



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERI MECCANICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**STUDIO DEL PROCESSO DI ROLL  
BONDING PER LA PRODUZIONE DI  
MACROCOMPOSITI FIBROSI A  
MATRICE METALLICA**

Relatore: Prof. Andrea Ghiotti

Laureando: Paolo Munaretto

Anno Accademico 2013 – 2014



A chi mi vuole bene, per avermi sempre incoraggiato...

e a chi non me ne vuole, per non averlo mai fatto...



# SOMMARIO

Lo studio e l'utilizzo dei materiali compositi ha avuto un rapido sviluppo negli ultimi anni, grazie alle ottime proprietà meccaniche che questi materiali riescono a garantire.

Il nostro studio fa riferimento alla produzione di materiali compositi a matrice metallica, che spesso sono formati tramite fusione della matrice stessa, rendendo il processo lungo e costoso. Tali materiali tuttavia stanno avendo uno grande sviluppo nei campi dell'automotive e aerospaziale, rendendo necessario uno studio dei processi per renderli sempre più economicamente vantaggiosi.

Con il seguente lavoro di tesi si vuole studiare la possibilità di produrre un materiale composito sfruttando il processo di roll bonding, ossia laminando due lamiere a cui è interposto un rinforzo, per ottenere un componente unico; il processo di laminazione, da lungo tempo utilizzato nel settore meccanico, è veloce e più economico dei processi di fusione.

In particolare si vuole andare a creare un composito con matrice in alluminio e rinforzo fibroso di vetro o carbonio, andando così a realizzare un materiale che goda della leggerezza dell'alluminio ma che allo stesso tempo riesca ad aumentare le proprie proprietà di resistenza a trazione per mezzo della presenza delle fibre.

Le principali problematiche da affrontare riguardano la realizzazione della saldatura tra le lamiere costituenti la matrice, e la fragilità del rinforzo rispetto gli sforzi di taglio.



# INDICE

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE .....	7
1.1 PROBLEMA SCIENTIFICO .....	7
1.2 STRUTTURA DELLA TESI .....	8
CAPITOLO 2: STATO DELL'ARTE .....	11
2.1 DEFINIZIONE DI COMPOSITO .....	11
2.2 IL CONCETTO DI ANISOTROPIA .....	12
2.3 COMPOSITI FIBROSI.....	12
2.3.1 IL CONCETTO DI LUNGHEZZA CRITICA .....	13
2.3.2 LA FIBRA DI CARBONIO.....	14
2.3.3 LA FIBRA DI VETRO .....	16
2.4 LE MATRICI METALLICHE E LE MATRICI DI ALLUMINIO .....	18
2.5 PROPRIETA' MECCANICHE.....	20
2.5.1 MODULO ELASTICO LONGITUDINALE .....	20
2.5.2 RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE .....	21
2.6 IL PROCESSO .....	22
2.6.1 LA LAMINAZIONE.....	22
2.6.2 IL DIFFUSION E IL ROLL BONDING .....	23
2.6 TRATTAMENTI PRELIMINARI .....	24
2.6.1 TRATTAMENTI PRELIMINARI DELL'ALLUMINIO .....	24
2.6.2 TRATTAMENTI PRELIMINARI DELLE FIBRE.....	25
CAPITOLO 3: APPARATO SPERIMENTALE .....	27
3.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	27
3.1.1 LAMINATOIO .....	27
3.1.3 PIROMETRO.....	28
3.1.5 MICROCONTROLORE "ARDUINO" .....	28
3.1.6 MACCHINA PER PROVA A TRAZIONE .....	29
3.1.7 MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE (SEM).....	30
3.1.8 TOMOGRAFO.....	31
3.2 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO DELLE BRONZINE .....	32
3.3 SISTEMA DI CONTROLLO .....	37

3.3.1	PROGETTAZIONE CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE .....	40
3.3.2	EAGLE 6.5.0: IL SOFTWARE .....	41
3.3.3	CREAZIONE DEL CIRCUITO .....	42
3.3.4	PROGRAMMAZIONE DI ARDUINO .....	45
3.3.5	PROVE DI RISCALDAMENTO E ACQUISIZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA .....	48
CAPITOLO 4: SIMULAZIONE DEL PROCESSO .....		55
4.1	CRITICITA' SALDATURA .....	55
4.2	CRITICITA' ROTTURA FIBRE .....	56
4.3	CALCOLO ANALITICO .....	56
4.3.1	CALCOLO DELLE TENSIONI IN GIOCO .....	57
4.3.2	CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI .....	58
4.3.3	CALCOLO DELLE VELOCITA' DI DEFORMAZIONE .....	58
4.4	SIMULAZIONE NUMERICA .....	59
4.4.1	FORGE: IL SOFTWARE .....	59
4.4.2	ELEMENTI DI SIMULAZIONE .....	60
4.4.4	CALCOLO DELLE TENSIONI IN GIOCO .....	62
4.4.5	CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI E DELLA VELOCITA' DI DEFORMAZIONE .....	68
4.4.6	CALCOLO DELLA TEMPERATURA DI LAVORO .....	69
4.4.7	CONFRONTO TRA I METODI E CONCLUSIONI SULLE CRITICITA' .	71
CAPITOLO 5: CAMPAGNA PROVE .....		73
5.1	PARAMETRI DI PROCESSO ANALIZZATI .....	73
5.2	CAMPAGNA PROVE SENZA FIBRA .....	74
5.3	ANALISI MICROSTRUTTURALE E VERIFICA SALDATURA .....	76
5.3.1	ANALISI AL MICROSCOPIO OTTICO SENZA ATTACCO CHIMICO .	77
5.3.2	SCELTA DELL'ATTACCO CHIMICO .....	79
5.3.3	ANALISI AL MICROSCOPIO OTTICO CON ATTACCO CHIMICO	80
5.4	CONCLUSIONI SULLA SALDATURA .....	82
5.5	CAMPAGNA PROVE CON LA FIBRA: INGLOBAMENTO DELLA FIBRA	83
5.5.1	RESISTENZA A TRAZIONE IPOTETICA .....	84
5.5.2	ANALISI DELL'ADESIONE TRA MATRICE E RINFORZO .....	85
5.6	ANALISI TOMOGRAFICA .....	86

5.7 CALCOLO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE TRAMITE MACCHINA MTS .....	89
5.8 ANALISI AL MICROSCOPIO ELETTRONICO DEI PROVINI TRAZIONATI .....	96
5.9 CONCLUSIONI SULL'INTEGRITA' DELLE FIBRE .....	98
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI .....	101
6.1 CONCLUSIONI .....	101
6.2 POSSIBILI SVILUPPI FUTURI.....	102
APPENDICE 1: SLAB ANALYSIS .....	103
APPENDICE 2: OPERATORE SOBEL.....	111
APPENDICE 3: PROVINI LAMINAZIONE.....	113
APPENDICE 4: CALCOLO ANALITICO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE .	115
BIBLIOGRAFIA .....	117
SITOGRAFIA .....	119



# CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

## 1.1 PROBLEMA SCIENTIFICO

Lo grande sviluppo che i materiali compositi stanno avendo negli ultimi anni, merito delle ottime proprietà meccaniche che riescono a garantire, ha reso necessario uno studio approfondito dei processi che li interessano.

I compositi a matrice metallica, utilizzati soprattutto nei settori dell'automotive e aerospaziale, si servono di processi alle volte molto complicati, i quali si basano principalmente sulla fusione della matrice e l'inglobamento del rinforzo.

Esistono tuttavia processi che sfruttano il fenomeno della saldatura per diffusione per creare questi materiali; solitamente però, a causa dei parametri di processo utilizzati, questi materiali contengono rinforzo di tipo particellare (fig. 1.1).

Tuttavia, l'utilizzo di compositi fibrosi, permette di creare materiali fortemente anisotropi (proprietà spesso ricercata), e incrementi della resistenza molto elevati.

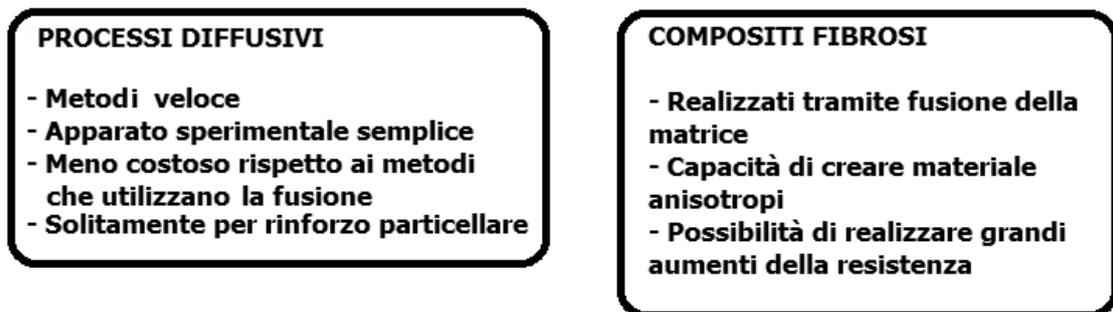


Fig 1.1: Principali caratteristiche del processo e del materiale

Con il lavoro presentato si cerca di creare un materiale composito tramite il processo del roll bonding, evoluzione del processo del diffusion bonding (fig. 1.2 e 1.3), in cui si sfrutta la laminazione per apportare calore e pressione ad una billetta, per formare un composito. In particolare si cerca di sfruttare il fenomeno della saldatura per diffusione tramite la quale due lamiere di alluminio, alle quali sono interposte delle fibre, dovrebbero creare un unico componente.

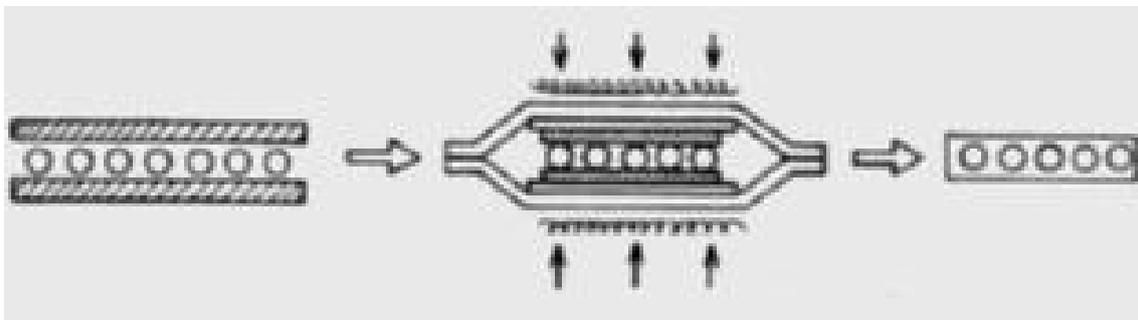


Fig. 1.2: Semplificazione del processo produttivo di diffusion bonding

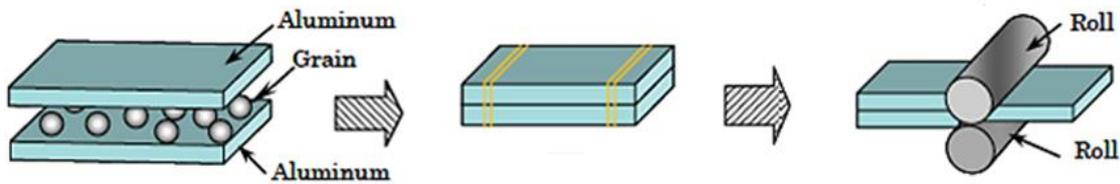


Fig. 1.3: Semplificazione del processo produttivo di roll bonding

La buona riuscita della tesi permetterebbe la realizzazione del materiale senza giungere a fusione, e quindi con un notevole risparmio sia di tempo che economico, e sfrutterebbe un processo ben noto e studiato come quello della laminazione.

L'accoppiamento di materiali così diversi necessita di uno studio particolare sui trattamenti preliminari necessari, sia chimici che meccanici, e sui parametri di processo. Un esempio di tutte le operazioni di cui tener conto durante il processo è presentato in figura 1.4.

La creazione di un nuovo componente necessita inoltre di una adeguata campagna prove per la definizione delle sue proprietà meccaniche.

Come verrà specificato, le principali problematiche legate al processo riguardano la saldatura e la fragilità delle fibre, parametri che vengono considerati critici per la buona riuscita del processo.

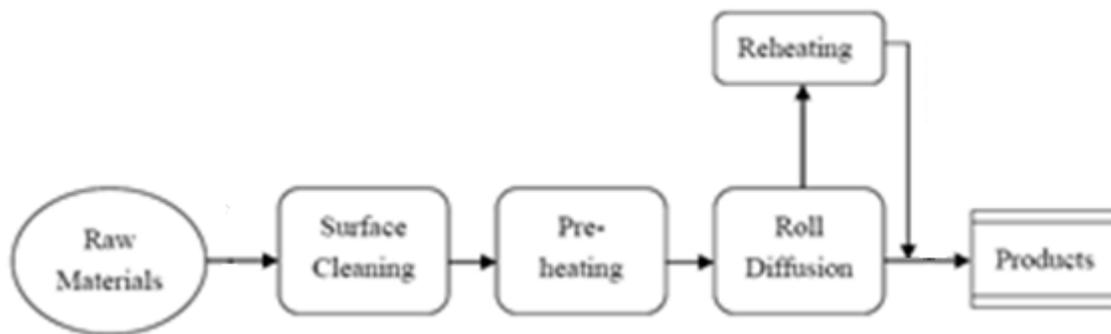


Fig. 1.4: Operazioni di processo

## 1.2 STRUTTURA DELLA TESI

Inizialmente con questa tesi si è cercato di riprendere alcuni lavori precedentemente effettuati sul laminatoio che si andrà ad utilizzare. Innanzitutto si è progettato un sistema di raffreddamento per 3 delle 8 bronzine che sostengono i rulli in quanto non era stato possibile effettuarlo precedentemente a causa degli ingombri presenti. In seguito è stato creato un sistema di controllo in grado di comandare il riscaldamento dei rulli una volta fissata una temperatura target.

Dopo aver calcolato analiticamente e tramite gli elementi finiti, le tensioni e le deformazioni in gioco durante il processo ipotizzato, si è andati a studiare quali lavorazioni superficiali e quali parametri di processo influenzano la saldatura per diffusione dell'alluminio, andando a creare dei campioni e analizzandoli al microscopio. Si è poi andato a creare dei campioni simili ai precedenti incorporando in questo caso la fibra (vetro o carbonio). Dopo aver eseguito delle scansioni tomografiche per valutare l'integrità della fibra, si è andati a misurare la loro resistenza a trazione. Infine sono

state effettuate nuovamente delle micrografie per analizzare i provini rotti durante le prove di trazione. La programmazione del lavoro è semplificata in figura 1.5. Gli obiettivi della tesi sono la ricerca dei parametri che influenzano il processo, ed in particolare quelli che governano la saldatura e la rottura delle fibre, e naturalmente la buona riuscita dello stesso. Come presentato nei paragrafi finali, lo studio non ha permesso di realizzare un composito ottimale, ma ha dato ottimi spunti per lo sviluppo futuro del processo.



Fig. 1.5: Programmazione del lavoro



## CAPITOLO 2: STATO DELL'ARTE

La scoperta dei materiali compositi ha origini molto antiche, infatti, è noto che già gli antichi egizi erano soliti miscelare la paglia con il fango al fine di ottenere mattoni da costruzione più resistenti e meno fragili di quelli costituiti dal solo fango.

Oggi, l'utilizzo di questi materiali è in continua evoluzione e si può riscontrare in diverse realtà: edilizia, abbigliamento, sport, meccanica, ecc.

### 2.1 DEFINIZIONE DI COMPOSITO

La definizione di materiale composito, data dall'ASM materials engineering dictionary, è “a combination of two or more materials (reinforcing elements, fillers, and composite matrix binder), differing in form or composition on a macroscale. The constituents retain their identities, that is, they do not dissolve or merge completely into one another although they act in concert. Normally, the components can be physically identified and exhibit an interface between one another”.

Il punto chiave dei materiali compositi risulta quindi essere l' accoppiamento di materiali diversi, con proprietà significativamente diverse (se non opposte) in modo tale che le proprietà dell'unione siano per lo più migliori delle proprietà dei singoli costituenti.

Tale accoppiamento può essere studiato sia a livello macroscopico che microscopico.

Nel primo caso il composito è studiato nella sua visione “globale” e la struttura è considerata macroscopicamente omogenea. Nel secondo caso si considera il materiale come non omogeneo, le fasi sono considerate singolarmente omogenee e vengono valutate le caratteristiche che derivano dalle mutue interazioni.

In generale si distinguono quattro fasi in un materiale composito (fig. 2.1):

1. la matrice, che è il costituente continuo che, bloccando il rinforzo, gli trasferisce il carico esterno e lo protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio;
2. il materiale di rinforzo (o carica), che viene aggiunto sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particelle;
3. l'interfaccia, cioè la zona di contatto tra il materiale di rinforzo e la matrice;
4. le porosità, che possono venire a formarsi tra matrice e fibra essendo il loro accoppiamento di tipo meccanico e quindi soggetto ad imperfezioni.

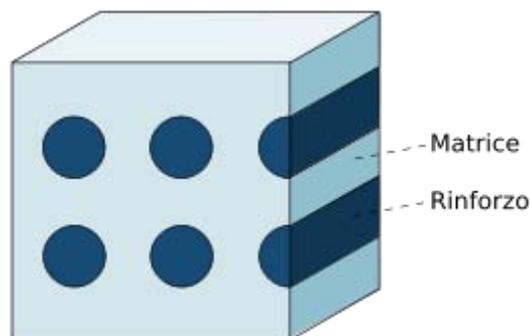


Fig. 2.1: Struttura di un materiale composito

## 2.2 IL CONCETTO DI ANISOTROPIA

La meccanica dei solidi metallici si basa sul concetto di isotropia ed elasticità. In particolare per isotropia si intende la proprietà d'indipendenza dalla direzione, da parte di una grandezza definita nello spazio. Ossia le proprietà meccaniche di un punto non variano al variare delle direzioni secondo cui esse sono considerate.

