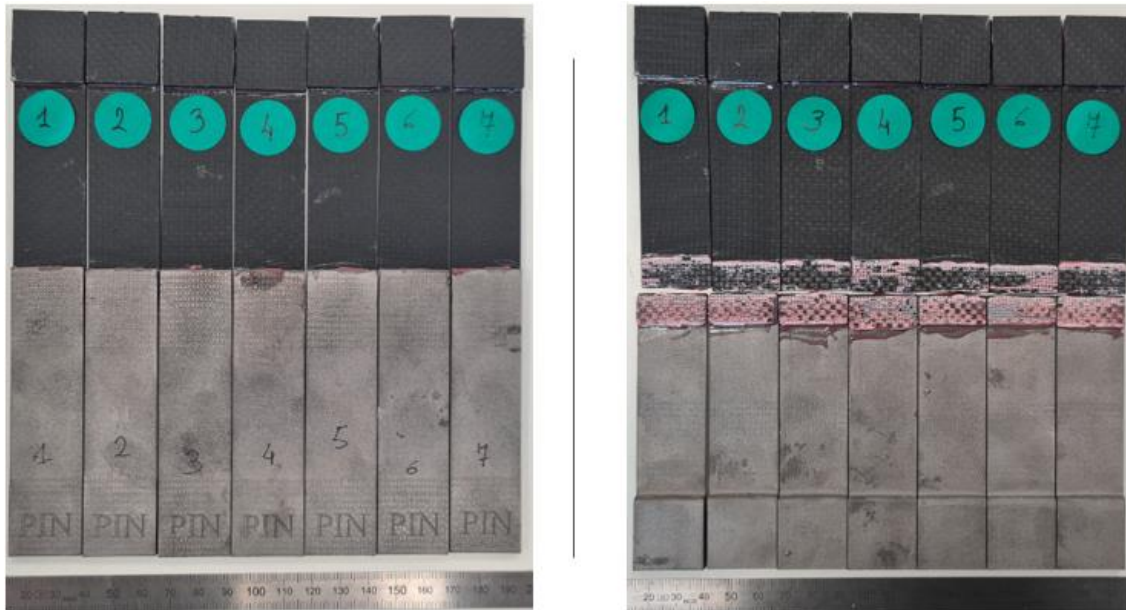
**Fig. 4.27** vista laterale del provino 3: rottura dell'adesivo

La seconda causa è sicuramente legata alla spaziatura delle features superficiali realizzate, infatti, come si nota in figura 4.28, le strutture cellulari risultano molto ravvicinate tra di loro, non permettendo una corretta distribuzione dell'adesivo.

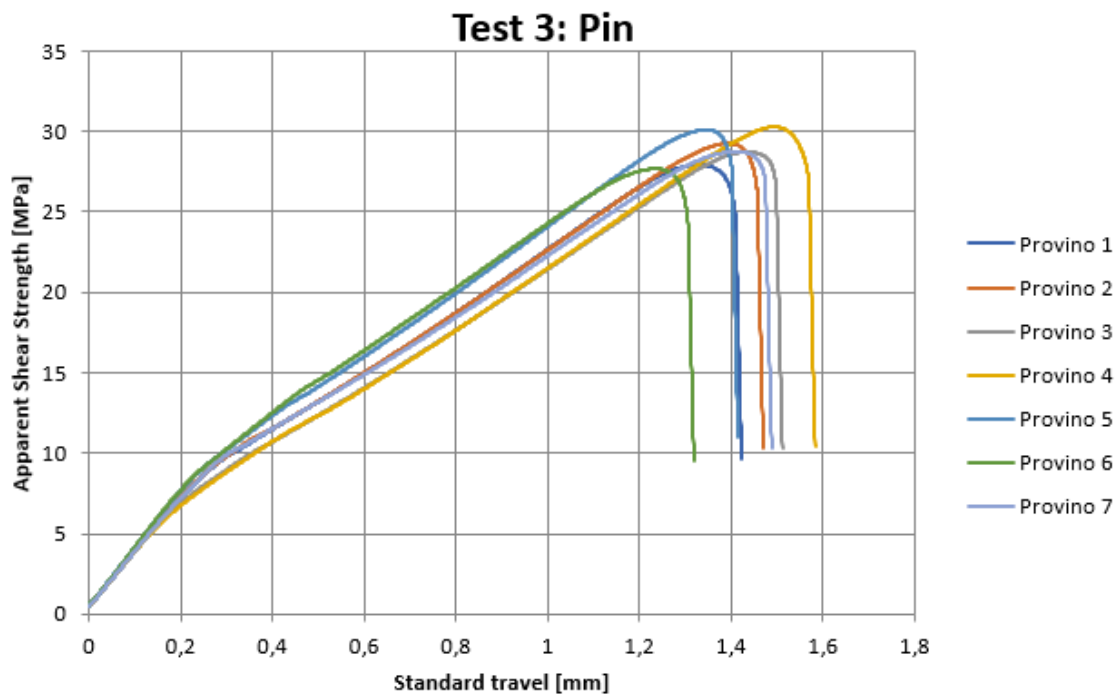


**Fig. 4.28** Superficie di frattura degli aderendi (Dente) del provino 1 in seguito a prova di trazione

- Struttura grip “pin”



**Fig.4.29** provini con struttura grip “pin” prima e dopo rottura



**Fig.4.30** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura grip “pin”

Pin	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,73	25,40	0,93	2,37	1,66	1,42	27,92	Adhesive/fiber tear
Provino 2	10,60	25,29	0,94	2,44	1,63	1,47	29,25	Adhesive/fiber tear
Provino 3	11,03	25,35	0,93	2,15	1,63	1,51	28,72	Adhesive/fiber tear

Provino 4	10,62	25,39	1,01	2,47	1,55	1,58	30,29	Adhesive/fiber tear
Provino 5	10,00	25,38	0,73	2,32	1,78	1,41	30,11	Adhesive/fiber tear
Provino 6	10,03	25,31	1,00	2,29	1,64	1,32	27,67	Adhesive/fiber tear
Provino 7	10,85	25,40	0,75	2,48	1,62	1,49	28,75	Adhesive/fiber tear

**Tab. 5.18** risultati statistici prova di trazione del lotto "PIN°"



**Fig. 4.31** Superfici di frattura degli aderendi (Pin) in seguito a prova di trazione

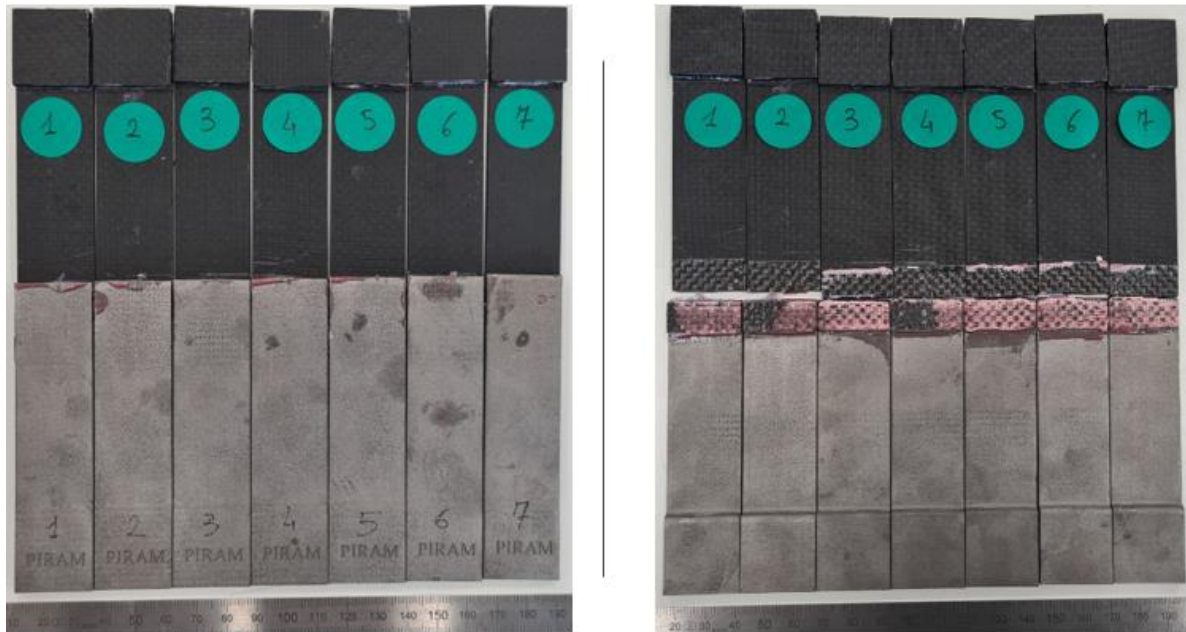
Il lotto di provini con tipologia *pin* ha portato ad ottenere dei risultati sicuramente favorevoli rispetto al caso precedente ed in linea rispetto a quanto dichiarato nel *data-sheet* della colla. Seppur con carichi massimi raggiunti più bassi rispetto a quelli raggiunti nella tipologia di provini con struttura lattice, le tensioni massime raggiunte sono leggermente più basse (circa 28,29 MPa) nonostante queste strutture siano state pensate per una configurazione di giunti co-curati.

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	4,90	2,36	1,64	0,90	25,36	10,55	7749,40	28,96
s	0,11	0,12	0,07	0,11	0,04	0,39	375,94	1,00
n [%]	2,31	5,00	4,20	12,60	0,18	3,74	4,85	3,45

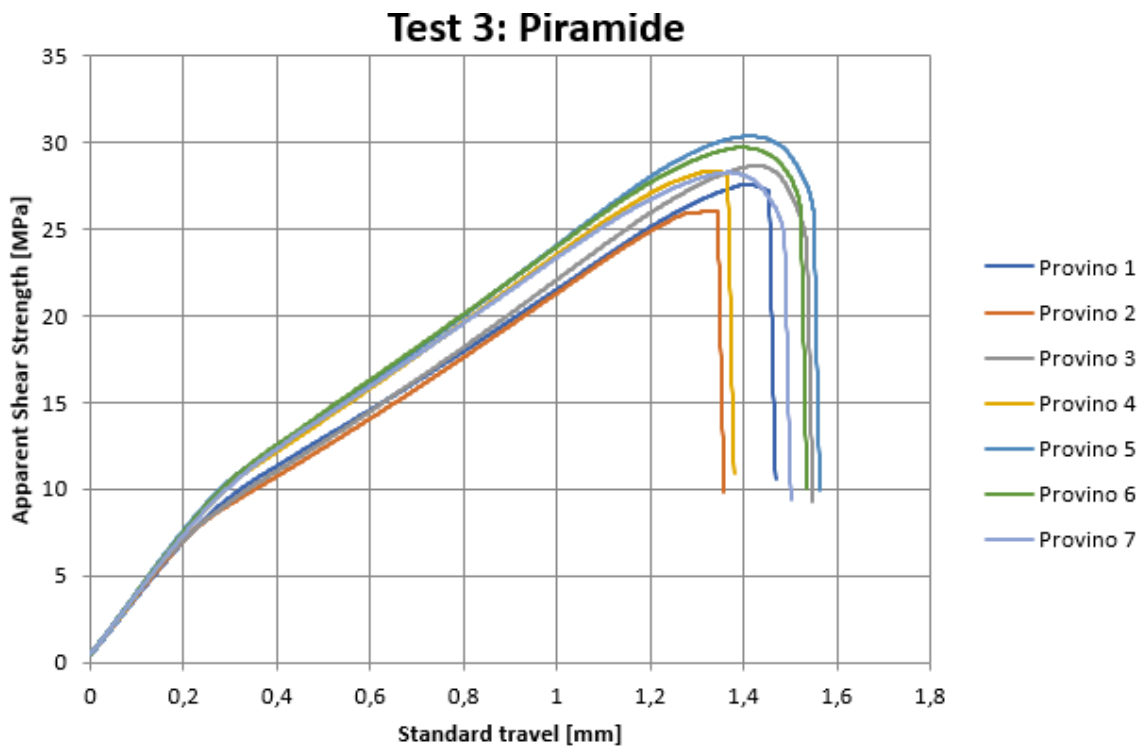
**Tab. 5.19** valori medi prova di trazione del lotto "PIN"



- Struttura grip “Piramide”