Per i materiali compositi ciò non è sempre verificato, e dipende principalmente dal tipo di rinforzo considerato. Si distinguono infatti due casi:

1. rinforzo particellare o fibroso orientato a caso, in cui le proprietà possono considerarsi macroscopicamente isotrope. Infatti se una singola particella di rinforzo definisce una direzione lungo cui le proprietà meccaniche sono massime, ne esisterà un'altra con direzione preferenziale ortogonale alla precedente;
2. rinforzo con fibre continue unidirezionali o discontinue allineate, in cui le proprietà devono considerarsi macroscopicamente anisotrope. E' presente infatti una sola direzione che identifica le proprietà meccaniche massime per tutti i punti del materiale.

Quindi nella progettazione con materiali compositi, bisogna tener conto di una diversa risposta da parte del materiale in base a come è disposto in esso il rinforzo e in base a come esso viene sollecitato.

## 2.3 COMPOSITI FIBROSI

In questo caso il rinforzo è costituito da fibre che possono avere una lunghezza pari a quella del composito considerato (fibre lunghe o continue), oppure essere corte (fibre discontinue). Anche l'orientazione delle fibre può essere diversa e differenzia in modo marcato le proprietà del composito che si viene a formare (fig. 2.2). Sperimentalmente si osserva che la resistenza di un dato materiale aumenta significativamente se esso viene prodotto in fibre sottili. Questi compositi sono di gran lunga quelli più utilizzati nelle costruzioni meccaniche. Il loro successo è strettamente legato all'elevato rapporto resistenza/peso (resistenza specifica) ed all'elevato rapporto rigidità/peso (modulo specifico) unito alla possibilità di variare a piacimento il grado di anisotropia intervenendo, per esempio, sulla concentrazione e sull'orientamento del rinforzo. L'elevata resistenza specifica dei compositi fibrosi è essenzialmente legata alla elevata resistenza delle fibre ed al basso peso di fibre e matrice [1].

Nel caso si voglia ottenere un composito a fibre lunghe isotropo si può ricorrere ai cosiddetti compositi laminati. Diversi fogli di materiale composito sono incollati l'uno sull'altro, sfalsando di volta in volta l'orientazione delle fibre con il foglio presente sopra, in modo da creare un'isotropia totale del materiale.

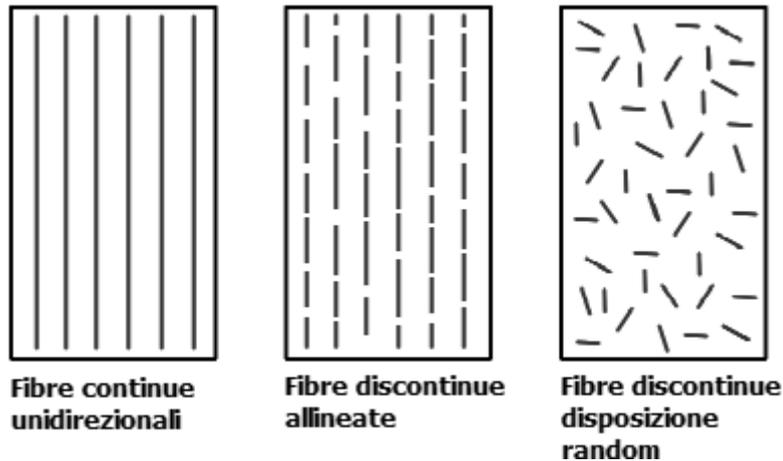


Fig. 2.2: i compositi fibrosi

### 2.3.1 IL CONCETTO DI LUNGHEZZA CRITICA

Una fibra si dice lunga se contribuisce in maniera massima a migliorare le caratteristiche meccaniche del composito dove è impiegata, ossia tanto più grande è lo sforzo che riesce ad assorbire. Nel caso non si riesca a trasferire carico alle fibre fino ad assegnare loro lo sforzo massimo si parla di fibre corte.

Una qualsiasi fibra che subisca una deformazione, si deformerà con il proprio modulo elastico. Ipotizzando una forte adesione fibre/matrice, anche la matrice dovrà deformarsi della stessa quantità, sebbene abbia un modulo elastico sicuramente diverso (solitamente la deformazione della matrice tenderebbe ad essere maggiore). Tale situazione induce uno sforzo di taglio nell'interfaccia. E' questo sforzo di taglio che trasmette carico alle fibre, il quale risulterà massimo verso il centro e nullo alle estremità. Lo sforzo è quindi lineare rispetto la distanza dalle estremità, raggiungendo un massimo al centro; una frazione della lunghezza della fibra è quindi sollecitata tutta al massimo dello sforzo. Man mano che il carico assegnato alle fibre cresce, la frazione di fibra sollecitata al massimo sforzo diminuisce in estensione. Si arriva quindi a sollecitare gran parte della fibra al massimo sforzo sostenibile nel caso di adesione interfacciale consistente (fig. 2.3).

Nel caso di una scarsa adesione tra fibra e matrice, può accadere che per un basso stato tensionale, solo la sezione centrale della fibra sia sollecitata al massimo sforzo, non potendo sopportare ulteriore carico e non arrivando mai a frattura.

Per lunghezza critica si intende la minima lunghezza della fibra per ottenere un trasferimento di carico dalla matrice che può portare alla rottura della fibra stessa almeno in una sua sezione [1].

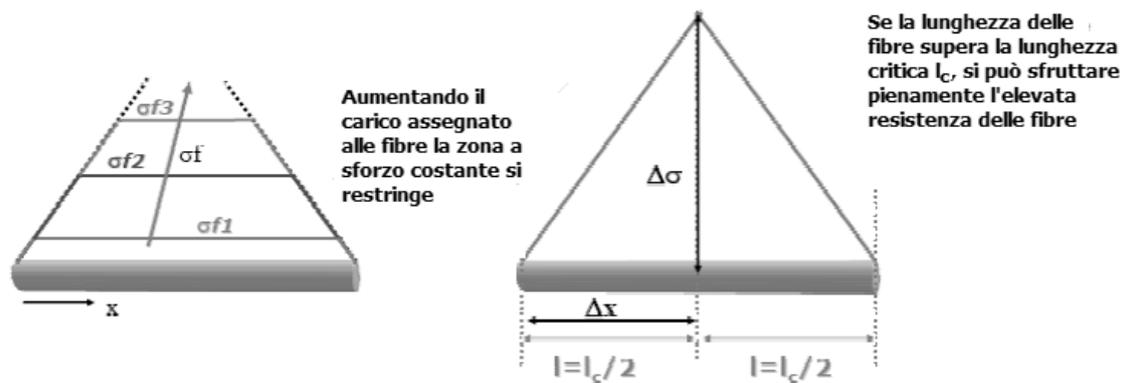


Fig. 2.3: Il concetto di lunghezza critica

### 2.3.2 LA FIBRA DI CARBONIO

La prima fibra di carbonio ad alte prestazioni fu creata dal Dr. Roger Bacon, presso il Parma Technical Center, Ohio, nel 1958.

Ogni fibra di carbonio costituisce un insieme formato dall'unione di molte migliaia di filamenti. Un singolo tale filamento ha una forma cilindrica del diametro di 5-8  $\mu\text{m}$  e consiste quasi esclusivamente di carbonio. La struttura atomica della fibra di carbonio è simile a quella della grafite, consistendo in aggregati di atomi di carbonio a struttura planare (fogli di grafene) disposti secondo simmetria esagonale regolare. Ogni atomo ha legami covalenti con gli atomi dello stesso piano e legami deboli con gli atomi degli altri piani (Van der Waals).

In funzione della materia prima usata per produrre la fibra, la fibra di carbonio può essere turbostratica, ovvero con struttura cristallina, se derivata dal PAN, o graffitica, se derivante dal bitume.

Tuttavia, la principale suddivisione dei tipi di fibre di carbonio è fatta in base alle proprietà meccaniche:

1. modulo ultra alto (UHM): sono utilizzate con un limitatissimo contributo di resina epossidica in relazione alla quantità di fibra di carbonio utilizzata. Vengono usate in sostituzione alle leghe di alluminio per la loro leggerezza. Questi tipi di fibre possono avere moduli 5 volte superiori a quello dell'acciaio ma possono formare compositi con comportamenti molto fragili;
2. modulo alto (HM): presentano maggiore resina in relazione alla quantità di fibra di carbonio utilizzata. Ha un modulo inferiore ma una resistenza maggiore;
3. alta resistenza (HS): sono fibre con un alta resistenza a trazione. E' il tipo più utilizzato.

Un'ulteriore suddivisione si può infine avere in base a come vengono assemblate le fibre nel composito:

1. UD: fibre disposte lungo una sola direzione, fortemente anisotrope;
2. 1K: trama estremamente fitta;
3. 3K: trama molto fitta, ottimo rapporto resistenza/peso. Si usa solitamente per fibre HM;
4. 6K: trama fitta;
5. 12K: trama larga.

Una sintesi delle proprietà meccaniche delle fibre di carbonio, in confronto con un acciaio standard da costruzione, sono riportate in tabella 2.1.

	Carbonio ad alta resistenza	Carbonio ad alto modulo	Carbonio ad altissimo modulo	Acciaio FeB44K
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1800	1850	2100	7850
Modulo elastico [GPa]	230	400	700	210
Resistenza meccanica a trazione [MPa]	5000	3000	1500	540
Deformazione a rottura [%]	2,0	0,9	0,3	20
Resistenza specifica [MPa/kg]	2,78	1,62	0,71	0,07

Tab. 2.1: Classificazione delle fibre di carbonio e loro proprietà in confronto con un acciaio standard da costruzione

Industrialmente le fibre di carbonio vengono prodotte per lavorazioni ad alta temperatura di particolari fibre polimeriche dette "precursori". Il precursore attualmente più utilizzato per la produzione di fibre in carbonio è il poliacrilonitrile (PAN), tuttavia possono essere utilizzati anche il bitume e il rayon (materiale cellulosico).

Il poliacrilonitrile è un polimero lineare che possiede gruppi di carbonio-azoto(nitrile).

La produzione delle fibre di carbonio viene effettuata attraverso un processo industriale che prevede cinque stadi:

1. Riscaldamento: polvere plastica di acrilonitrile è mescolata con altra polvere plastica, come acrilato di metile o metacrilato di metile, e viene fatta reagire con un catalizzatore. Attraverso un processo di polimerizzazione si ottiene una plastica di poliacrilonitrile. In seguito la plastica è poi filata in fibre. In un metodo, la plastica viene miscelata con alcune sostanze chimiche e pompata attraverso piccoli getti in un bagno in cui la plastica si coagula e si solidifica in fibre. Il passo della filatura è importante perché la struttura interna atomica della fibra si forma durante questo processo. Le fibre vengono poi lavate e allungate: l'allungamento aiuta ad allineare le molecole all'interno della fibra e fornisce la base per la formazione dei cristalli di carbonio, saldamente legati dopo carbonizzazione.
2. Ossidazione: Aumentando la temperatura, sempre in presenza di aria, fino a 700 °C, vengono rotti i legami esistenti tra carbonio e gli altri costituenti del precursore. Viene effettuata sotto stiro allo scopo di limitare i fenomeni di rilassamento e di scissione delle catene molecolari. Dopo questa fase si ottiene la formazione di una catena polimerica termicamente più stabile della precedente. Commercialmente, il processo di stabilizzazione utilizza una varietà di attrezzature e tecniche. In alcuni processi, le fibre sono fatte passare attraverso una serie di camere riscaldate. In altri, le fibre passano sopra bigodini caldi e attraverso letti di materiali sfusi tenute in sospensione da un flusso di aria calda. Alcuni processi possono utilizzare aria miscelata con gas riscaldato che chimicamente ne accelera la stabilizzazione.
3. Carbonizzazione: la temperatura viene aumentata fino a 1500°C in atmosfera inerte. La mancanza di ossigeno impedisce alle fibre di bruciare. La pressione del gas all'interno del forno è mantenuta superiore alla pressione dell'aria esterna e i punti in cui le fibre entrano e escono dal forno sono sigillati per non permettere all'ossigeno di entrare. Le fibre, riscaldate, iniziano a perdere i loro

non-atomi di carbonio. Quando i non-atomi di carbonio vengono espulsi, gli atomi di carbonio rimanenti formano cristalli di carbonio saldamente legati, che sono allineati più o meno paralleli all'asse lungo della fibra. In alcuni processi, due fornaci, operanti a due diverse temperature, vengono utilizzati per controllare meglio la velocità di riscaldamento durante la carbonizzazione.

4. **Trattamento superficiale:** dopo la carbonizzazione, le fibre hanno una superficie che non lega bene con gli epossidici e altri materiali utilizzati come matrici. Per creare interfacce migliori, la loro superficie è leggermente ossidata. L'aggiunta di atomi di ossigeno sulla superficie offre migliori proprietà di legame chimico e irruvidisce la superficie per migliorare le proprietà meccaniche di legame. L'ossidazione può essere ottenuta immergendo le fibre in vari gas come l'aria, l'anidride carbonica, o l'ozono, o in vari liquidi, come l'ipoclorito di sodio o acido nitrico. Le fibre possono anche essere rivestite elettroliticamente, rendendole di polo positivo, immergendole in una vasca piena di vari materiali elettricamente conduttivi. Il processo di trattamento superficiale deve essere attentamente controllato per evitare la formazione di difetti superficiali minuscoli, come buche, che potrebbero causare la rottura delle fibre.
5. **Grafitizzazione:** condotta sempre in atmosfera inerte ma ad una temperatura più elevata (oltre i 2000°C); si procede con il riscaldamento sino ad ottenere le proprietà richieste.

Nel caso la materia prima sia bitume, bisogna effettuare un'altra lavorazione, ossia un termoidurimento, tra riscaldamento e ossidazione, per prevenire il comportamento termoplastico del bitume allo stato mesofase [2].

### 2.3.3 LA FIBRA DI VETRO

Esistono numerosi diversi tipi di fibre di vetro e si distinguono in base alla composizione chimica e alle loro proprietà.

1. **Vetro E o elettrico:** è stato originariamente sviluppato come isolante per cavi elettrici. Successivamente è stato sviluppato perché facilmente formabile sotto forma di fibre, ed ora è usato quasi esclusivamente la fase di rinforzo. E' il più usato, sia nell'industria tessile sia nei materiali compositi, dove rappresenta il 90% dei materiali rinforzati utilizzati.  
Composizione: SiO<sub>2</sub> 54%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14%, CaO+MgO 22%, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10% , Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O meno del 2%.  
Caratteristiche positive: basso costo, facilità di produzione, alta resistenza, densità non elevata, non infiammabile, resistente al calore, buona resistenza ad attacchi chimici, insensibile all'umidità.  
Caratteristiche negative: basso modulo elastico, auto abrasivo, bassa resistenza a fatica, densità elevata se paragonato a fibre di carbonio o organiche.
2. **Vetro S o strength:** è l'evoluzione del vetro E in quanto presenta migliori proprietà meccaniche sia di resistenza che di modulo.  
Composizione: SiO<sub>2</sub> 65%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 25%, MgO 10%.  
Caratteristiche positive: facilità di produzione, proprietà meccaniche migliori del vetro E, alta resistenza, densità non elevata, resistente al calore, non infiammabile.  
Caratteristiche negative: più costoso del vetro E, auto abrasivo, bassa resistenza a fatica, densità elevata se paragonato a fibre di carbonio o organiche.

3. Vetro R ad alto rendimento meccanico: questo tipo di filato è stato creato su specifica richiesta dei settori “di punta” (aviazione, industria spaziale e armamenti) e rispetta i requisiti in materia di resistenza alla fatica, alle variazioni termiche e all’umidità. Grazie al suo alto rendimento tecnico è utilizzato nel settore dei trasporti anche in componenti sottoposti a forti sforzi (es. pale di elicotteri).  
Composizione: SiO<sub>2</sub> 60%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 25%, CaO+MgO 10%, altro 5%.  
Caratteristiche positive: ottime proprietà meccaniche, utilizzabile anche per usi spinti.  
Caratteristiche negative: alto prezzo, maggiore costo energetico nella produzione.
4. Vetro D: i materiali compositi basati su vetro D sono caratterizzati da perdite elettriche molto basse e, quindi, sono utilizzati come materiali permeabili alle onde elettromagnetiche, con considerevoli vantaggi in termini di rendimento elettrico.
5. Vetro AR: è stato concepito come materiale rinforzante per il cemento; contiene molto ossido di zirconio che gli conferisce un’ottima resistenza ai composti alcalini generati dalle operazioni di asciugatura. I filati di vetro AR migliorano la resistenza ai carichi e la durezza del cemento.
6. Vetro C: è usato per la produzione di mats (lane di vetro) di vetro resistenti alla corrosione (rivestimenti esterni anticorrosione per tubature o tubi compositi).

Una sintesi delle principali proprietà meccaniche dei vari tipi di fibra di vetro sono presentati in tabella 2.2.

La principale tecnologia usata oggi per formare fibre di vetro è il metodo a fusione diretta.

Questo metodo utilizza delle fornaci divise in tre sezioni:

1. nella prima parte arriva il vetro fuso, il quale viene omogeneizzato e dal quale vengono tolte inclusioni gassose;
2. una seconda sezione di raffinamento, dove la temperatura diminuisce (da 1370 a 1200°C) per aumentare la densità del fuso;
3. infine la sezione che si trova direttamente sopra le stazioni per la produzione delle fibre.

Il vetro viene quindi fatto passare attraverso trafilato di platino-iridio anche esse riscaldate, che contengono dai 400 agli 8000 fori. La quantità di vetro sopra gli orifizi, la viscosità del fuso, il numero e la grandezza degli orifizi e la velocità con cui i fili vengono trafilati influiscono sul diametro dei filamenti prodotti.