**Fig.4.32** provini con struttura grip “piramide” prima e dopo rottura

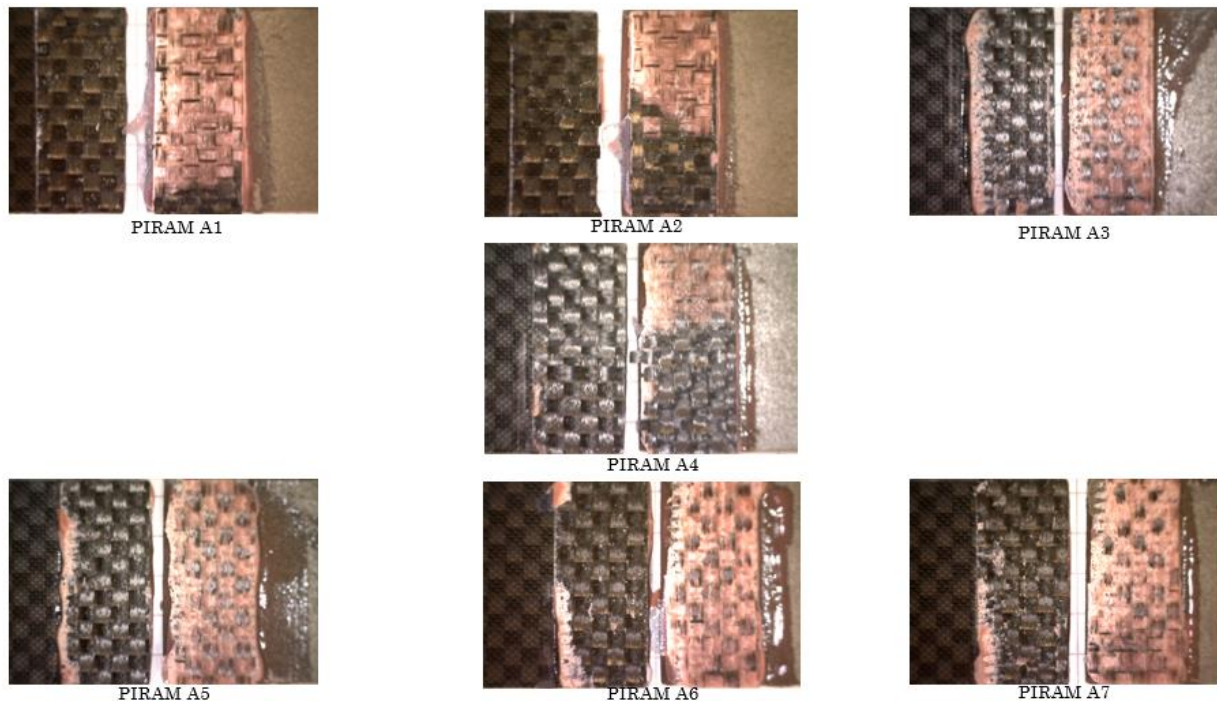


**Fig.4.33** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura grip “piramide”

Anche in questo caso si evince dal grafico tensione-deformazione che i valori massimi di tensione tangenziale sono in linea con il caso precedente di struttura *pin*. Tuttavia, ciò che si nota dalle rilevazioni effettuate al microscopio digitale è che la superficie del composito in fibra di carbonio risulta maggiormente delaminata rispetto al caso precedente. Ciò è dovuto alla geometria delle unità realizzate con forma appuntita, con l'obiettivo di compenetrare il composito, insidiandosi tra le fibre e incrementando di fatto le prestazioni del giunto. dalla tipologia di cedimento si evince come questa tipologia si presta ad una soluzione co-curata.

Piramide	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,93	25,37	0,85	2,56	1,64	1,47	27,54	Adhesive/fiber tear
Provino 2	10,65	25,42	0,92	2,48	1,66	1,36	26,03	Adhesive/fiber tear
Provino 3	10,12	25,31	0,88	2,49	1,65	1,55	28,62	Adhesive/fiber tear
Provino 4	10,63	25,28	0,89	2,52	1,67	1,38	28,29	Adhesive/fiber tear
Provino 5	10,29	25,12	0,92	2,54	1,63	1,56	30,34	Adhesive/fiber tear
Provino 6	10,25	25,35	0,92	2,59	1,62	1,54	29,68	Adhesive/fiber tear
Provino 7	10,26	25,36	0,84	2,51	1,63	1,50	28,25	Adhesive/fiber tear

**Tab. 5.20** risultati statistici prova di trazione del lotto "PIRAMIDE"



**Fig. 4.34** Superfici di frattura degli aderendi (PIRAMIDE) in seguito a prova di trazione

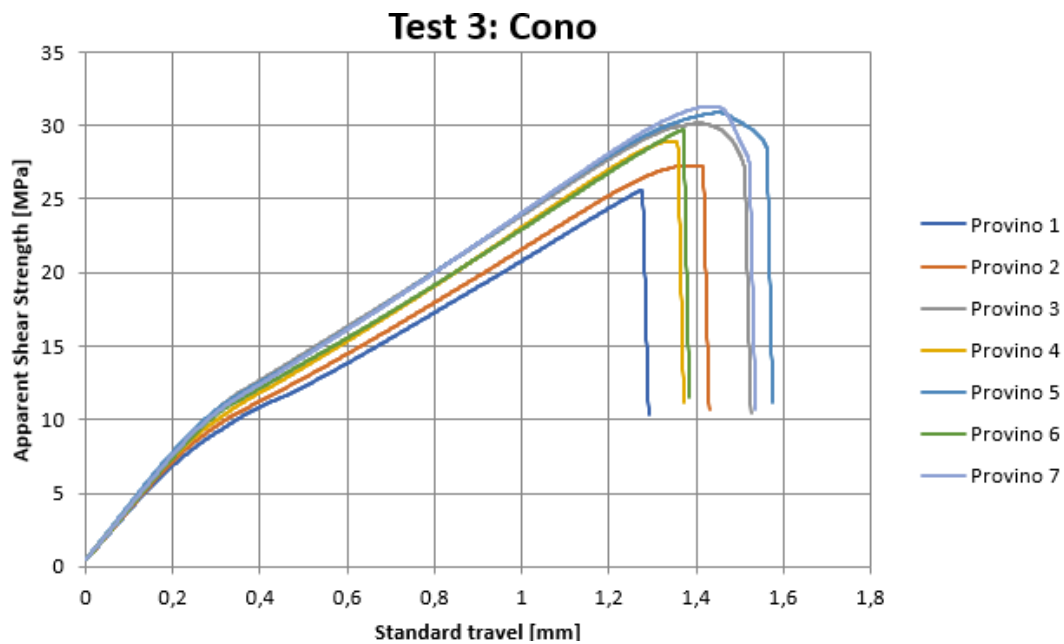
STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	5,06	2,53	1,64	0,89	25,32	10,45	7504,18	28,40
s	0,05	0,04	0,02	0,03	0,10	0,29	273,49	1,41
n [%]	0,96	1,54	1,10	3,81	0,38	2,80	3,64	4,95

**Tab. 5.21** valori medi prova di trazione del lotto "PIRAMIDE"

- Struttura grip “Cono”



**Fig.4.35** provini con struttura grip “cono” prima e dopo rottura

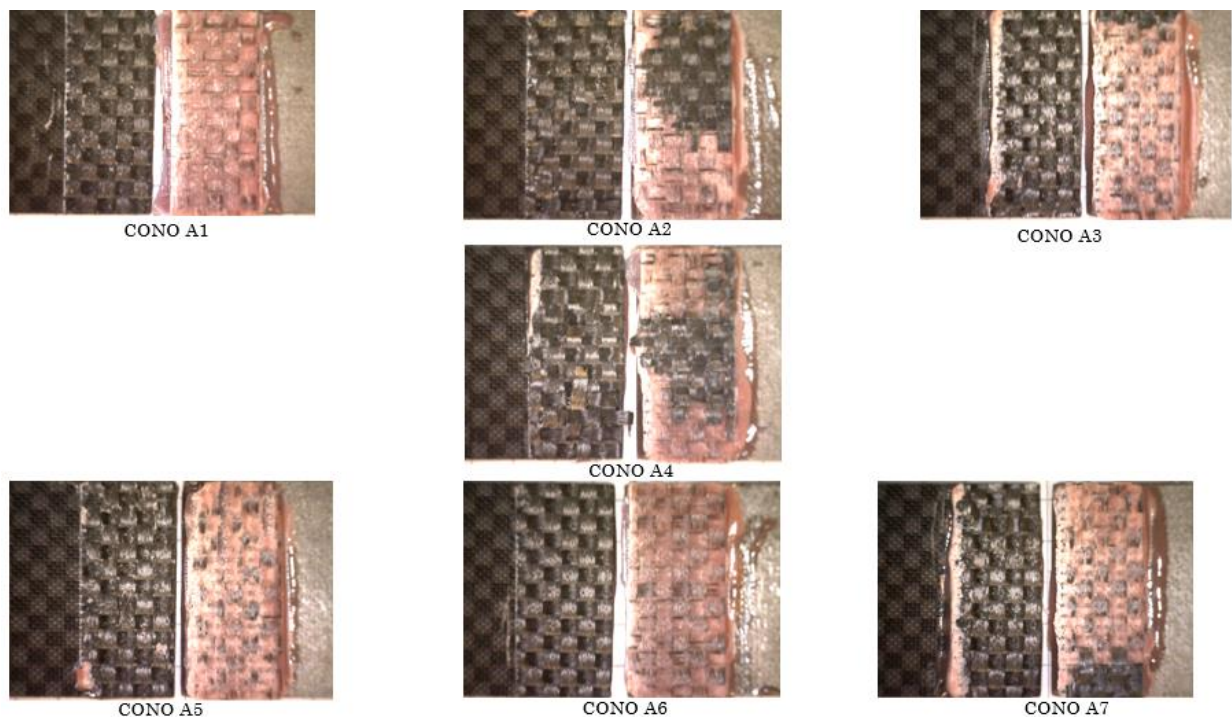


**Fig.4.36** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura grip “cono”

I risultati ottenuti per questa tipologia di strutture grip in termini di massima tensione tangenziale sono superiori rispetto ai precedenti “piramide”. Infatti, ad eccezione del provino 1, gli altri giunti testati hanno registrato una  $t_{MAX}$  intorno ai 30 MPa, probabilmente dovuto ad una buona permeazione dell’adesivo all’interno della struttura metallica. La geometria della struttura *grip* ha permesso non solo che la colla penetrasse tra i vuoti creati dai coni, ma anche che la forma appuntita agganciasse lo strato di composito esterno dell’aderendo in CFRP. Si può notare dalla figura 4.34 come la rottura sia avvenuta per cedimento non dello strato adesivo, bensì per delaminazione della superficie esterna del composito. A termine della prova si è registrata una riduzione dello spessore dell’aderendo CFRP di 0,2 mm.

CONO	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,9	25,29	0,99	2,41	1,58	1,29	25,62	Adhesive/light-fiber tear
Provino 2	11,02	25,33	0,98	2,5	1,63	1,43	27,30	Adhesive/fiber tear
Provino 3	10,54	25,35	0,96	2,52	1,58	1,53	30,18	Adhesive/fiber tear
Provino 4	10,35	25,32	0,92	2,48	1,55	1,37	28,91	Adhesive/fiber tear
Provino 5	9,96	25,52	0,9	2,55	1,64	1,58	30,87	Adhesive/light-fiber tear
Provino 6	10,42	25,35	0,92	2,52	1,63	1,39	29,73	Adhesive/light-fiber tear
Provino 7	10,11	25,59	0,99	2,37	1,62	1,54	31,32	Adhesive/fiber tear

**Tab. 5.22** risultati statistici prova di trazione del lotto "CONO"



**Fig. 4.37** Superfici di frattura degli aderenti (CONO) in seguito a prova di trazione

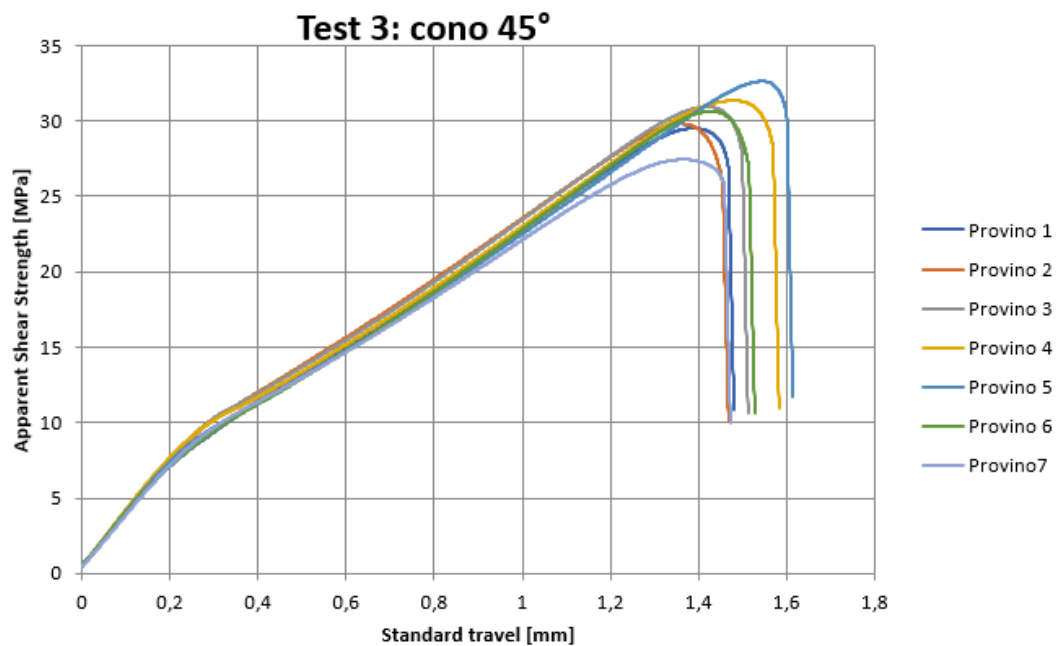
STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	5,03	2,48	1,60	0,95	25,39	10,47	7732,03	29,13
s	0,06	0,07	0,03	0,04	0,11	0,39	356,05	2,04
n [%]	1,25	2,63	2,12	3,95	0,45	3,70	4,60	7,00