Uscita dalla trafila, alla fibra viene applicata il sizing, composto chimico che ha il compito di agire come lubrificante, proteggere il filamento dall'abrasione e provvedere a migliorare l'interfaccia fra vetro inorganico e resina organica. In seguito, le fibre, raccolte in bobine, vengono messe in forno per eliminare solventi e acqua associate all'applicazione del sizing.

Una tecnica del tutto analoga utilizza biglie di vetro con diametro di ¾ di pollice che vengono riscaldate e portate quasi a fusione per essere tirate nelle trafilato [2].

	Vetro E	Vetro C	Vetro R	Vetro S
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	2540	2570	2530	2490
Modulo elastico [GPa]	74	70	86	88
Resistenza meccanica a trazione [MPa]	3500	3400	4400	4650
Deformazione a rottura [%]	4,5	4,2	5,2	5,4
Resistenza specifica [MPa/kg]	1,38	1,32	1,74	1,87

Tab. 2.2: Le fibre di vetro

## 2.4 LE MATRICI METALLICHE E LE MATRICI DI ALLUMINIO

I materiali compositi con matrice metallica sono denominati MMC, metal matrix composite.

Le matrici metalliche trovano applicazioni solo in pochi campi, principalmente aerospaziale e automobilistico (fig. 2.4). Nel creare compositi con queste matrici infatti si riscontrano numerosi problemi. Il principale è quello legato alla temperatura di formazione del composito. Infatti la matrice deve solitamente essere fluida quando avviene l'immissione del rinforzo, per questo si ha difficoltà a creare un'uniforme distribuzione delle fibre ed un loro perfetto allineamento. Ciò è in relazione al concetto di bagnabilità: spesso la matrice metallica non bagna completamente le fibre, per cui si ha l'impossibilità a formare il composito. Inoltre una lavorazione ad alte temperature può dar luogo a depositi intermedi che danneggiano le fibre.

Un esempio è l'alluminio rinforzato con fibre di boro: le fibre sono ottenute depositando vapori di boro su un filo di tungsteno; poi per pressatura a caldo si uniscono le fibre tra dei fogli di alluminio.

La caratteristica più interessante dell'alluminio, la stessa che ne ha determinato la grande diffusione, è la densità: 2.71 kg/dm<sup>3</sup>, molto bassa se paragonata a quella del ferro e dell'acciaio (7.87 kg/dm<sup>3</sup>), oppure del rame (8.94 kg/dm<sup>3</sup>); notevole inoltre la sua conducibilità elettrica (circa 62% di quella del rame) e termica, non che la riflettività (viene infatti utilizzato per ottenere specchi).

La scelta dell'alluminio commercialmente puro (percentuale maggiore del 99% di alluminio nella lega) è ristretta a applicazioni in cui sia richiesta buona formabilità o eccellente resistenza alla corrosione, soprattutto atmosferica, senza bisogno di una grande resistenza meccanica.

L'alluminio commercialmente puro può essere scelto come materiale per la matrice per i seguenti motivi:

1. grazie alla sua buona formabilità, sia a caldo che a freddo, risulta molto più facile il processo di laminazione andando a eliminare certi aspetti critici di altre leghe (precipitati a bordo grano, cricche da incrudimento, etc.);
2. essendo la bassa resistenza meccanica il suo punto debole, possiamo ottenere un materiale composito con tutti i pregi dell'alluminio commercialmente puro in termini di resistenza alla corrosione e bassa densità, che può essere utilizzato anche per scopi strutturali e di telaistica grazie al contributo delle fibre ad alte resistenze di carbonio.

La composizione e le principali proprietà meccaniche dell'alluminio 1050 sono presentate nelle tabelle 2.3 e 2.4 [14].



Fig. 2.4: Esempio di utilizzo di composito con matrice in alluminio: freni a disco in Alluminio rinforzato con particelle di silicio

Elementi costituenti	%
Alluminio, Al	> 99,5
Rame, Cu	< 0,05
Ferro, Fe	< 0,4
Magnesio, Mg	< 0,05
Manganese, Mn	< 0,05
Silicio, Si	< 0,25
Titanio, Ti	< 0,05
Zinco, Zn	< 0,07
Altro	< 0,03

Tab. 2.3: Composizione del<sup>o</sup> Al 1050

Proprietà fisiche	
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	2705
Proprietà meccaniche	
Durezza Brinell	35
UTS [MPa]	131
Resistenza meccanica a trazione [MPa]	124
Deformazione a rottura [%]	8
Modulo elastico [GPa]	69
Rapporto di Poisson	0,33
Modulo di taglio [GPa]	26
Resistenza a taglio [MPa]	76
Proprietà elettriche	
Resistività [Ω cm]	2,90E-06
Proprietà termiche	
Calore di fusione [J/g]	390
Calore specifico [J/(g °C)]	0,9
Conducibilità termica [W/(m K)]	227
Temperatura di fusione [°C]	646 - 657
Temperatura di solidus [°C]	646
Temperatura di liquidus [°C]	657

Tab. 2.4: Proprietà dell'alluminio 1050-H16

## 2.5 PROPRIETA' MECCANICHE

### 2.5.1 MODULO ELASTICO LONGITUDINALE

Il calcolo del modulo elastico longitudinale per un materiale composito può essere fatto attraverso la regola delle mescolanze, che altro non è se non una media pesata dei moduli di fibre e matrice.

$$E_c = E_m * V_m + E_f * V_f$$

E. 2.1

Tale regola deriva dall'ipotesi di isodeformazione (fig. 2.5) tra matrice e fibre che implica una distribuzione delle tensioni anche essa pesata sulle singole frazioni dei componenti del composito.

Una migliore stima del modulo di elasticità trasversale, può essere ottenuta con modelli teorici più complessi (teoria della elasticità) o con metodi numerici. Tra queste una relazione molto usata è quella di Halpin-Tsai:

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad \text{con} \quad \eta = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + \zeta}$$

E. 2.2

dove  $\zeta$  è un parametro del rinforzo legato alla geometria della sezione trasversale delle fibre. Per fibre pressoché circolari essa vale 2, mentre per sezioni rettangolari di lati  $a$  e  $b$  vale  $\zeta = 2a/b$  essendo  $a$  la dimensione misurata nella direzione del carico applicato.

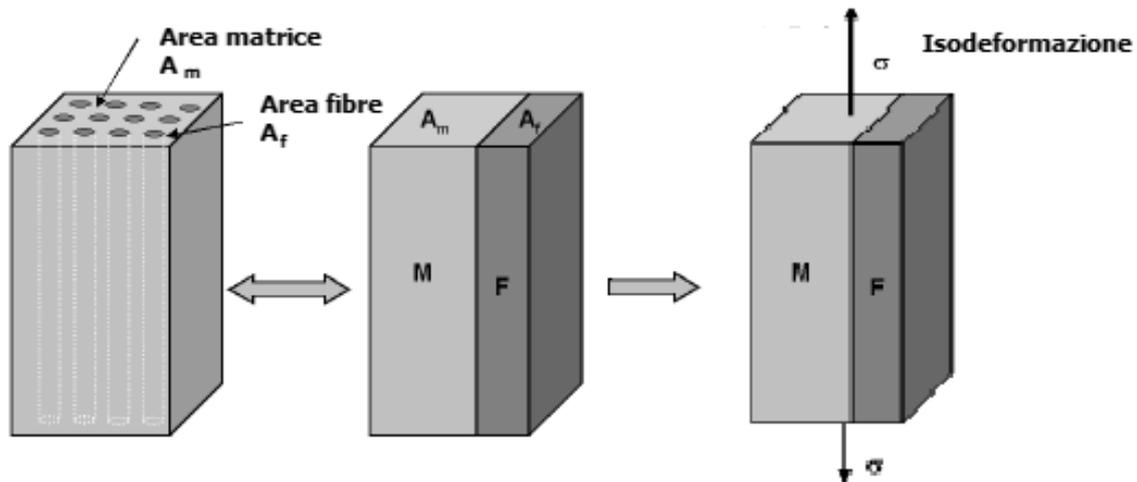


Fig. 2.5: Isodeformazione tra matrice e rinforzo

## 2.5.2 RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE

Uno dei principali compiti delle fibre è quindi quello di aumentare il carico massimo a rottura del composito, ossia la resistenza a trazione. Nel definire questa proprietà si distinguono quattro casi:

1. poche fibre più deformabili della matrice: in questo caso la prima a fessurarsi è la matrice. Ciò non implica che non sopporti più carico, in quanto lo sforzo viene trasferito dalle fibre agli spezzoni di matrice attraverso l'interfaccia. Il miglioramento della resistenza è contenuto e si può calcolare con la seguente formula:

$$\sigma_c = \sigma_f * V_f + \sigma_m * V_m$$

E. 2.3

dove

$\sigma_c$  è il carico di rottura del composito

$\sigma_f$  e  $\sigma_m$  sono il carico di fessurazione delle fibre e quello di rottura della matrice

$V_f$  e  $V_m$  sono la percentuale di fibra e matrice;

2. tante fibre più deformabili della matrice: in questo caso si può avere un notevole aumento del carico di rottura dato dalla formula:

$$\sigma_c = \sigma_f * V_f$$

E. 2.4

e quindi dipendente dalle sole fibre. Nella maggior parte dei casi la frazione volumetrica di fibre è elevata;

3. poche fibre meno deformabili della matrice: questo risulta essere l'unico caso svantaggioso, in quanto si ha una diminuzione di resistenza massima rispetto al materiale non rinforzato. Arrivato lo sforzo massimo per le fibre, esse si frantumeranno continuamente e lo sforzo verrà sopportato unicamente dalla matrice

Anche analiticamente si può notare che la situazione è sfavorevole essendo:

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m$$

E. 2.5

che è sicuramente minore di  $\sigma_m$  in quanto la percentuale di matrice è sempre <100%;

4. tante fibre meno deformabili della matrice: in genere, per elevate frazioni volumetriche di fibre, il contributo della matrice diventa trascurabile e quindi il composito si comporterà come nel secondo caso qui trattato.

## 2.6 IL PROCESSO

### 2.6.1 LA LAMINAZIONE

La laminazione (fig 2.6) è un processo mediante il quale si ottiene la riduzione di spessore o il cambiamento della sezione trasversale di una billetta mediante forze di compressione applicate ad una serie di rulli, chiamati rulli di laminazione.

Si definiscono lamiera i prodotti aventi uno spessore inferiore ai 6 mm e si possono reperire sotto forma di fogli piani o bobine dalle quali si ricavano i prodotti finiti attraverso lavorazioni successive.

Nel processo di laminazione piana, una striscia di materiale con spessore iniziale  $h_0$  entra tra i rulli e viene ridotta a uno spessore finale  $h_f$  mediante l'azione dei rulli che ruotano alla velocità periferica  $V_r$ . Per mantenere costante il flusso di metallo, la velocità della striscia deve aumentare nell'avanzare tra i rulli, come nel caso di un fluido incomprimibile che scorre dentro ad un canale convergente. All'uscita dei rulli il materiale avrà una velocità  $V_f$ .

Dal momento che la velocità  $V_r$  è costante, si viene ad avere scorrimento tra i rulli e la striscia di materiale. Tuttavia si ha un punto lungo l'arco di contatto in cui la velocità del materiale è uguale alla velocità dei rulli. Questo punto viene chiamato punto neutro, e giace sull'asse neutro o asse con scorrimento nullo [3].

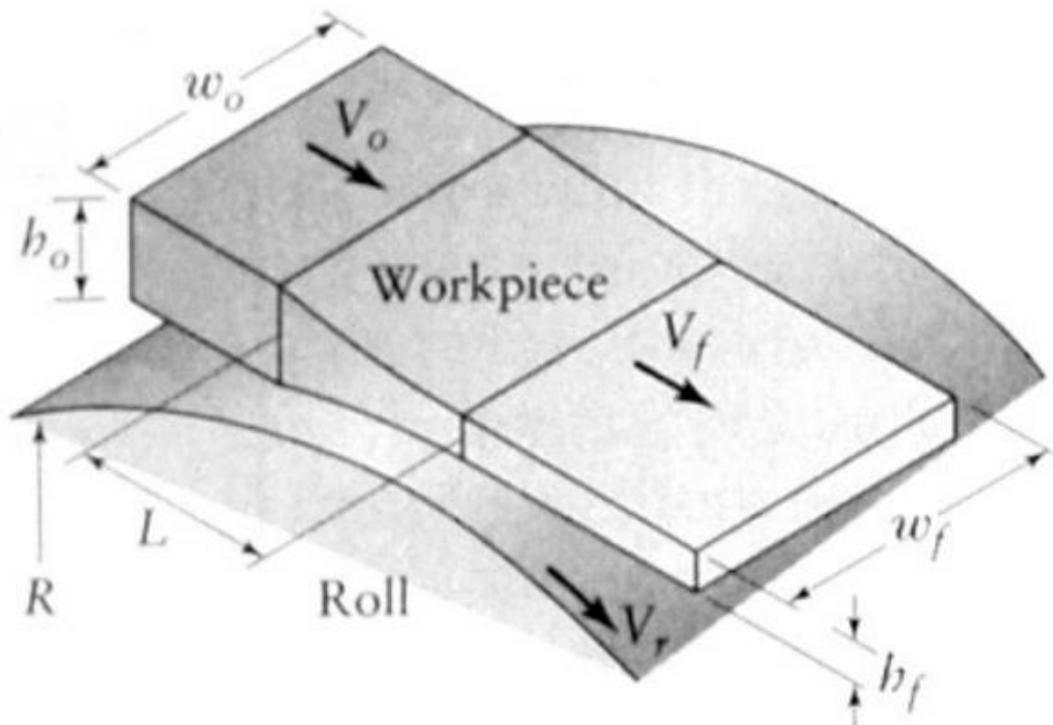


Fig. 2.6: Il processo di laminazione

### 2.6.2 IL DIFFUSION E IL ROLL BONDING

E' classificabile come un metodo di saldatura. Strati alternati di rinforzo sono separati da fogli del metallo costituente la matrice. Viene in seguito applicata una pressione ed un aumento di temperatura (minore di quella di fusione della matrice per problemi di reazioni interfacciali), in modo da innescare fenomeni diffusivi che portano alla giunzione dei vari fogli, i quali inglobano il rinforzo (fig. 2.7). Per migliorare l'adesione tra matrice e rinforzo si può ricorrere a trattamenti di lavorazione superficiale chimici o meccanici (in particolare come metodi di pulitura o disossidazione). In seguito il composito formato può subire trattamenti termici, con l'attenzione di non rovinare il rinforzo.

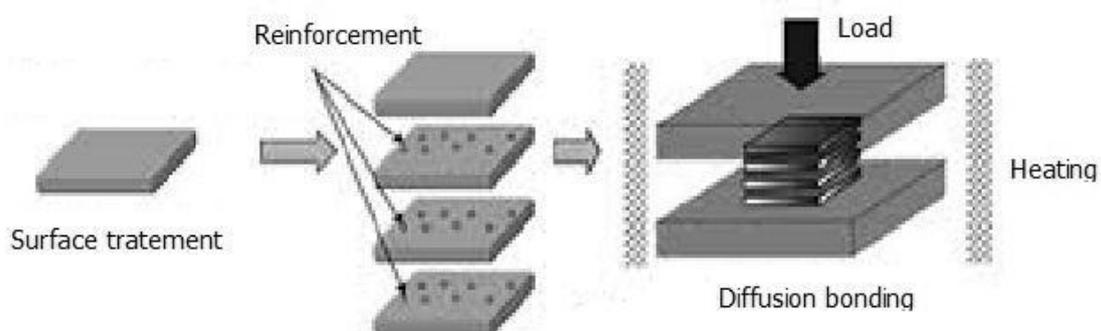


Fig. 2.7: Diffusion bonding

In particolare, nel caso in cui la pressione sia creata per mezzo di una laminazione (fig 2.8), si parla di “Roll bonding”, tecnologia che può essere effettuata sia a caldo che a freddo.

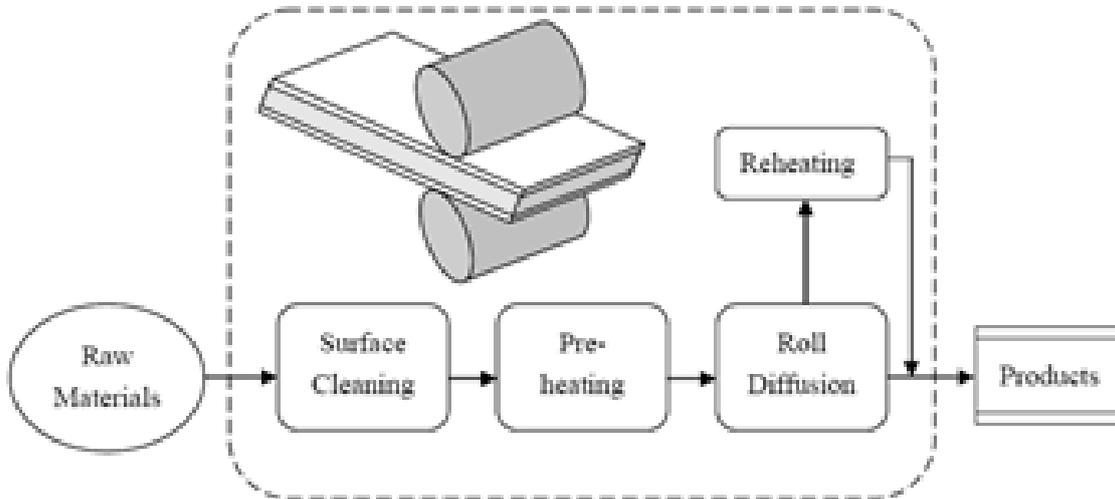


Fig 2.8: Roll bonding

## 2.6 TRATTAMENTI PRELIMINARI

E' stata eseguita una ricerca bibliografica per vedere che trattamenti preliminari è opportuno utilizzare nei materiali da noi utilizzati per favorire il processo.