**Tab. 5.23** valori medi prova di trazione del lotto "CONO"

- Struttura grip “Cono 45°”



**Fig.4.38** provini con struttura grip “cono 45°” prima e dopo rottura

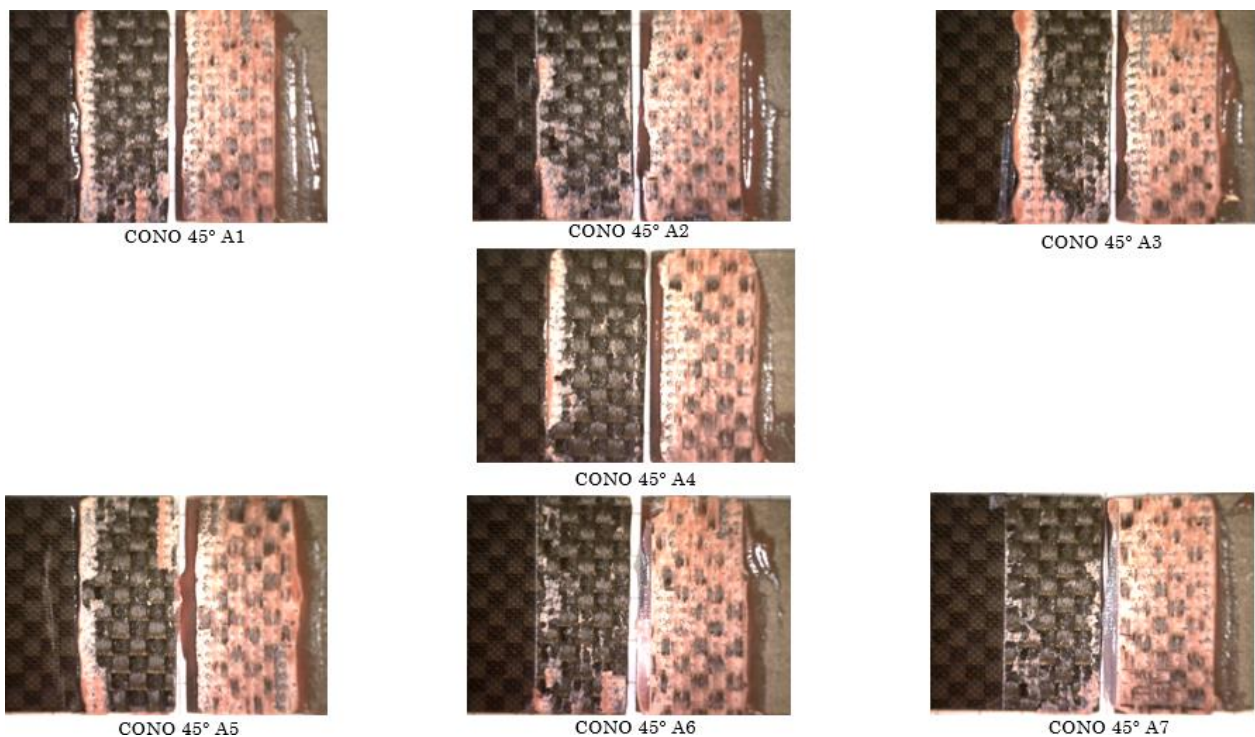


**Fig.4.39** Grafico dei test di lap-shear per provini con struttura grip “Cono 45°”

L’ultima struttura grip “cono 45°” presenta una sezione e spaziatura uguale alla precedente, con la differenza di inclinazione del cono a 45° rispetto alla superficie di appoggio. In questo caso si riscontra minor variabilità nei dati rilevati (5,39%) rispetto al precedente e una media di massima tensione tangenziale pari a 30,33 MPa, di poco superiore rispetto al lotto “cono”.

CONO 45°	Lunghezza Overlap [mm]	Larghezza Overlap [mm]	Spessore colla [mm]	Spessore CFRP [mm]	Spessore Ti6Al4V [mm]	Spostamento massimo [mm]	Massima tensione tangenziale [MPa]	Tipo di cedimento
Tolleranza [mm]	0,2	0,05	0,10	0,05	0,05			
Provino 1	10,42	25,37	0,91	2,42	1,65	1,48	29,51	Adhesive/fiber tear
Provino 2	10,49	25,36	0,99	2,55	1,61	1,47	29,82	Adhesive/fiber tear
Provino 3	10,33	25,4	0,97	2,49	1,61	1,51	30,94	Adhesive/fiber tear
Provino 4	10,41	25,21	1,01	2,28	1,69	1,58	31,34	Adhesive/fiber tear
Provino 5	10,39	25,30	0,96	2,34	1,61	1,61	32,64	Adhesive/fiber tear
Provino 6	10,32	25,43	0,88	2,42	1,67	1,53	30,64	Adhesive/fiber tear
Provino 7	10,95	25,45	0,96	2,44	1,67	1,47	27,45	Adhesive/fiber tear

**Tab. 5.24** risultati statistici prova di trazione del lotto "CONO 45°"



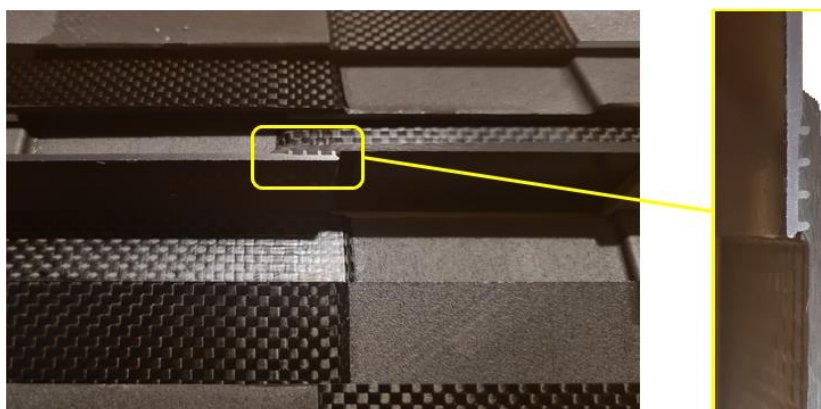
**Fig. 4.40** Superfici di frattura degli aderendi (CONO 45°) in seguito a prova di trazione

STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	5,02	2,42	1,64	0,95	25,36	10,47	8049,46	30,33
s	0,08	0,09	0,03	0,05	0,08	0,22	302,94	1,63
n [%]	1,62	3,70	2,07	4,72	0,33	2,08	3,76	5,39

**Tab. 5.25** valori medi prova di trazione del lotto "CONO 45°"

## 5.6 Test 4: Giunzioni co-curate

L'ultimo test ha lo scopo di verificare la tenuta meccanica di giunzioni non più ottenute tramite adesivo strutturale, bensì sfruttando il processo di co-cura all'interno del processo tecnologico della laminazione in autoclave. Dalla figura successiva si nota come, dopo aver ricavato i singoli provini dal pannello unico, i due aderenti siano rimasti agganciati grazie alla resina termoindurente contenuta all'interno della matrice del materiale composito. Inoltre, è evidente come le strutture metalliche a forma di pin nella zona di overlap abbiano compenetrato il substrato in composito comportando di fatto un incremento delle prestazioni meccaniche all'interfaccia



*Fig. 4.41 giunti co-curati (a sinistra) e ingrandimento della zona di overlap (a destra)*

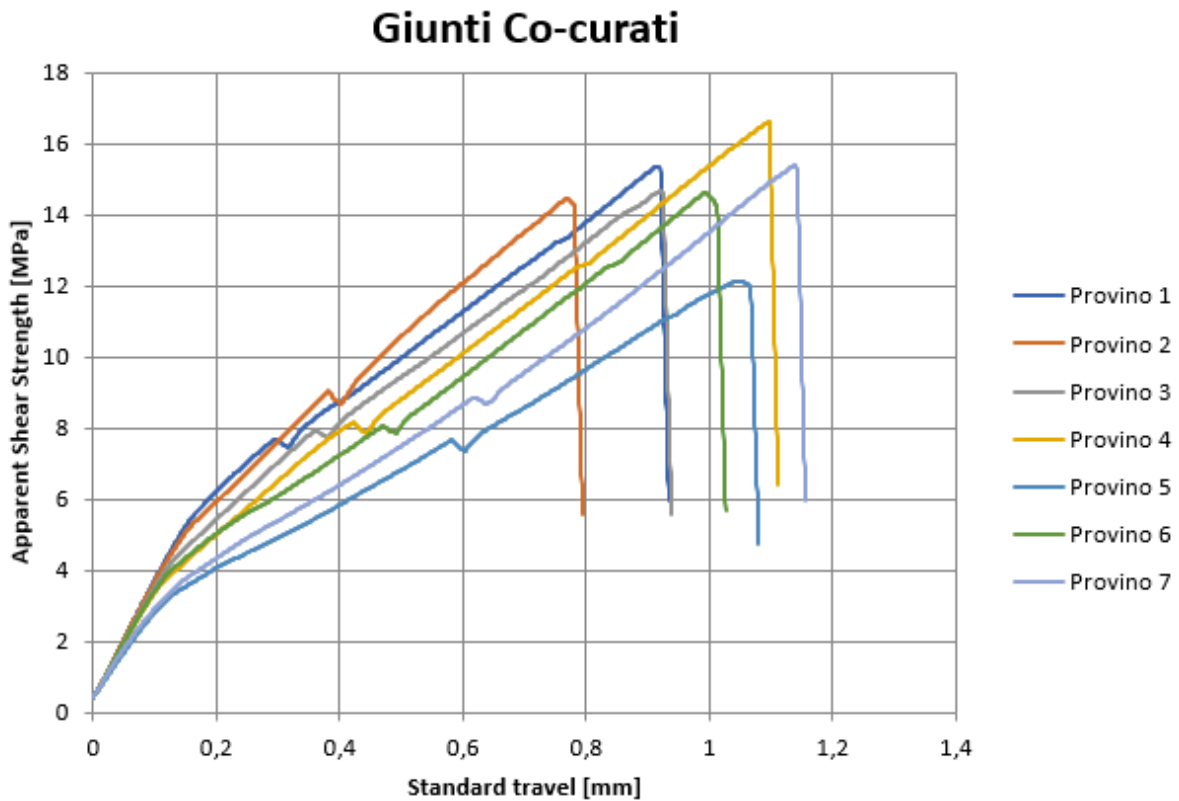
Prima di effettuare la prova con macchina di trazione dei provini a singola sovrapposizione è stata eseguita una rilevazione al microscopio ottico digitale della zona di overlap. Dalla figura 4.42 si nota come le strutture metalliche, disegnate volutamente con sezione ridotta, abbiano compenetrato la fibra, causando un andamento ondulato delle tessuto intrecciato per seguire la geometria conica del metallo. Si nota anche come l'aderendo in CFRP vada oltre la lunghezza della zona di sovrapposizione, nominalmente di 10 mm.



*Fig. 4.42 rilevazione al microscopio ottico della zona di overlap*

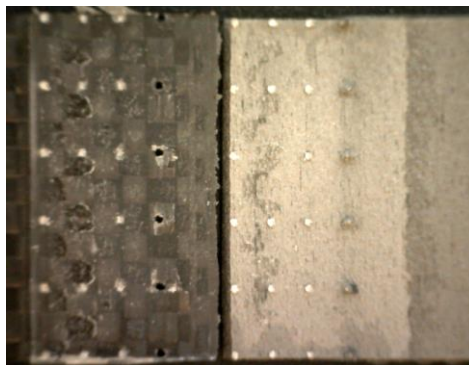
Il grafico successivo mostra l'andamento delle tensioni massime tangenziali in funzione dello spostamento delle pinze della macchina. Si evince che solo nel caso del provino 4 è stato raggiunto un valore di  $t_{MAX}$  pari a 16,6 MPa, sicuramente di gran lunga inferiore a quelli ottenuti nei provini testati precedentemente. Inoltre, si nota come in prossimità di tensioni pari a circa 8 MPa sia presente un gradino, dovuto al distaccamento della prima fila di strutture a pin dal substrato in composito. Questo comporta una netta riduzione della superficie di overlap su cui

agisce il carico applicato, comportando valori di tensioni massime tangenziale non soddisfacenti.