### 2.6.1 TRATTAMENTI PRELIMINARI DELL'ALLUMINIO

I trattamenti utilizzati nella preparazione dell'alluminio sono:

- Pulizia tramite “Argon ion cleaning”, utile per rimuovere lo strato di ossido di allumina presente e creare una superficie pulita. Utilizzando l'Argon è teoricamente possibile ottenere la saldatura a basse temperature, ma in questo caso la somministrazione di pressione deve avvenire per lunghi tempi [4].
- Pulizia che include sgrassamento in un bagno di acetone e una lavorazione superficiale di abrasione tramite spazzola metallica. Per evitare la riformazione di ossido il processo di rullatura deve essere effettuato immediatamente dopo lo sgrassamento e la spazzolatura (max 120'') [5].
- Pulizia meccanica tramite l'utilizzo di carta vetrata di varie granulometrie e sgrassamento in un bagno a ultrasuoni di acqua e acetone.
- Pulizia in una soluzione di soda caustica (NaOH) ad una concentrazione dai 40 ai 70 g/litro [6].

## **2.6.2 TRATTAMENTI PRELIMINARI DELLE FIBRE**

I trattamenti utilizzati nella preparazione delle fibre sono:

- Ossidazione in forno (500°C) per ottenere una certa ruvidità della superficie della fibra, e per eliminare eventuali resti di tensionamento e di film superficiali [7].
- Trattamento con raggio al plasma atmosferico il quale migliora la qualità dell'adesione con la fibra ma la rende più fragile [6].



# CAPITOLO 3: APPARATO SPERIMENTALE

## 3.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

### 3.1.1 LAMINATOIO

È una macchina che consente la laminazione o la sagomatura di profili (fig. 3.1). È composta da una serie di rulli che premono progressivamente un semilavorato, dandogli la forma e le dimensioni desiderate.

Nel nostro caso il laminatoio utilizzato è di tipo a duo non reversibile, ossia i rulli girano sempre nello stesso verso.

Inoltre, come specificato in seguito, il nostro laminatoio può lavorare a varie temperature in quanto all'interno dei rulli sono state inserite delle cartucce riscaldanti.

Dati tecnici	
Alimentazione [V]	230
N° poli	4
RPM	1350
Potenza [kW]	1,2

Tab. 3.1: Dati tecnici del laminatoio

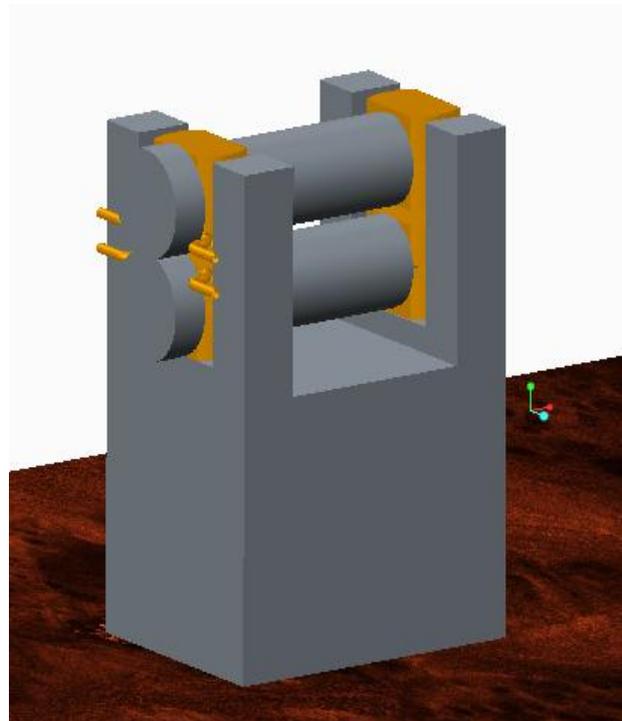


Fig. 3.1: Laminatoio

### 3.1.3 PIROMETRO

E' un sensore di temperatura non a contatto (fig. 3.2 e tab. 3.2). In particolare si basa sulla misura della frequenza della radiazione infrarossa emessa da un corpo del quale si conosce l'emissività.

Il sensore è formato da:

1. Una telecamera a infrarossi: la quale misura la radiazione entro un determinato fuoco;
2. Due spots laser: per identificare con precisione dove si sta puntando lo strumento;
3. Un display: dove si può leggere la temperatura misurata e cambiare alcune variabili (e.g. emissività);
4. Uscite: uscite analogiche interfacciabili con altri componenti.

Dati tecnici	
Alimentazione [V]	8 - 36
Segnale output [V]	0 - 5
Range temperatura [°C]	da -50 a 975
Range spettro [ $\mu\text{m}$ ]	da 8 a 14
Risoluzione ottica	75:1
Accuratezza [°C]	$\pm 1$
Ripetibilità [°C]	$\pm 0,5$
Risoluzione [°C]	0,1
Range emissività	da 0,1 a 1,0

Tab. 3.2: Dati tecnici del pirometro



Fig. 3.2: Pirometro

### 3.1.5 MICROCONTROLORE “ARDUINO”

L'Arduino è una schedina elettronica con un microcontrollore e circuiteria di contorno, utile per creare rapidamente prototipi e per scopi hobbistici e didattici (fig. 3.3 e tab. 3.3). Con Arduino si possono realizzare in maniera relativamente rapida e semplice piccoli dispositivi come controllori di luci, di velocità per motori, sensori di luce, temperatura e umidità e molti altri progetti che utilizzano sensori, attuatori e comunicazione con altri dispositivi. Arduino è fornito con un semplice ambiente di

sviluppo integrato per la programmazione. Tutto il software a corredo di Arduino è libero, e gli schemi circuitali sono distribuiti come hardware libero [17].

Dati tecnici	
Microcontrollore	ATmega328
Alimentazione [V]	5
Voltaggio input raccomandato	da 7 a 12
Voltaggio input limite	da 6 a 20
Pins digitali I/O	14
Pins analogici	6
Corrente DC per pin I/O [mA]	40
Corrente DC per pin 3,3 V [mA]	50
Memoria flash [kB]	32
SRAM [kB]	2
EPROM [kB]	1
Velocità clock [MHz]	16

Tab. 3.3: Dati tecnici microcontrollore “Arduino”



Fig 3.3: Arduino

### 3.1.6 MACCHINA PER PROVA A TRAZIONE

Per l’attuazione dei test di trazione sul macro-composito è stata utilizzata una macchina di trazione universale di tipo idraulico modello MTS322 (fig 3.4 e tab. 3.4).

Dati tecnici	
Capacità carico [kN]	100
Altezza massima fra le ganasce [mm]	1270
Distanza tra le colonne [mm]	533
Profondità della tavola [mm]	1000

Tab. 3.4: Dati tecnici macchina MTS



Fig. 3.4: Macchina di prova a trazione MTS

### 3.1.7 MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE (SEM)

Il microscopio non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni, ma un fascio di elettroni primari focalizzati che colpiscono il campione (fig. 3.5 e tab. 3.5). Il fascio primario non è fisso, ma viene fatto scandire: viene cioè pilotato in sequenza, punto dopo punto, riga dopo riga, su una piccola zona rettangolare del campione. Nell'interazione tra il fascio primario e gli atomi costituenti il campione, vengono emesse numerose particelle, fra le quali gli elettroni secondari. Questi elettroni sono catturati da uno speciale rivelatore e convertiti in impulsi elettrici che vengono inviati in tempo reale, ad uno schermo (un monitor) dove viene eseguita simultaneamente una scansione analoga.

Dati tecnici	
Massimo ingrandimento	200000

Tab. 3.5: Dati tecnici del microscopio elettronico a scansione



Fig 3.5: Microscopio elettronico a scansione

### 3.1.8 TOMOGRAFO

La tomografia industriale computerizzata, ovvero l'introduzione della tomografia nel settore industriale (fig. 3.6 e tab. 3.6), è una metodologia diagnostica relativamente recente. La tecnologia della tomografia computerizzata (CT), storicamente utilizzata in campo medico diagnostico, è stata adattata alle applicazioni industriali così da consentire l'analisi di strutture interne ed esterne dei componenti sotto differenti punti di analisi.

Le principali applicazioni di tomografia industriale sono riferite a:

- analisi difettologica di tipo non distruttivo, mirata ad identificare le difettosità interne ad un componente meccanico quali, ad esempio, cricche, porosità, inclusioni;
- analisi geometrica tridimensionale, finalizzata al confronto geometrico di componenti, parti e superfici sia esterne che interne al prodotto stesso;
- analisi funzionale, a scopo diagnostico, per valutare eventuali criticità di assemblaggio di vari componenti

Dati tecnici	
Minima dimensione voxel [ $\mu\text{m}^3$ ]	1

Tab. 3.6: Dati tecnici tomografo



Fig. 3.6: Tomografo computerizzato industriale

### 3.2 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO DELLE BRONZINE

Il laminatoio era stato precedentemente modificato per permettere il riscaldamento dei rulli [8].

Questo fatto può compromettere il funzionamento della macchina stessa, in quanto i rulli poggiano su delle bronzine, le quali potrebbero non lavorare adeguatamente se sottoposte a temperature troppo elevate. I lavori di modifica avevano comportato anche la creazione di un sistema di raffreddamento di tali bronzine; sistema che non era stato possibile completare. In particolare, a causa degli ingombri della macchina (le ruote dentate che trasmettono il moto tra il rullo inferiore, ossia quello collegato direttamente al motore elettrico, e il rullo superiore, fig. 3.7) non era stato possibile raffreddare 3 delle 8 bronzine totali presenti, e quindi il primo lavoro da effettuare è stato quello di studiare un adeguato sistema refrigerante.

Per alimentare le bronzine non raffreddate si è deciso di utilizzare dei tubi in rame, in quanto danno luogo ad un sistema abbastanza rigido, facile da brasare sulle bronzine, le quali devono essere opportunamente forate sia per permettere al fluido refrigerante di scorrere al loro interno, sia per permettere la buona riuscita della giunzione. La brasatura è stata effettuata alla fiamma ossiacetilenica utilizzando come materiale d'apporto una lega a base di argento.

La forma delle pieghe da effettuare sui tubi è frutto di necessità tecnologiche.

Al sistema di alimentazione sono fissati degli attacchi rapidi da 4 mm con filetto da 1/8, ed è quindi stato necessario creare anche degli attacchi filettati (boccola) da brasare al sistema di alimentazione.

Il sistema di raffreddamento è in grado di garantire un apporto di 10 l/min di acqua alle bronzine (come alimentazione è stato utilizzato l'acquedotto), che come discusso in seguito, è sufficiente a mantenere una temperatura adeguata.

Nei seguenti disegni tecnici sono presenti anche i vari ingombri propri della macchina (parti in grigio nelle assonometrie). Per gli ingombri si fa riferimento alle figure , mentre per il sistema di raffreddamento completo si fa riferimento alle figure 3.11 e 3.12.

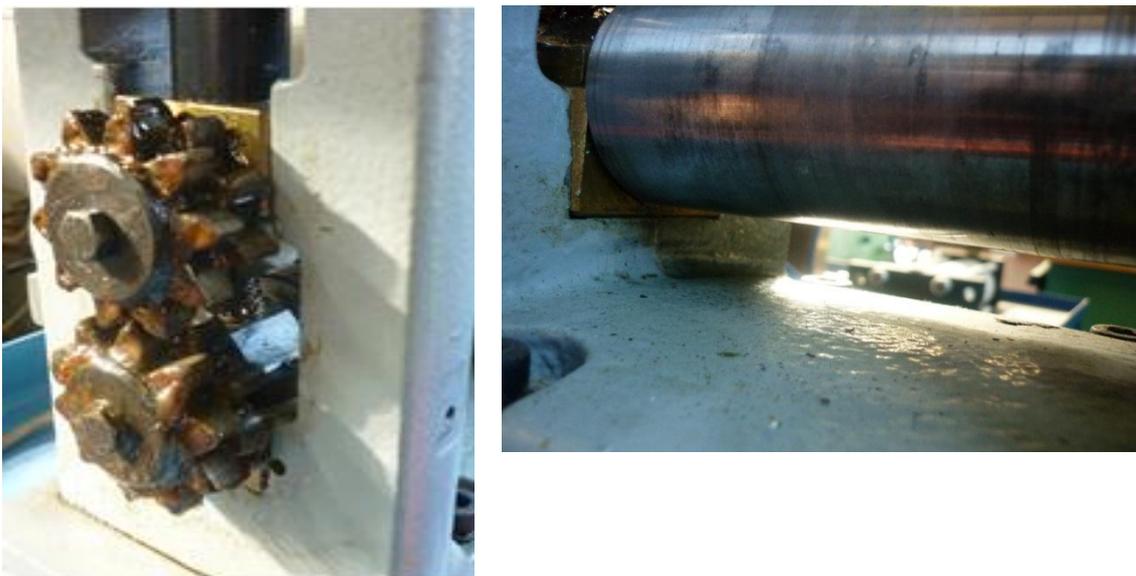


Fig. 3.7: Ingombri della macchina che non avevano reso possibile la realizzazione dell'impianto di raffreddamento

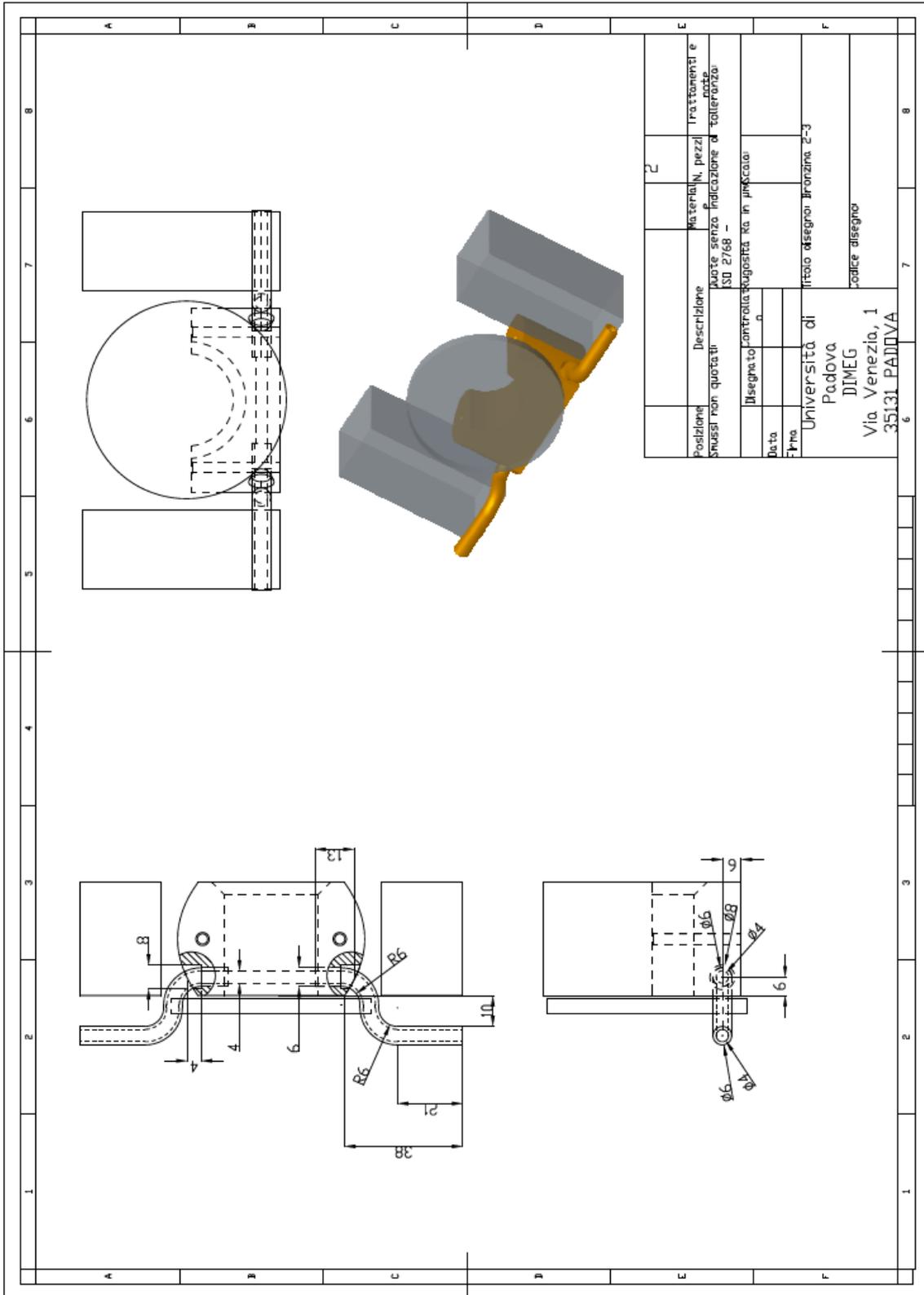


Fig. 3.8: Sistema di raffreddamento per le 2 bronzine intermedie

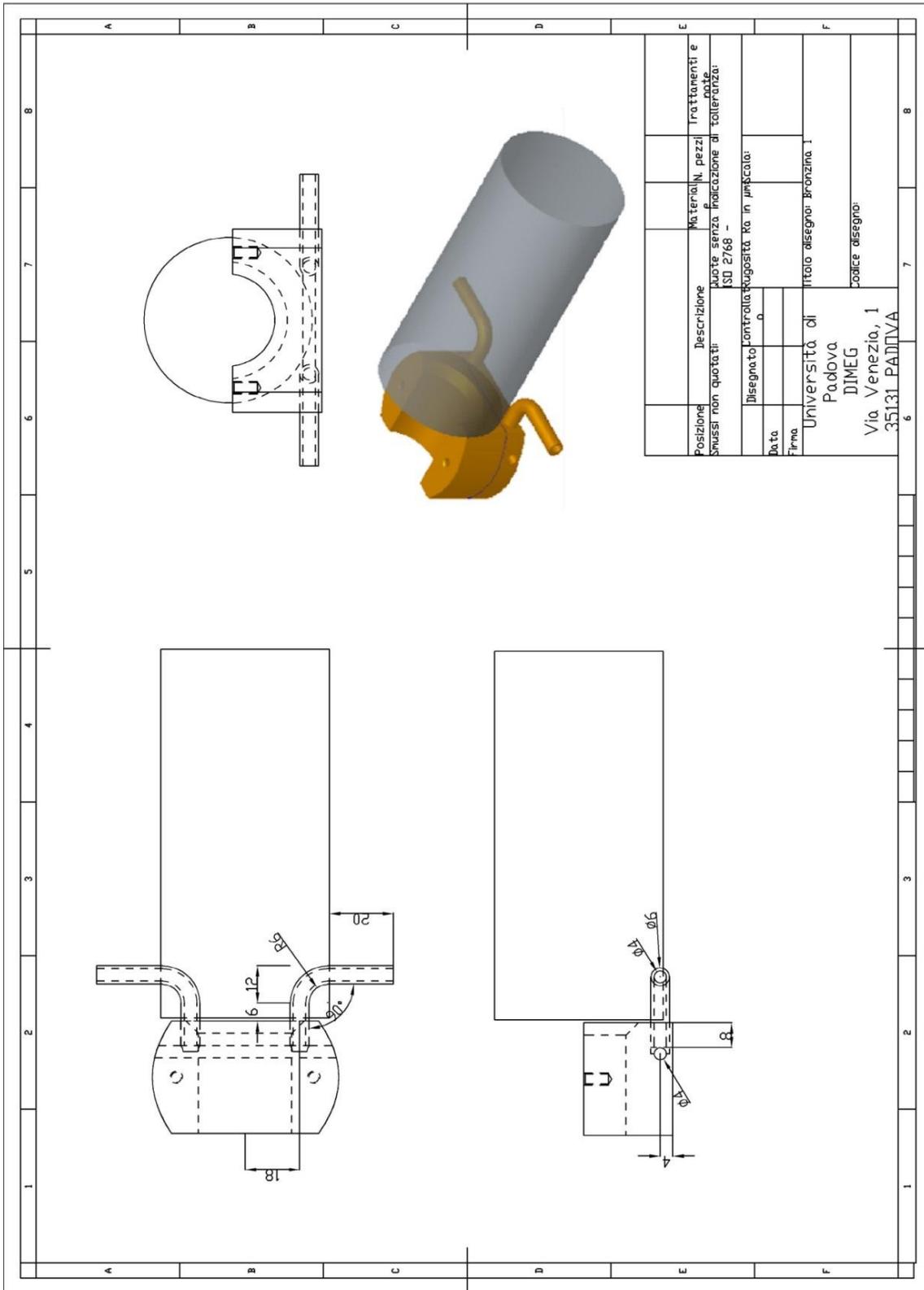


Fig. 3.9: Sistema di raffreddamento per la bronza inferiore

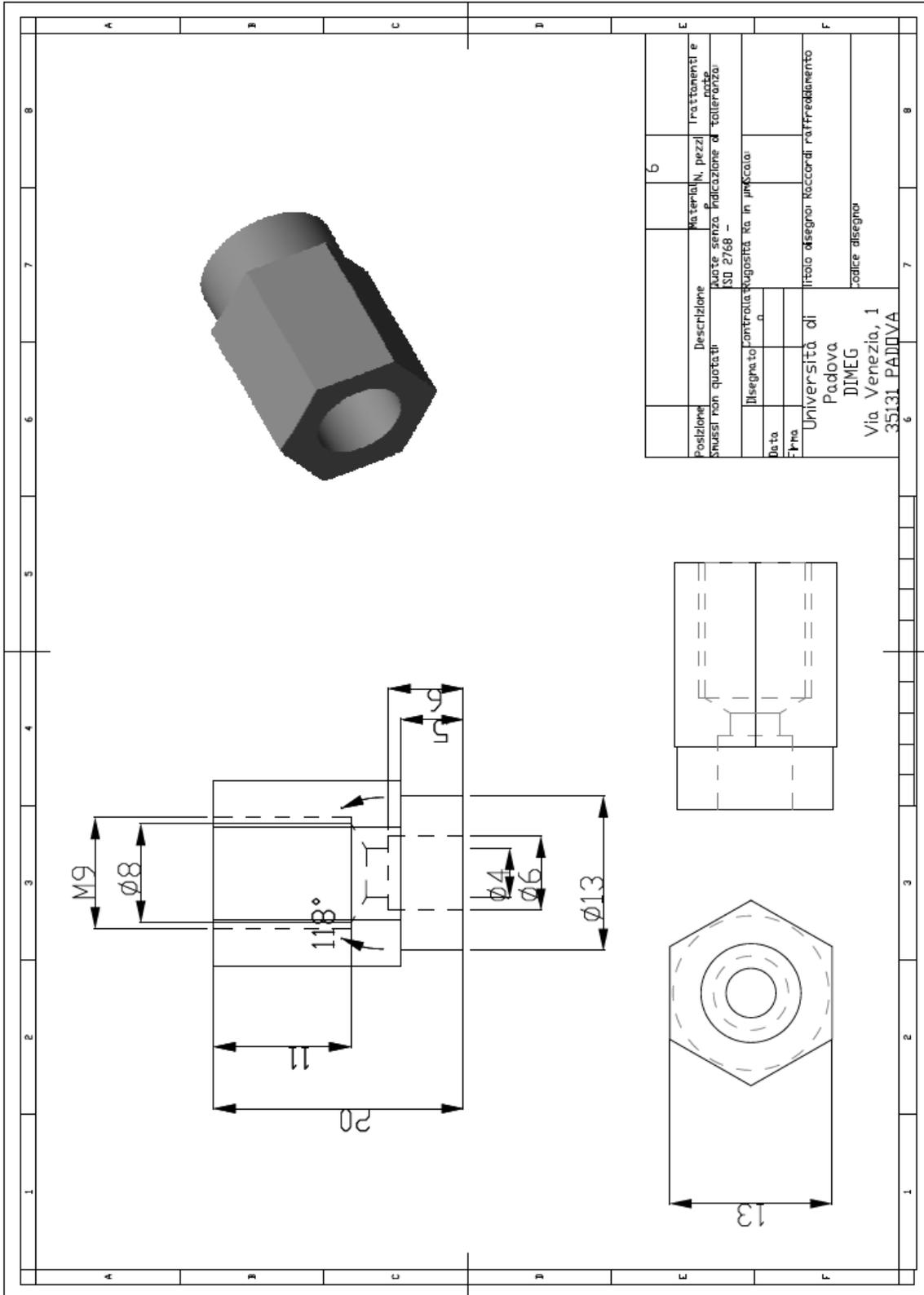


Fig. 3.10: Boccola di collegamenti per raffreddamento

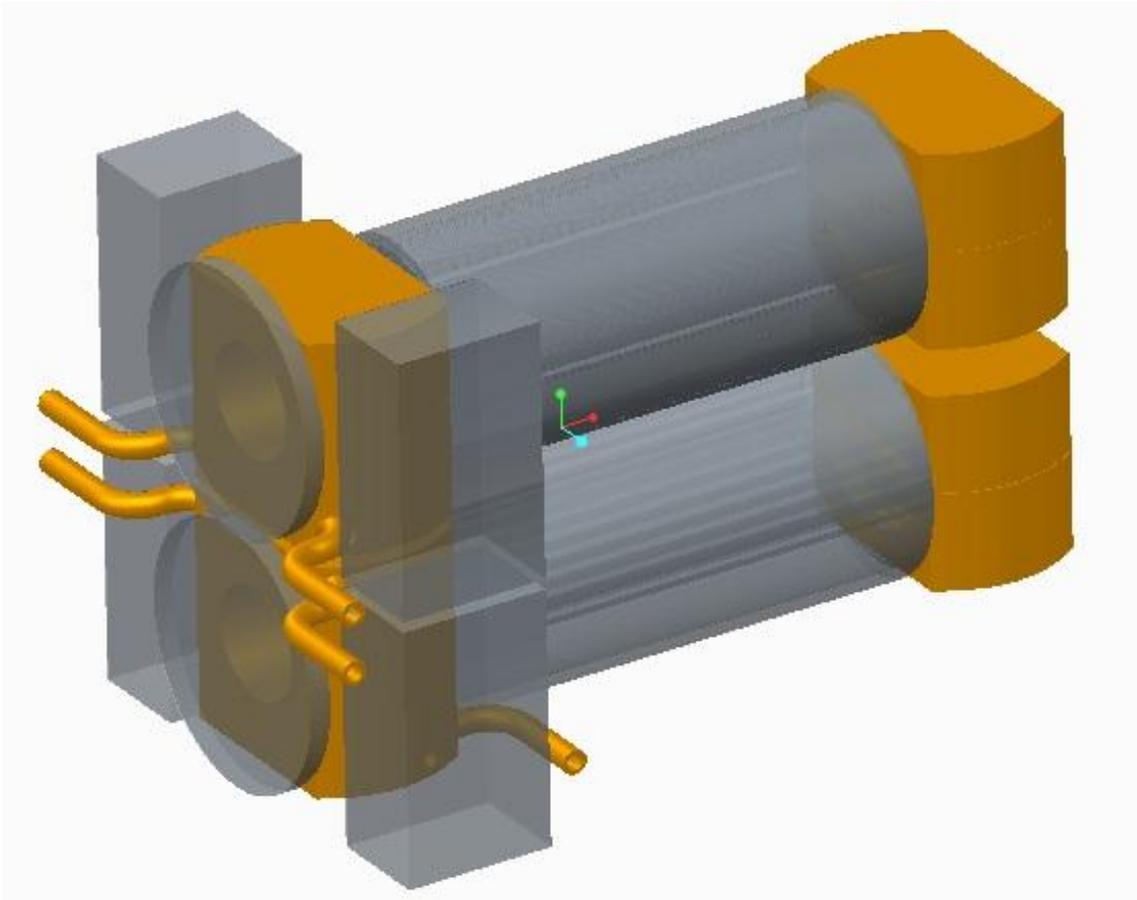


Fig. 3.11: Assemblaggio 3D del sistema di raffreddamento



Fig. 3.12: Realizzazione del sistema di raffreddamento

### 3.3 SISTEMA DI CONTROLLO

Per permettere il riscaldamento dei rulli, al loro interno erano state inserite delle cartucce riscaldanti elettriche (fig. 3.13 e 3.14). Le cartucce utilizzate (tab. 3.7, numero catalogo 265100400) permettono un apporto di una potenza termica di 400 W, ma, a seguito di considerazioni elettriche, non tutta questa potenza potrà essere sfruttata. In particolare per questo lavoro di tesi le temperature massime raggiungibili sulla superficie al centro dei rulli (c.a. 300°C) sono inferiori a quelle necessarie per le lavorazioni (c.a. 500°C).

La scelta di lavorare con i rulli caldi è frutto soprattutto di considerazioni termodinamiche: i rulli, se freddi, produrrebbero un notevole shock termico alla lamiera preriscaldata, essendo la loro inerzia termica molto maggiore. Lavorando quindi con i rulli caldi si è cercato di abbassare questo shock.



#### Standard ULTRAMAX, Metric Sizes

Unheated length is 5 mm from bottom end and 10 mm from cable end. See tolerances further down.



Diametro [mm]	Tolleranza [mm]	Lunghezza [mm]	Potenza [W/230V]	Peso [g]	Numero catalogo
6,5	± 0,05	100	125	7	265100125
6,5	± 0,05	100	150	9	265100150
6,5	± 0,05	100	200	12	265100200
6,5	± 0,05	100	250	15	265100250
6,5	± 0,05	100	300	17	265100300
6,5	± 0,05	100	350	20	265100350
<b>6,5</b>	<b>± 0,05</b>	<b>100</b>	<b>400</b>	<b>23</b>	<b>265100400</b>
6,5	± 0,05	130	125	7	265130125
6,5	± 0,05	130	150	8	265130150
6,5	± 0,05	130	200	9	265130200
6,5	± 0,05	130	250	11	265130250
6,5	± 0,05	130	300	13	265130300
6,5	± 0,05	130	350	15	265130350

Fig. 3.13 e tab. 3.7: Cartucce riscaldanti utilizzate [15]

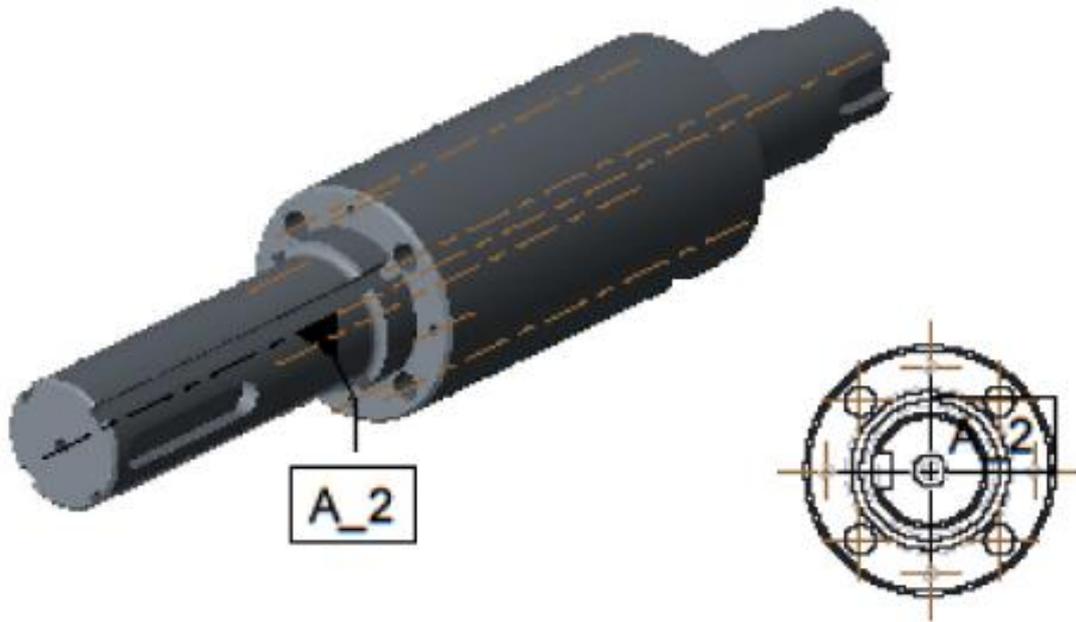


Fig. 3.14: Alloggiamenti delle cartucce all'interno dei rulli [8]

Le cartucce sono state collegate all'alimentazione esterna attraverso un collettore rotante (fig. 3.15) costituito da dei contatti striscianti, in modo che l'alimentazione non si attorcigliasse durante la lavorazione.



Fig. 3.15: Collettore rotante [16]

Il controllo che si vuole creare consta semplicemente nel raggiungimento di una determinata temperatura, ed il mantenimento di essa durante le lavorazioni. Non si è tenuto necessario effettuare controlli sofisticati (e.g. PID) in quanto lo studio del processo è ancora preliminare.

Non è stato possibile attaccare tutte le cartucce in parallelo in quanto si avrebbero avuti amperaggi troppo elevati (fig. 3.16), non supportabili dal collettore.

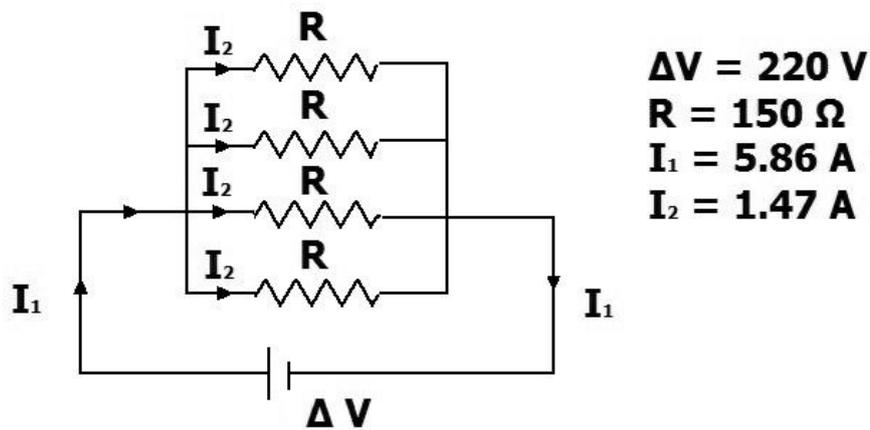


Fig. 3.16: Schema elettrico delle cartucce collegate in parallelo

Dalle regole dell'elettrotecnica:

$$R_{eq} = 37.5 \Omega$$

$$P_{tot} = 1290 \text{ W}$$

I cavi del collettore sono dimensionati a 1 A, con possibili picchi di breve tempo a 2 A. Dallo schema presentato si comprende la necessità di un collegamento diverso.