*Fig. 4.43 Grafico dei test di lap-shear per provini CO-CURATI*

Mediamente i risultati mostrano una tensione tangenziale massima di 14,74 MPa, con una variazione del 9%, dovuto al fatto di aver avuto cause di cedimento diverse su ogni provino testato. Valori così bassi di  $t_{MAX}$  sono da imputare ad una netta riduzione della zona di overlap, dopo il distacco della prima fila strutture pin in prossimità della zona di overlap. Si nota, infatti, come nella figura successiva, le strutture pin siano rimaste intatte lasciando dei fori sul substrato in composito, mentre le successive strutture, su cui è agito il restante carico, siano state staccate dall'aderendo metallico, rimanendo ancorate alla superficie in CFRP.



*Fig. 4.44 rilevazione al microscopio ottico della zona di overlap dopo rottura*

Nella tabella successiva vengono riportate le statistiche di questo lotto di provini.



STATISTICHE	h	t <sub>A1</sub>	t <sub>A2</sub>	t <sub>AD</sub>	b	dL	P <sub>MAX</sub>	t <sub>MAX</sub>
n = 0	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	MPa
x	3,52	1,60	1,55	0,37	25,43	12,52	4696,10	14,74
s	0,31	0,39	0,04	0,12	0,07	0,14	457,07	1,37
n [%]	8,83	24,15	2,35	31,44	0,29	1,14	9,73	9,28

**Tab. 5.26** valori medi prova di trazione del lotto "CO-CURATI"

La co-laminazione ha portato ad una lunghezza della zona di overlap di 12,52 mm, nonostante i fogli di prepreg siano stati tagliati della lunghezza di 100 mm con l'obiettivo di ottenere una lunghezza nominale di 10 mm. Per quanto riguarda lo spessore della zona di overlap si nota un incremento di 0,37 mm, dovuto al fatto che il tessuto in fibra ha un andamento ondulato, causato dalle strutture in pin, che ha causato un innalzamento del substrato in composito.

## 6 Conclusioni e sviluppi futuri

Da un'attenta analisi dei test, si può concludere che la progettazione del giunto Ti-6Al-4V-CFRP ha portato a degli esiti soddisfacenti se si pensa ai risultati ad oggi pervenuti sulle giunzioni ibride metallo-composito.

In primis bisogna guardare al contributo dato dalla progettazione di strutture *lattice/grip* tramite *Additive Manufacturing* e l'influenza sulla tenuta meccanica all'interfaccia aderendo-adesivo. Si è visto, infatti, che nel caso di giunzioni semplicemente incollate, l'introduzione di strutture cellulari nella zona di overlap ha permesso di ottenere un incremento delle tensioni massime tangenziali rispetto a quelle dichiarate nei data-sheet della colla, oltre che una maggior ripetibilità dei dati ottenuti rispetto al caso di aderenti lisci (privi di strutture). La struttura cubica a facce centrate di tipo 2 è risultata quella con valori di  $t_{MAX}$  maggiori, raggiungendo un valor medio di 32,05 MPa con minore dispersione dei dati ed uno scarto residuo percentuale di 2,05 %. Risulta necessaria anche una considerazione sulla normativa ASTM di riferimento, da cui sono stati ricavati i dati geometrici per la modellazione dei provini in lega di titanio ed in composito in fibra di carbonio. Sono state necessarie delle modifiche sulla zona di overlap per l'introduzione di strutture *lattice/grip* in quanto ad oggi non sono presenti alcune norme riguardo alla progettazione di giunti sfruttando tecnologie additive. Oltre allo spessore, portato da 1,5 mm a 2,26 mm, le ipotesi effettuate sulla lunghezza di overlap, per non causare *stock-break failure*, hanno portato a dei risultati più accurati per la valutazione ed il confronto tra un una struttura e l'altra. Sempre nel caso di giunzione incollata, per mezzo di adesivo strutturale, si è visto che l'introduzione di strutture *grip* non hanno migliorato le performance del giunto rispetto alle strutture *lattice*, in quanto non è stata ottenuta compenetrazione del metallo all'interno del substrato in composito.

Lo sviluppo di una nuova strategia di giunzione, da realizzare all'interno del medesimo processo tecnologico, inizialmente non ha portato a dei risultati soddisfacenti, tanto da dover modificare le strutture metalliche all'interfaccia per garantire una tenuta minima in modo da testare i provini. Per ottenere un giunto dalle performance accettabili sono state effettuate diverse prove, modificando attrezzatura ausiliaria e orientamento dei componenti all'interno dello stampo. Il risultato finale, in seguito a co-cura in autoclave, ci ha permesso di ottenere ciò che era l'obiettivo di questa tesi: un giunto ibrido con le strutture metalliche penetranti nel CFRP. Ciò è stato possibile grazie ad una struttura pin dalla sezione circolare pari 0,70 mm e altezza massima di 1,2 mm, realizzata con la tecnica *Selective laser melting* mediante macchina EOS M-280.

Se da un lato sono stati ottenuti ottimi risultati dal punto di vista tecnologico, i risultati in termini di tensioni massime tangenziali raggiunti dal lotto di sette provini co-curati non sono stati soddisfacenti, soprattutto se confrontati con quelli dei giunti semplicemente incollati. Questo aspetto è da imputare al fatto di aver utilizzato una geometria cellulare troppo sottile che, in seguito ad uno sforzo di taglio, si è spezzata rimanendo all'interno del substrato in composito.

Sicuramente l'utilizzo della tecnologia della co-laminazione in autoclave ha permesso di ottenere numerosi vantaggi in ottica di giunzioni ibride, risparmiando uno step produttivo, che consiste nella deposizione della colla, e risultando più accurato nelle

dimensioni della zona di overlap rispetto ad un processo di distribuzione manuale dell'adesivo.