Le cartucce sono quindi state collegate quindi nel seguente modo, con le seguenti intensità di corrente:

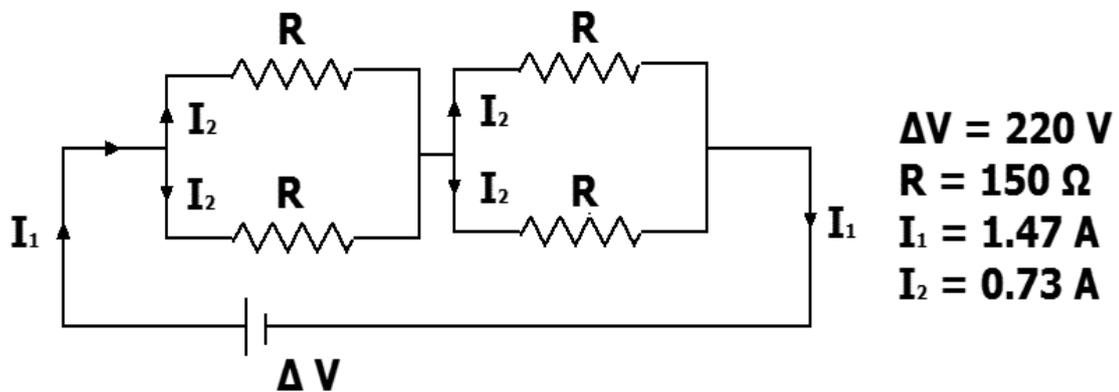


Fig. 3.17: Schema elettrico riassuntivo dei collegamenti delle cartucce

Dalle regole dell'elettrotecnica:

$$R_{eq} = 150 \Omega$$

$$P_{tot} = 324 \text{ W}$$

Tale schema diminuisce la potenza cedibile ai rulli di un quarto rispetto allo schema precedente ma è reso necessario dalle considerazioni sugli amperaggi già fatte.

Per la misura della temperatura superficiale dei rulli è stato utilizzato un pirometro il quale comunica direttamente con un microcontrollore, ossia la piattaforma "Arduino". Il controllore legge la temperatura acquisita e la confronta con la nostra temperatura target: nel caso in cui l'acquisizione sia inferiore al target, fa in modo che il circuito di alimentazione resti aperto e quindi la temperatura possa continuare ad aumentare; mentre, nel caso contrario, blocca l'alimentazione facendo in modo che la temperatura cali (fig 3.18).

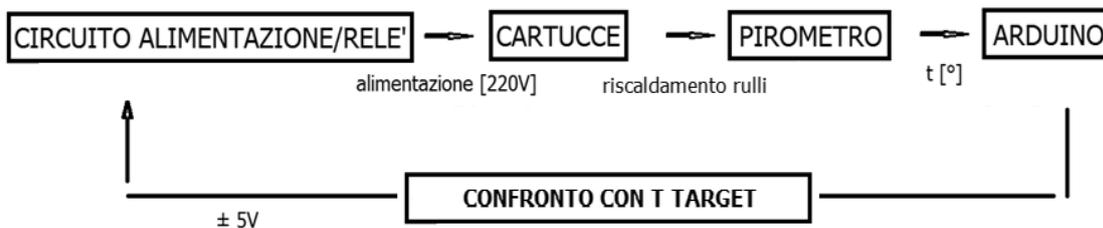


Fig. 3.18: Schema a blocchi del controllo

### 3.3.1 PROGETTAZIONE CIRCUITO DI ALIMENTAZIONE

Il circuito di alimentazione (fig. 3.19) è formato da:

1. Connettori a fissaggio vite da 5V : tali connettori consentono la comunicazione con Arduino. Uno trasmette una tensione di 5V per alimentare il circuito, mentre gli altri due comunicano direttamente con i relè, aprendoli o chiudendoli, anch'essi lavorando a 5V tramite un'uscita digitale presente nel controllore.
2. Led per controllo visivo: se accesi, il circuito non sta alimentando le cartucce; se spenti, il circuito sta alimentando le cartucce.
3. Resistenze: necessarie per controllare gli amperaggi in gioco nel circuito.
4. Diodi: per controllare il corretto verso della corrente. Essi fanno appunto in modo che la corrente segua una sola direzione del circuito;
5. Relè a doppio contatto: è il principale componente di controllo. Sostanzialmente è un dispositivo elettrico comandato dalle variazioni di corrente per influenzare le condizioni di un altro circuito. In sostanza il relè è un interruttore che non viene azionato a mano, ma da un elettromagnete: esso può azionare un circuito sia se è a riposo, non attraversato da corrente, sia se è attivo, attraversato da corrente. Nel nostro caso, il segnale di 5V apre o chiude i relè, i quali fanno in modo che le cartucce vengano o meno alimentate dai 220V messi a disposizione dalla rete;
6. Connettori a fissaggio vite da 220V: da una parte arriva direttamente l'alimentazione fornita dalla rete, mentre dall'altra è collegata l'alimentazione delle cartucce.

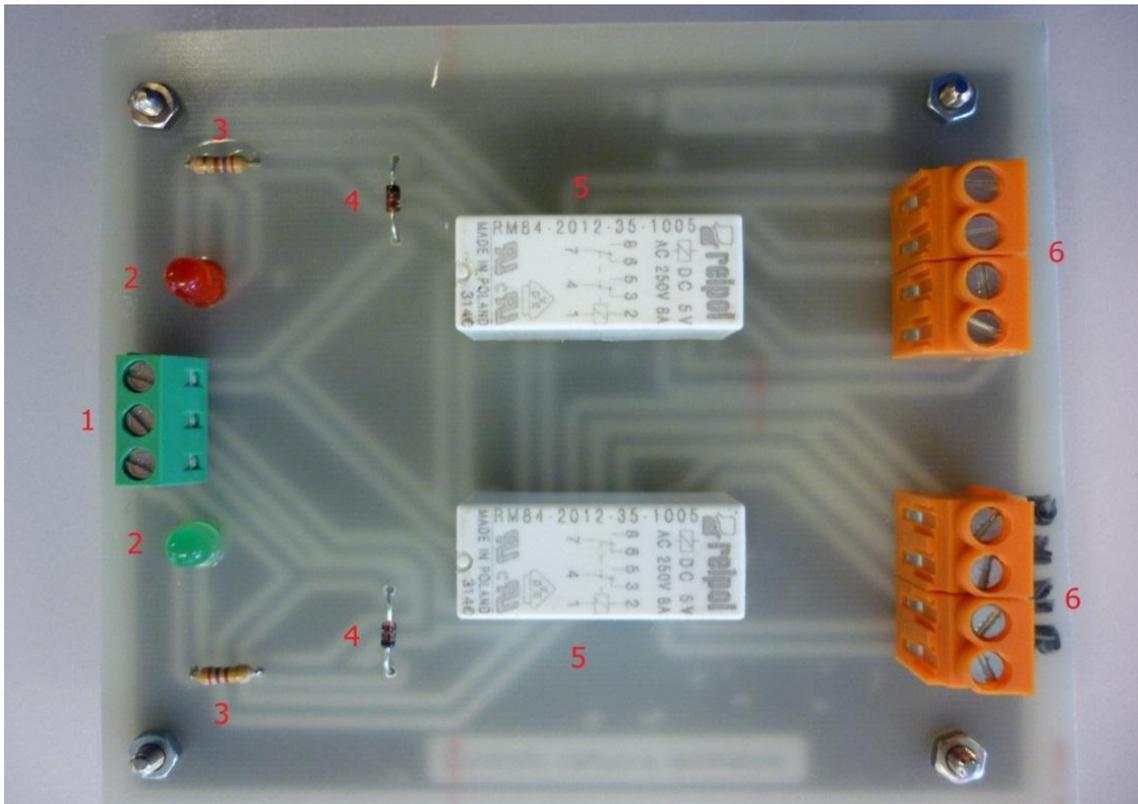


Fig. 3.19: Circuito alimentazione

A monte del circuito di alimentazione si è deciso di inserire un sistema di sicurezza formato da 4 fusibili. Il fusibile è un dispositivo elettrico in grado di proteggere un circuito dalle sovracorrenti (causate per esempio dai cortocircuiti). Il funzionamento è estremamente semplice: il fusibile è composto di una cartuccia, attraversata da un sottile filo conduttore nel quale passa la corrente nominale del circuito da proteggere; questo filo è l'elemento fusibile vero e proprio, con una portata amperometrica ben precisa. Quando sopraggiunge una sovracorrente, il filamento fonde provocando l'apertura del circuito. In particolare, i fusibili utilizzati sono da 250 V e 2 A, frutto delle considerazioni già fatte (cfr. fig. 3.17).

### 3.3.2 EAGLE 6.5.0: IL SOFTWARE

EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor. In tedesco: Einfach anzuwendender grafischer Layout-Editor) è un software EDA (Electronic design automation) molto utile nella progettazione e nel disegno di circuiti elettrici PCB (Printed Circuit Board).

Il software vanta un enorme database di componenti elettronici. Note le dimensioni di ogni singolo costituente, è possibile studiare il layout più appropriato del circuito che si intende creare.

L'utilizzo del programma si divide sostanzialmente in due parti:

1. Scelta dei componenti e relativi collegamenti tra essi: in questa fase si identificano le iterazioni fra gli elementi, collegandoli semplicemente tramite

uno schema a blocchi. Non si definisce il layout del circuito e la disposizione delle piste.

2. Layout e disegno delle piste: si definisce il layout del circuito (posizione dei componenti) e il software automaticamente traccia le piste di collegamento all'interno delle quali passerà la corrente elettrica, facendo in modo che non si incrocino.

Si ha quindi disponibile il negativo del circuito; per la stampa si fa riferimento ai paragrafi successivi.

### 3.3.3 CREAZIONE DEL CIRCUITO

Si è passati quindi alla progettazione del circuito della scatola fusibili come indicato.

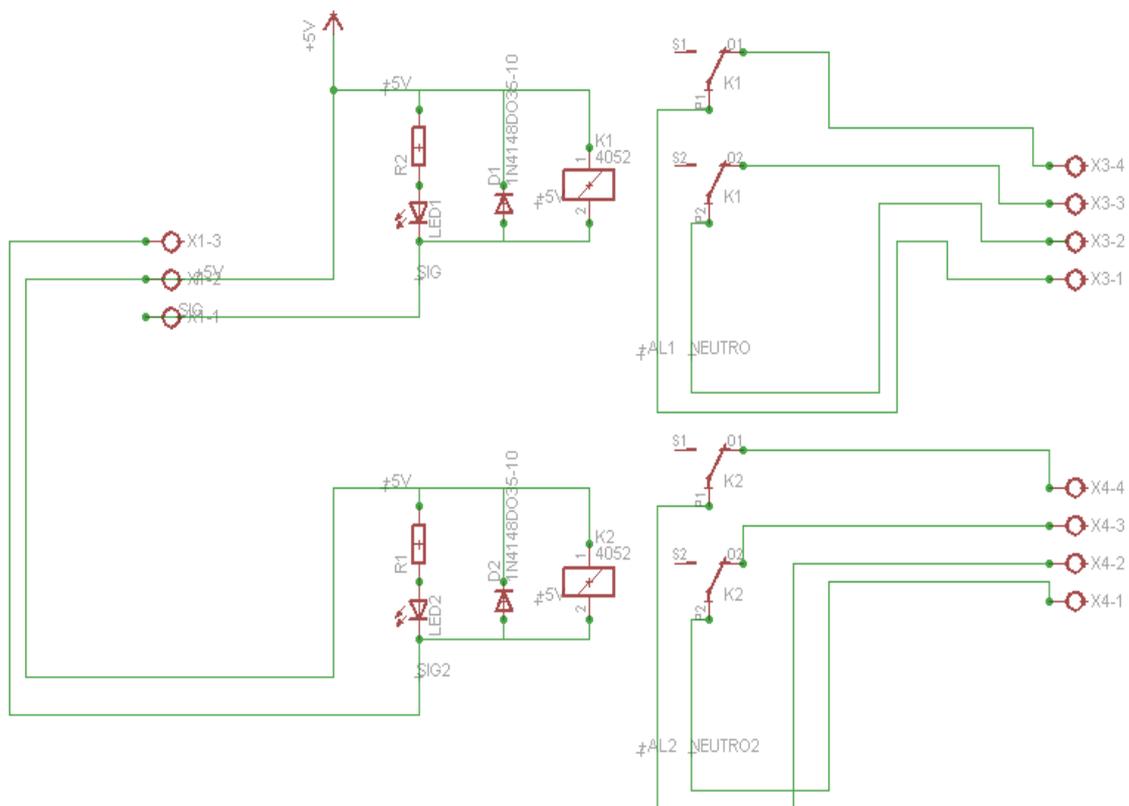


Fig. 3.20: Schema a blocchi del circuito totale con Eagle

Le dimensioni delle piste sono state definite come segue.



Minimum width [mm]	32
Minimum drill [mm]	24
Min. Micro via [mm]	10
Min. blind via ratio	0,5

Fig. 3.21 e tab. 3.8: Definizione dimensioni piste

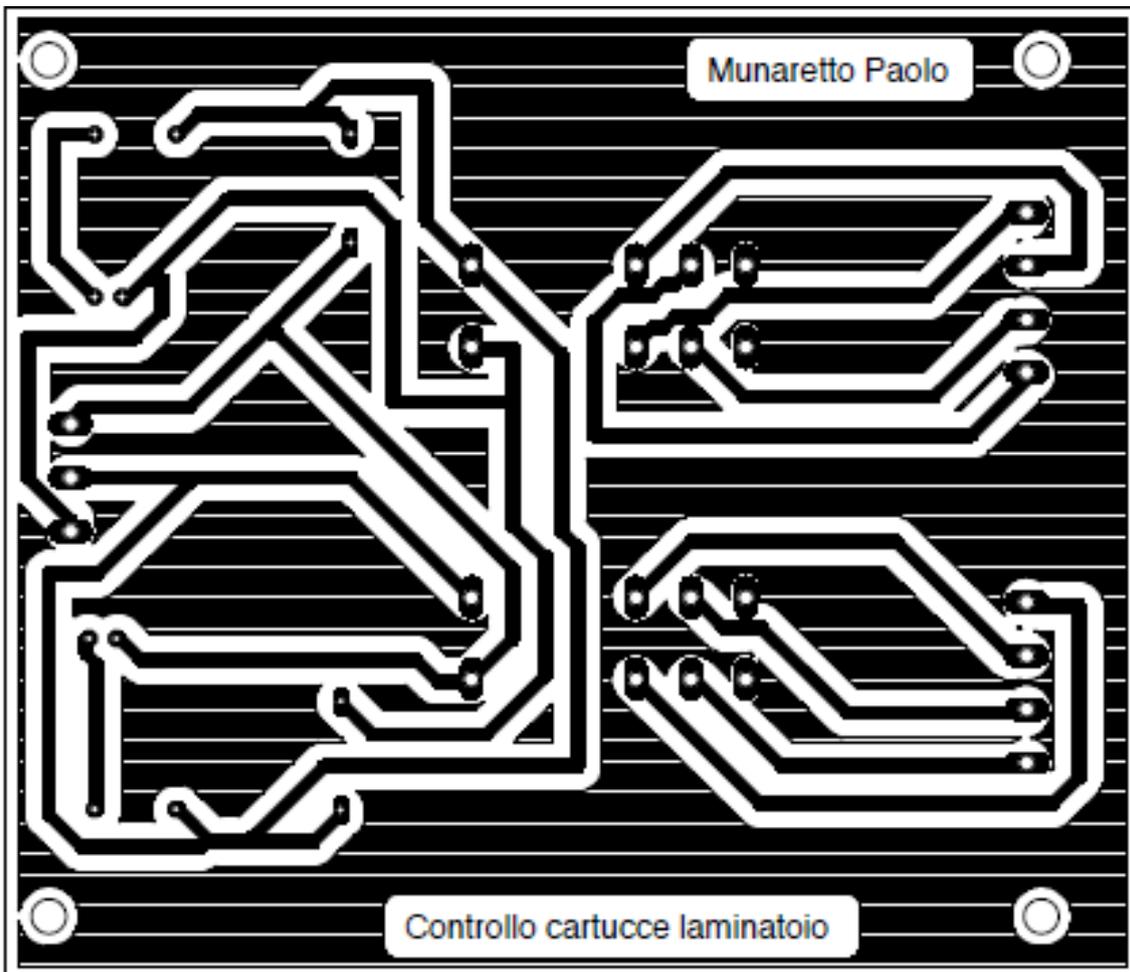


Fig 3.22: Schema del circuito

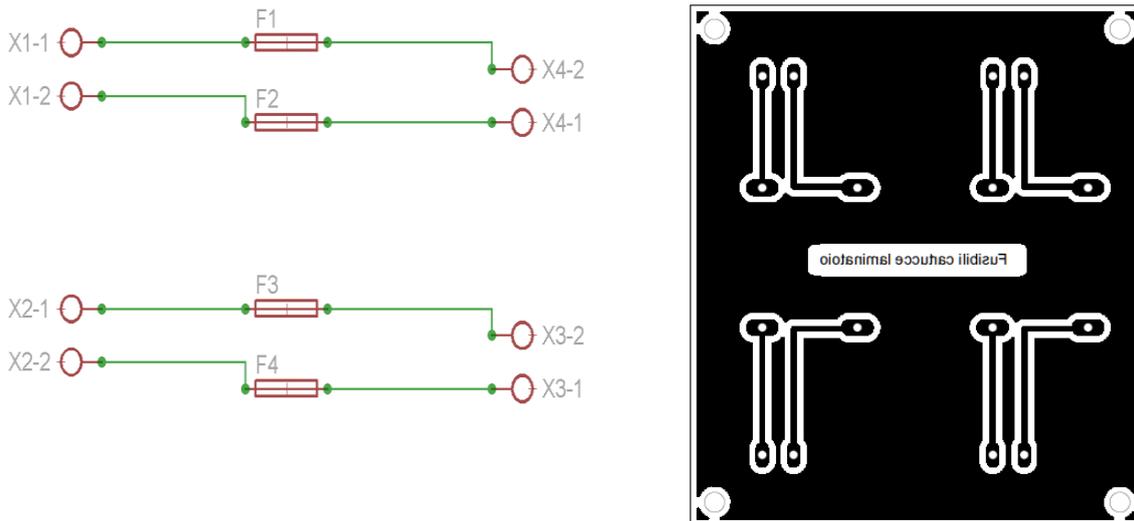


Fig: 3.22 e 3.23 Schema a blocchi della scatola fusibili con Eagle (sinistra) e stampato (destra)

In seguito si è passati alla realizzazione concreta del circuito, per la quale sono risultati necessari:

1. Una base di rame: è una piastrina di plastica che su una delle superfici maggiori ha incollato un sottile foglio di rame.
2. Un foglio blu da stampato: tale foglio, delle dimensioni di un foglio da lettera, permette, tramite la somministrazione di calore, di trasmettere il proprio contenuto in negativo su di una base di rame.
3. Ipercloruro ferrico: è un acido che scioglie il rame, ma non riesce a scioglierlo nel caso in cui sia coperto dallo strato di inchiostro trasmesso dal foglio blu.

Si è inizialmente stampato il circuito sul foglio blu, e attraverso un comune ferro da stiro, si è riportato lo schema elettrico sulla base di rame (fig. 3.25).

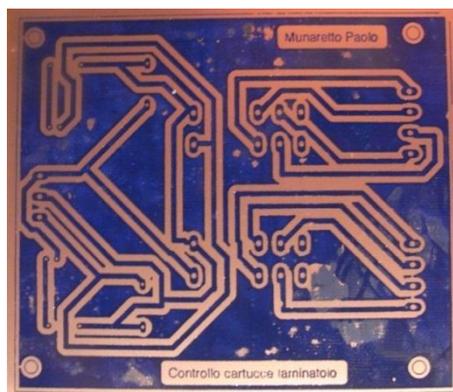


Fig 3.25: Stampaggio nella base di rame

In seguito si è passati alla rimozione delle parti di rame superflue attraverso bagno in acido (fig. 3.26). La rimozione del rame ha permesso di definire le piste attraverso le quali sarebbe corsa la corrente elettrica e gli alloggiamenti dei singoli componenti elettronici.

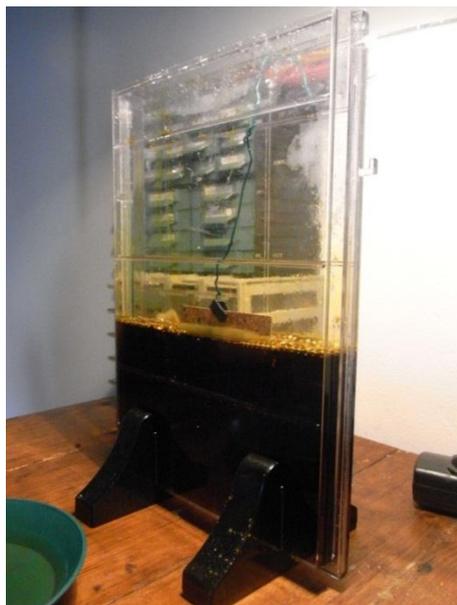


Fig. 3.26: Lavaggio della schema elettrico in acido

Si è in seguito rimosso l'inchiostro in eccesso in un semplice bagno di acqua. Sono stati poi creati i fori per il posizionamento dei componenti elettronici che in seguito sono stati stagnati. Per isolare al meglio lo schema, tutta la base è stata cosparsa con una resina isolante. I due circuiti infine sono stati collegati (fig. 3.27).

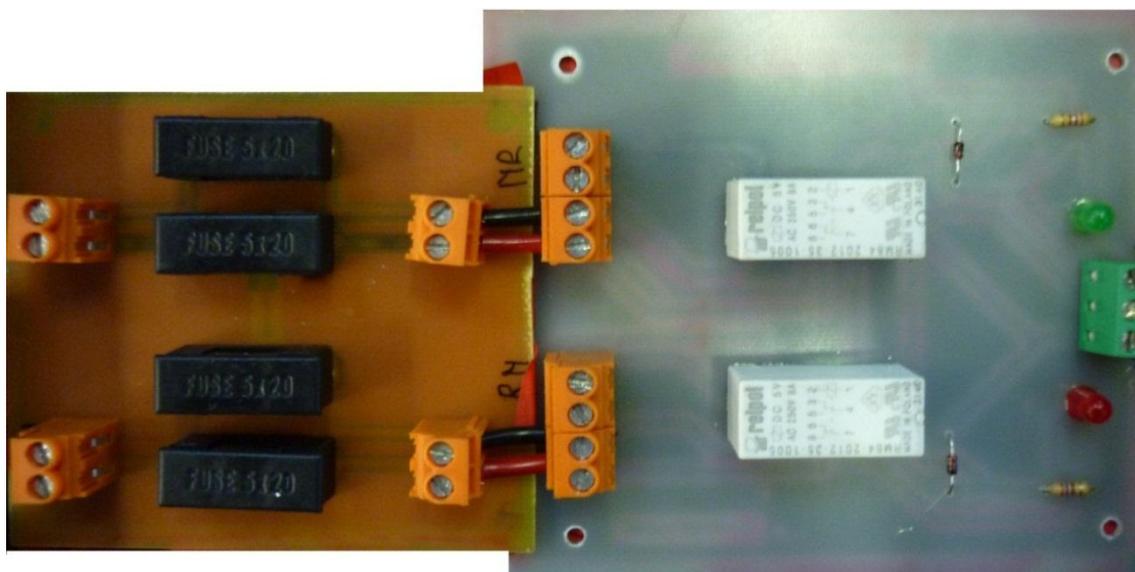


Fig. 3.27: Circuito fusibili collegato al circuito di alimentazione

### 3.3.4 PROGRAMMAZIONE DI ARDUINO

La piattaforma Arduino supporta il linguaggio C++. Inizialmente si è creato un programma che leggesse il segnale del pirometro e contemporaneamente quello di una termocoppia. Con questo programma si è andati a tarare l'emissività da impostare sul pirometro (cfr. par. 3.3.5). In seguito è stato scritto il

programma di controllo del laminatoio: il programma consiste sostanzialmente in un ciclo if, che può essere semplificato con il seguente schema a blocchi:

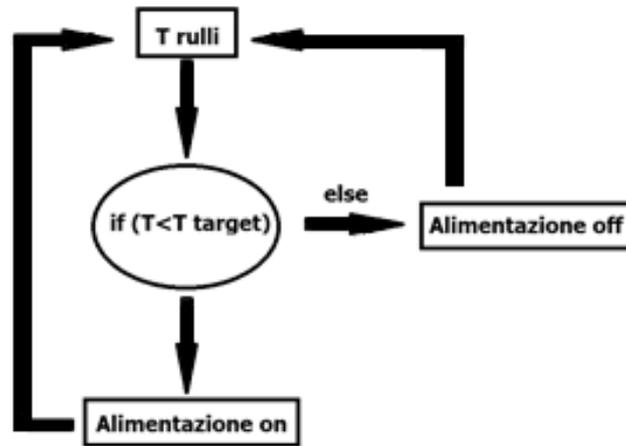


Fig. 3.28: Schema a blocchi del ciclo di controllo

*// \_\_\_ Programma taratura pirometro tramite termocoppia di Munaretto Paolo \_\_\_ //*

*int s1 = A0; //porta analogica, segnale pirometro*

*int s2 = A1; //porta analogica termocoppia*

*void setup(){*

*Serial.begin(9600);*

*Serial.println("CLEARDATA");*

*//comandi per acquisizione*

*excel*

*Serial.println("LABEL,Tempo,Temp\_pir,Temp\_term"); //imposto titoli colonna excel*

*delay(100);*

*}*

*void loop(){*

*float T\_pir = analogRead(s1); //lettura segnale pirometro*

*float T\_pir\_reale = (T\_pir/2.05); //fattore di conversione pirometro*

*float T\_ter = analogRead(s2); //lettura segnale termocoppia*

*float T\_ter\_reale = (T\_ter\*0.41); //fattore di conversione termocoppia*

*Serial.print(T\_pir\_reale); //stampa la temperatura del pirometro*

*Serial.print(","); //passo a colonna successiva*

*Serial.println(T\_ter\_reale); //stampa la temperatura della termocoppia*

*Serial.print("DATA,TIME,"); //stampa il tempo*

*delay(1000); //eseguo il ciclo una volta al secondo*

*}*

```
//___ Programma arduino controllo temperatura laminatoio di Munaretto  
Paolo___//
```

```
int s1 = A0; //porta analogica, segnale pirometro
```

```
int out1 = 2; //uscita digitale 1, comando relè
```

```
int out2 = 3; //uscita digitale 2, comando relè
```

```
void setup(){
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  pinMode(2,OUTPUT); //imposto porta come uscita
```

```
  pinMode(3,OUTPUT); //imposto porta come uscita
```

```
  Serial.println("CLEARDATA"); //comandi per acquisizione excel
```

```
  Serial.println("LABEL,Tempo,Temp_pir"); //imposto titoli colonna excel
```

```
  delay(100);
```

```
}
```

```
void loop(){
```

```
  float T_pir = analogRead(s1); //lettura segnale pirometro
```

```
  float T_pir_reale = (T_pir/2.05); ///fattore di conversione pirometro
```

```
  Serial.println(T_pir_reale); //stampo la temperatura letta
```

```
  Serial.print("DATA,TIME,"); //stampo il tempo
```

```
  if (T_pir_reale < 230){ //nel caso in cui la T sia inferiore a 230°C, accendo  
le cartucce
```

```
    digitalWrite(out1,HIGH); //apro i relè
```

```
    digitalWrite(out2,HIGH);
```

```
  }
```

```
  if (T_pir_reale > 230){ //nel caso in cui la T sia superiore a 230°C, spengo le  
cartucce
```

```
    digitalWrite(out1,LOW); //chiudo i relè
```

```
    digitalWrite(out2,LOW);
```

```
  }
```

```
  delay(1000); //controllo una volta al secondo
```

In primo luogo si sono definite le porte che il controllore avrebbe utilizzato, ossia una analogica in input, per il segnale del pirometro, e due digitali in output, per il controllo dei relè.

In seguito si è inizializzato il programma, definendo come avrebbero lavorato le porte (in/out), la frequenza di bound e si sono inseriti alcuni comandi per lo stampaggio della seriale in formato Excel.

In seguito si è passato al ciclo vero e proprio. Dopo la definizione del segnale del pirometro come variabile float (singola precisione a 4 byte), e la sua taratura, è stato inserito un ciclo if: nel caso in cui la temperatura letta fosse minore di quella target, le uscite digitali avrebbero inviato un segnale di 5V il quale mantenuto aperti i relè e quindi avrebbe permesso l'alimentazione; viceversa non sarebbe stati eccitati i relè i quali avrebbero chiuso l'alimentazione.

Infine è stata inserita la frequenza di controllo: la temperatura sarebbe stata controllata una volta al secondo.

### 3.3.5 PROVE DI RISCALDAMENTO E ACQUISIZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA

Durante le acquisizioni il pirometro è sempre stato puntato sul rullo superiore, in quanto risultava essere il più caldo ricevendo del calore per convezione dal rullo inferiore. Inoltre, si è sempre cercato di puntare lo strumento nella parte inferiore del rullo stesso, ossia dove sarebbe venuta la lavorazione, e comunque al suo centro.

Si è verificato che a causa del raffreddamento presente e dello scarso isolamento, il rullo riscaldato presenta dei punti con una differenza di temperatura che possono arrivare quasi ai 100°C, spostandosi lungo il suo asse.

Per calcolare l'emissività da impostare sullo strumento si è prima compiuta una ricerca, la quale suggeriva nel nostro caso (acciaio non lucido) una  $\epsilon$  compresa tra 0.7 e 0.9 (fig. 3.29 e 3.30). Si è quindi misurata la temperatura dei rulli durante cicli di riscaldamento e raffreddamento, senza controllo, con una termocopia (tipo K) della quale si conoscevano le caratteristiche, e quindi si è settata l'emissività. Il valore  $\epsilon = 0.85$  è quello che minimizza gli errori alle temperature che andremo a considerare.

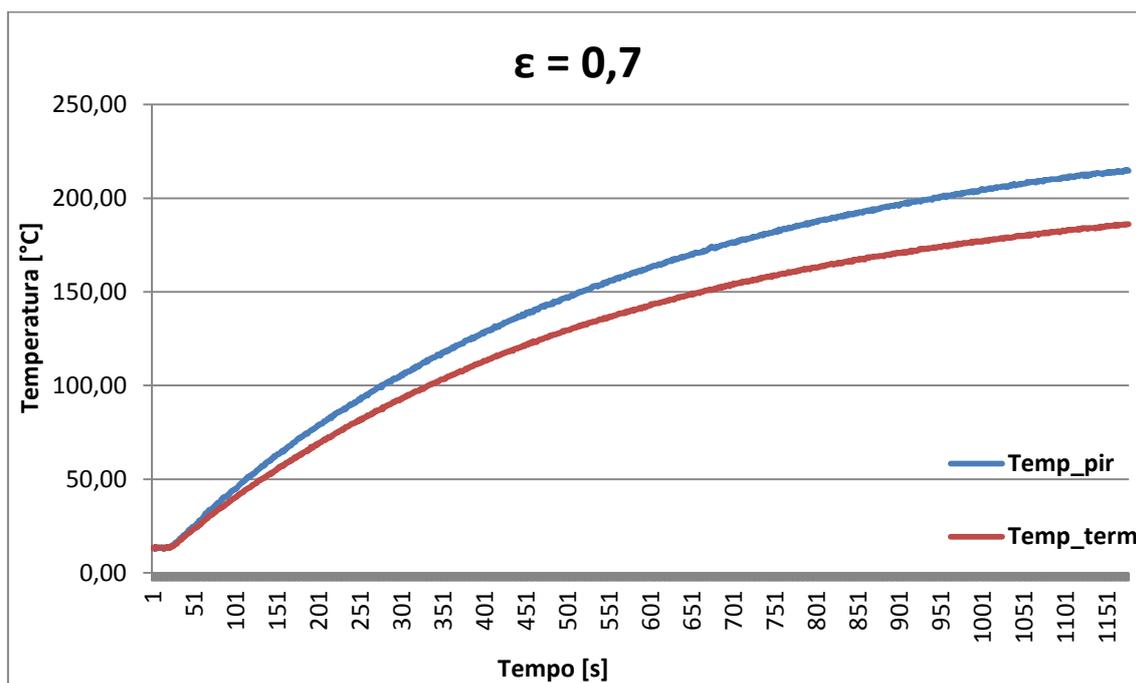


Fig. 3.29: Prova di riscaldamento per calcolo emissività (qui  $\epsilon = 0.7$ ). Misurazione con pirometro e termocoppia.

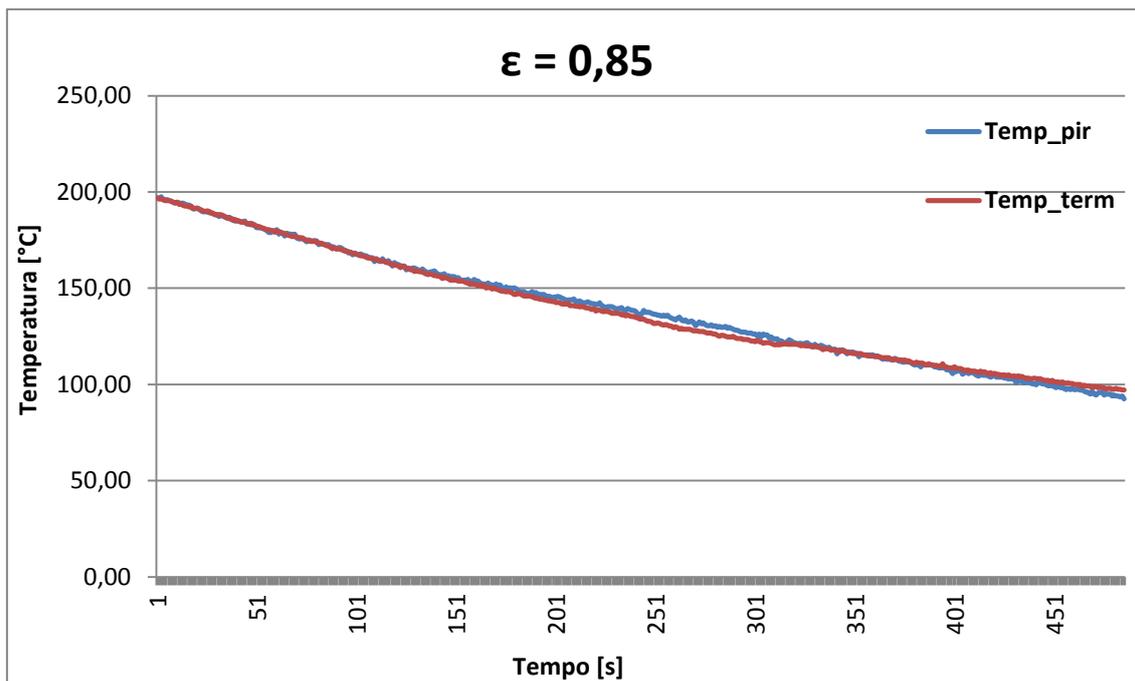


Fig. 3.30: Prova di raffreddamento per calcolo emissività (qui  $\epsilon = 0.85$ ). Misurazione con pirometro e termocoppia.

Come prima prova si è deciso di verificare il controllo per una temperatura target di 100°C e 30 minuti di acquisizione, con rulli fermi (fig. 3.31).