Dalle prove di laminazione effettuate si è potuto constatare che la resina epossidica contenuta all'interno della matrice può essere sufficiente a garantire delle buone prestazioni meccaniche all'interfaccia, tuttavia le strutture metalliche nella zona di overlap non sono risultate abbastanza robuste da resistere a carichi di trazione superiori ai 4700 *N*.

Per tale motivo risulterà fondamentale, una volta consolidata la strategia di giunzione, migliorare i parametri delle geometrie nella zona di sovrapposizione lato metallo. In particolare, bisognerà modificare i parametri di sezione e spaziatura lungo i due assi, trovando il giusto compromesso tra compenetrazione nel CFRP e realizzabilità tramite tecniche additive.

## Bibliografia

- [1] Slide del corso “Tecniche di fabbricazione additiva” tenuto dal Prof. Luca Iuliano del Politecnico di Torino.
- [2] <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>.
- [3] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker “Additive Manufacturing Technologies”, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.
- [4] [https://www.beam-it.eu/ENG/Titanium-grade-5-Ti6Al4V\\_DMLS.php](https://www.beam-it.eu/ENG/Titanium-grade-5-Ti6Al4V_DMLS.php)
- [5] Slide del corso “Scienze e tecnologia dei materiali” tenuto dalla Prof.ssa Silvia Spriano del Politecnico di Torino.
- [6] Infobuild, Materiali Compositi, cosa sono e come vengono prodotti, 18 febbraio 2013, <https://www.infobuild.it/approfondimenti/materiali-compositi/#Tecnologie-fabbricazione-materiali-compositi>
- [7] <https://bercella.it/advanced-manufacturing/>
- [8] <https://www.autotecnica.org/dallara-stradale-analisi-tecnica/>
- [9] [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-bolted-joint-d\\_fig1\\_268514487](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-bolted-joint-d_fig1_268514487)
- [10] P. Cirillo, Modellazione analitica di giunzioni incollate in materiale composito, Tesi di dottorato, Dip. di ingegneria chimica, Università di Napoli Federico II, a.a 2015/2016 [http://www.fedoa.unina.it/10750/1/Cirillo\\_Pierluigi\\_28.pdf](http://www.fedoa.unina.it/10750/1/Cirillo_Pierluigi_28.pdf)
- [11] Giunzioni di materiali compositi: <https://imechanica.org/files/Cap15.pdf>
- [12] <https://www.compositesworld.com/articles/hyperjoint-additive-metal-composites-stronger-tougher-joints>
- [13] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014374961000062X>
- [14] [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-20617-7\\_6618](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-20617-7_6618)
- [15] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diffusion-theory>
- [16] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/theories-of-adhesion>
- [17] Giunzioni di materiali compositi: <https://imechanica.org/files/Cap15.pdf>
- [18] [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesive\\_joints](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesive_joints)
- [19] Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints1 <https://www.astm.org/Standards/D5573.htm>
- [20] Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding1 <https://www.astm.org/Standards/D5868.htm>
- [21] [http://www.tanso.se/wp-content/uploads/2017/03/CatalogA4\\_2017Feb.pdf](http://www.tanso.se/wp-content/uploads/2017/03/CatalogA4_2017Feb.pdf)
- [22] Rubini, Azzurra (2020) Analisi del processo produttivo di componenti in fibra di carbonio con autoclave: il caso di HP Composites <https://webthesis.biblio.polito.it/15462/1/tesi.pdf>

## Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro di tesi, a cui ho dedicato gran parte del mio tempo nell'ultimo anno, desidero ringraziare i miei relatori, il Prof. Giorgio Chiandussi ed il Prof. Andrea Tridello, per aver creduto in me in questo progetto, avermi dato le conoscenze tecniche per poterlo affrontare ed essere sempre stati un punto di riferimento. Sicuramente tutto ciò non sarebbe stato possibile senza la collaborazione di due grandi aziende come Beamit e Bercella, che hanno mostrato il massimo interesse in questo lavoro e fornito il loro know-how, oltre che le loro risorse, per portare a termine un lavoro dai risultati tecnologicamente innovativi. Per tale motivo non posso non ringraziare le due società ed in particolare Michele Antolotti, per avermi fatto sentire parte integrante dell'ufficio tecnico ed essersi dimostrato sempre interessato all'argomento di tesi.

Cinque anni universitari ed un anno in azienda sono risultati fondamentali per la mia crescita professionale, ma sicuramente non avrei raggiunto molti dei miei traguardi se non avessi avuto la vicinanza della mia famiglia. È grazie alle vostre chiamate confortanti, ai continui incitamenti, alle preziose parole dette in momenti difficili che sono riuscito a superare ogni problema. Grazie mamma e papà per i vostri consigli di cui faccio tesoro, per aver gioito insieme a me di ogni traguardo raggiunto ed avermi dato la forza di rialzarmi tutte le volte che sono caduto. Per questo motivo non solo vi dedico questa tesi ma anche la mia vita. Grazie Melissa e Angelo per aver trascorso insieme a me momenti di spensieratezza ed aver condiviso la gioia dell'ultimo esame superato; non dimenticherò mai quel giorno.

Aver conseguito una laurea triennale e magistrale al Politecnico di Torino, distante dalla mia città, mi ha dato la possibilità di conoscere persone speciali con cui ho condiviso percorsi universitari, pause studio e momenti di convivenza. Dunque, grazie a Gianluca, Stani, Dario, Luca, Vito e Giovanni perché senza di voi non avrei vissuto a pieno le mie giornate torinesi. L'amicizia è sempre stato un valore imprescindibile senza il quale non riuscirei ad affrontare con serenità le mie giornate ed è grazie a Gabriele, Fabrizio, Alessio, Vincenzo, Ruben e Cesare se quelle giornate sono ricche di attimi di condivisione, risate e momenti spensierati.

Torino è la città che mi ha dato tanto e a cui mi sento di restituire altrettanto in futuro, non solo per la crescita professionale ma, soprattutto, per avermi fatto conoscere la persona che amo: Caterina. Tu, più di tutti, sai quanti sacrifici ho dovuto fare per giungere al conseguimento della laurea e quante volte ho rinunciato a trascorrere momenti unici con te per lo studio ed il mio senso di responsabilità. Hai convissuto con la parte peggiore di me: le mie ansie, paure e momenti di sconforto trovando sempre il modo per tirarmi su il morale. Spero giorno dopo giorno di poter trovare l'occasione di ringraziarti a sufficienza per il tuo supporto, le tue dolci parole e per avermi fatto vivere con occhi diversi la quotidianità degli ultimi quattro anni. Se, oggi, sono una persona migliore è merito tuo.