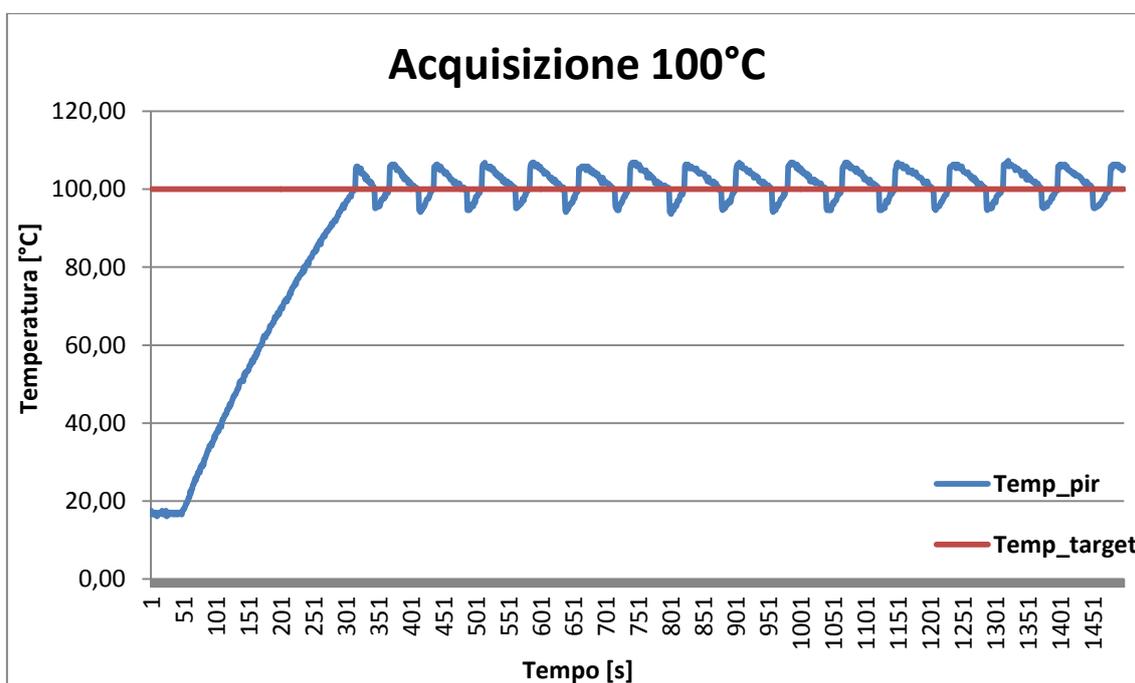


Fig.3.31: Prima acquisizione

In seguito si è deciso di verificare se esistesse una differenza nel controllare il sistema con i rulli fermi o in movimento, mantenendo comunque costante la frequenza di acquisizione.

Un primo test è stato effettuato durante il riscaldamento da temperatura ambiente (fig. 3.32).

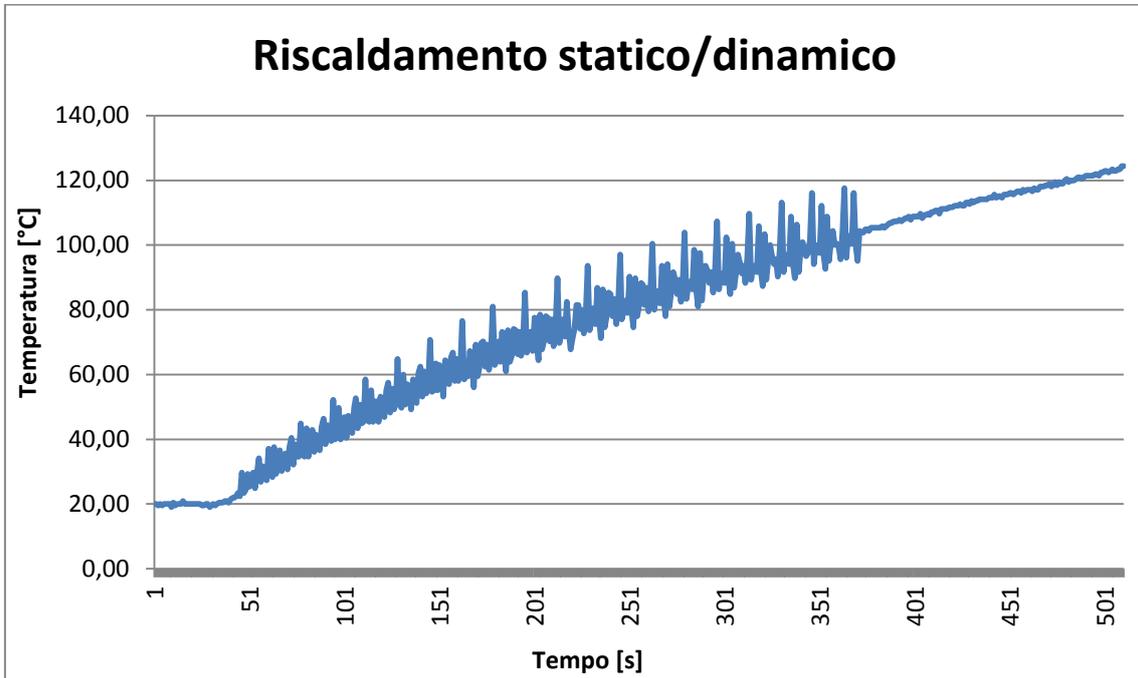


Fig. 3.32: Acquisizione curva riscaldamento con rulli prima in movimento, poi fermi

Durante la stessa acquisizione si è poi verificata la differenza tra il caso statico e dinamico una volta raggiunta la temperatura target (fig. 3.33, qui di 150°C).

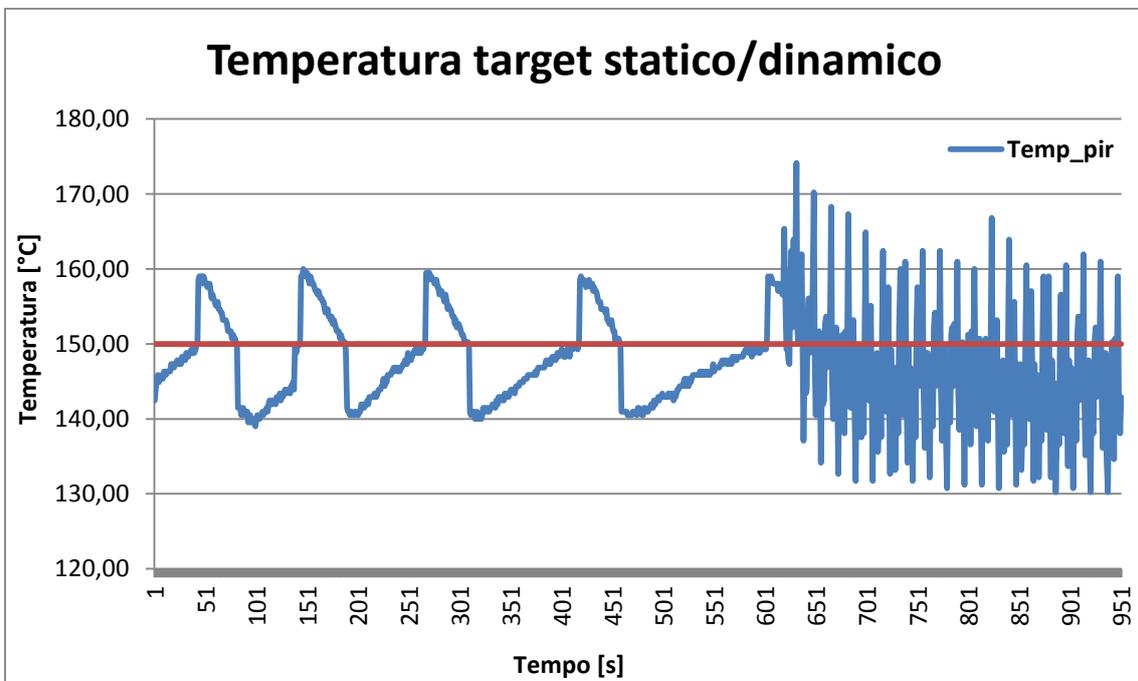


Fig. 3.33: Acquisizione una volta raggiunta la T target con rulli fermi, poi in movimento

Come si può notare, i rulli in movimento introducono un gran rumore, che può essere associato al raffreddamento che i rulli subiscono una volta in moto, ma soprattutto alla differenza di temperatura presente nei diversi punti dei rulli (ad esempio i punti immediatamente sopra alla locazione delle cartucce sono risultati sempre i più caldi). Per le prove successive si è deciso di controllare la temperatura con i rulli fermi, ed in seguito accendere il laminatoio solo per la lavorazione delle lamiere. Viene inoltre presentata una acquisizione a 230°C (fig. 3.34) , che, come spiegato in seguito, sarà la temperatura alla quale verranno fatte le prove. Tale sarà la temperatura misurata a circa 2.5 cm dal centro del rullo.

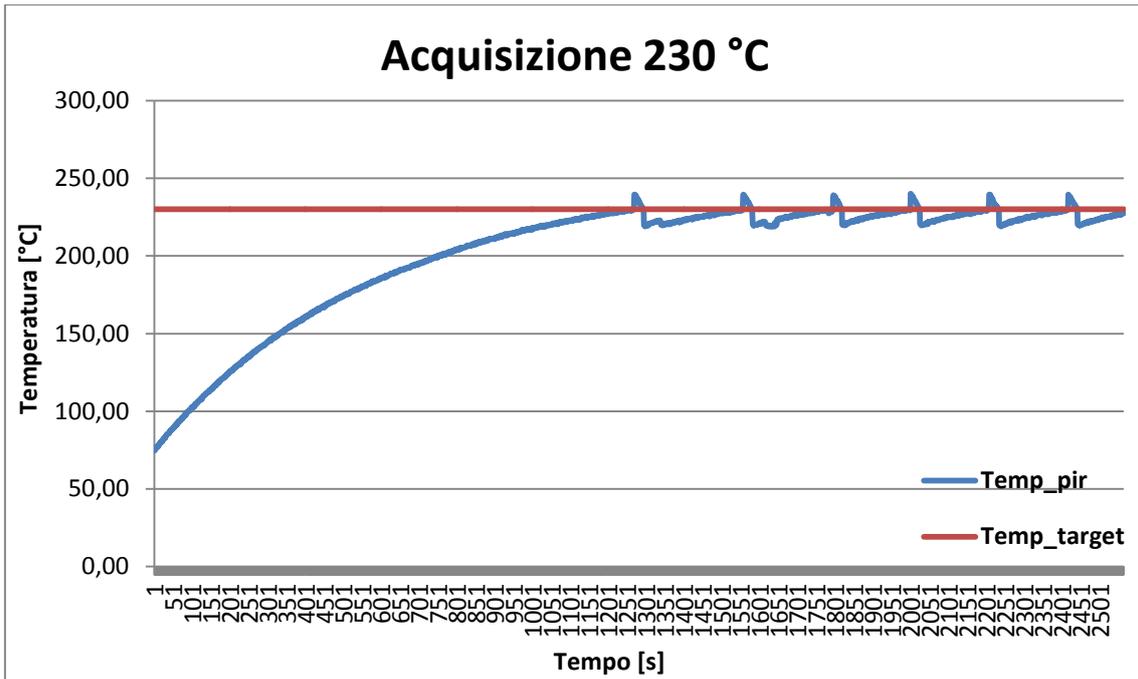


Fig 3.34: Acquisizione riscaldamento fino a 230°C

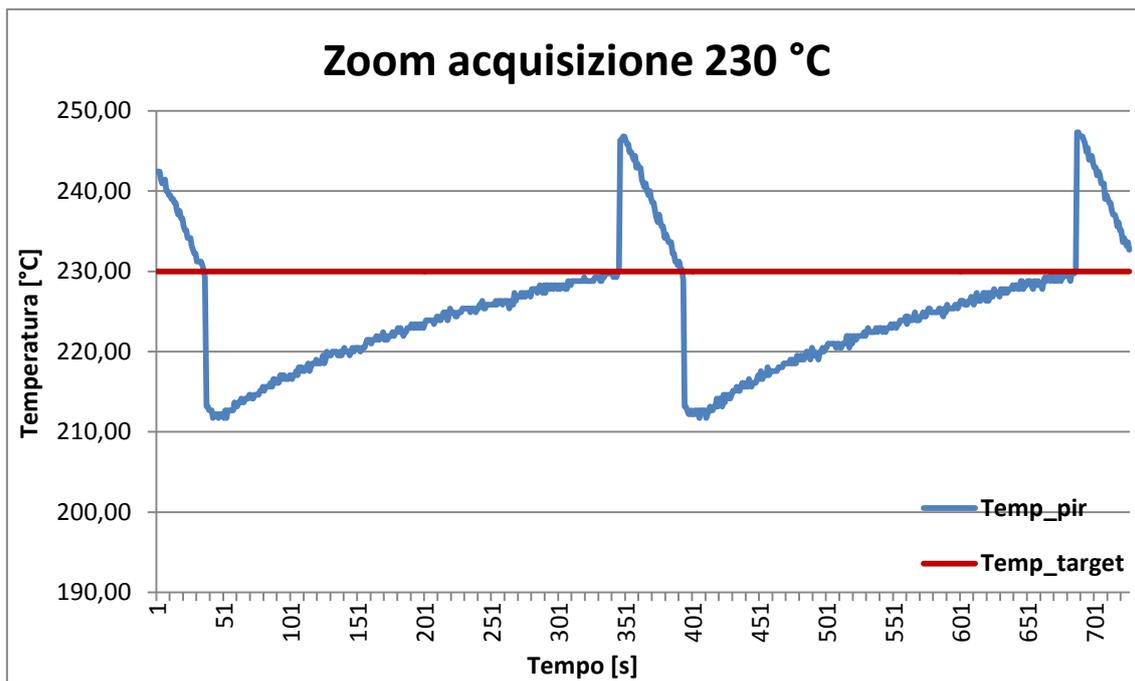


Fig. 3.35: Zoom acquisizione a 230 °C

I picchi visibili durante l'acquisizione (fig. 3.35) sono da considerarsi un disturbo in quanto è impossibile avere variazioni di temperatura istantanei. Si è data la seguente spiegazione: essendo le cartucce di tipo elettrico, esse tendono a fermare un campo magnetico attorno al rullo. Questo campo va a influenzare l'acquisizione del pirometro, che acquisisce raggi infrarossi sotto forma di onde elettromagnetiche. Una volta raggiunta la temperatura target durante il riscaldamento le cartucce si spengono e il campo magnetico sparisce; raggiunta la temperatura target in raffreddamento le cartucce si accendono e il campo magnetico viene ripristinato.

Viene infine presentata l'acquisizione contemporanea della temperatura dei rulli e della temperatura delle bronzine (fig 3.36). Per la misura della temperatura delle bronzine è stata utilizzata una termocoppia di tipo K, sempre collegata alla piattaforma Arduino, utilizzando lo stesso programma utilizzato per il calcolo dell'emissività. Si è cercato di misurare la temperatura delle bronzine dove essa era maggiore.

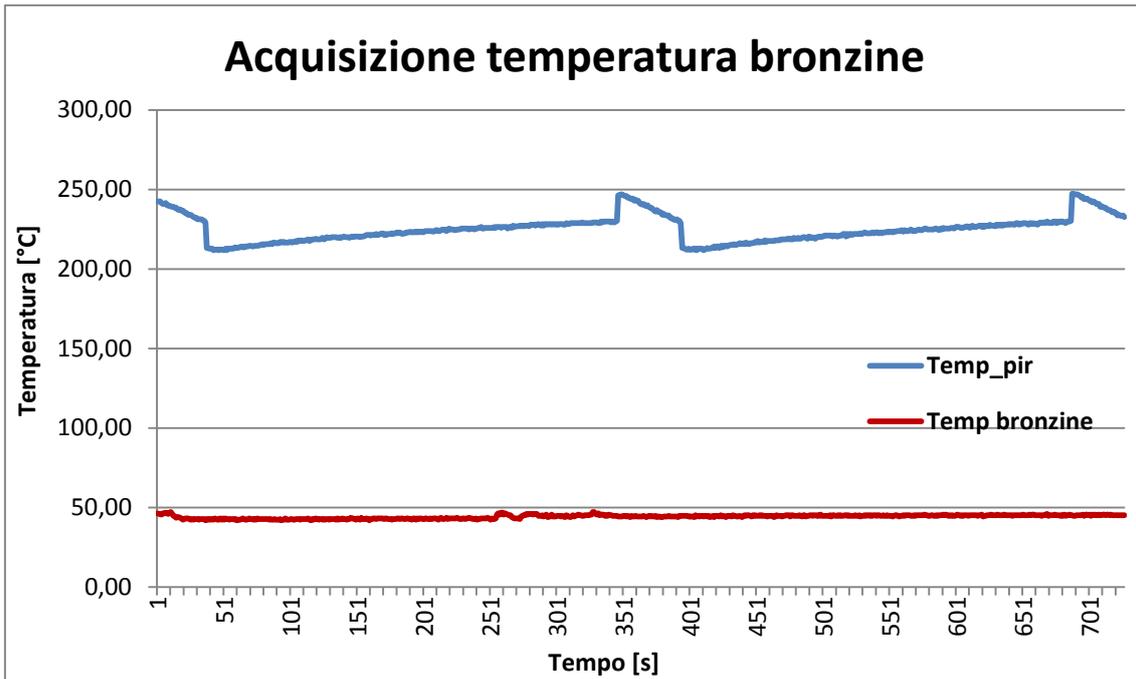


Fig. 3.36: Acquisizione dell'andamento della temperatura delle bronzine

Come si nota la temperatura delle bronzine non raggiunge mai i 50°C, e quindi le temperature non sono mai critiche per le bronzine.



# CAPITOLO 4: SIMULAZIONE DEL PROCESSO

## 4.1 CRITICITA' SALDATURA

Valutando un articolo di ricerca interno si è cercato di ipotizzare lo stato tensionale che porterebbe a saldatura di 2 lamierini durante la laminazione. In particolare, nelle nostre condizioni di temperatura e materiale, il parametro a cui fare riferimento è  $Z = P/\sigma_{eq}$ . Il materiale dovrebbe subire saldatura per  $Z \geq 2.5$ . Per essere in vantaggio di sicurezza si è posto  $Z \geq 3$  (fig. 4.1) [9].

La saldatura è da considerarsi effettivamente avvenuta quando la ricristallizzazione dei grani di alluminio interessa l'interfaccia presente tra i 2 lamierini, facendola sparire.

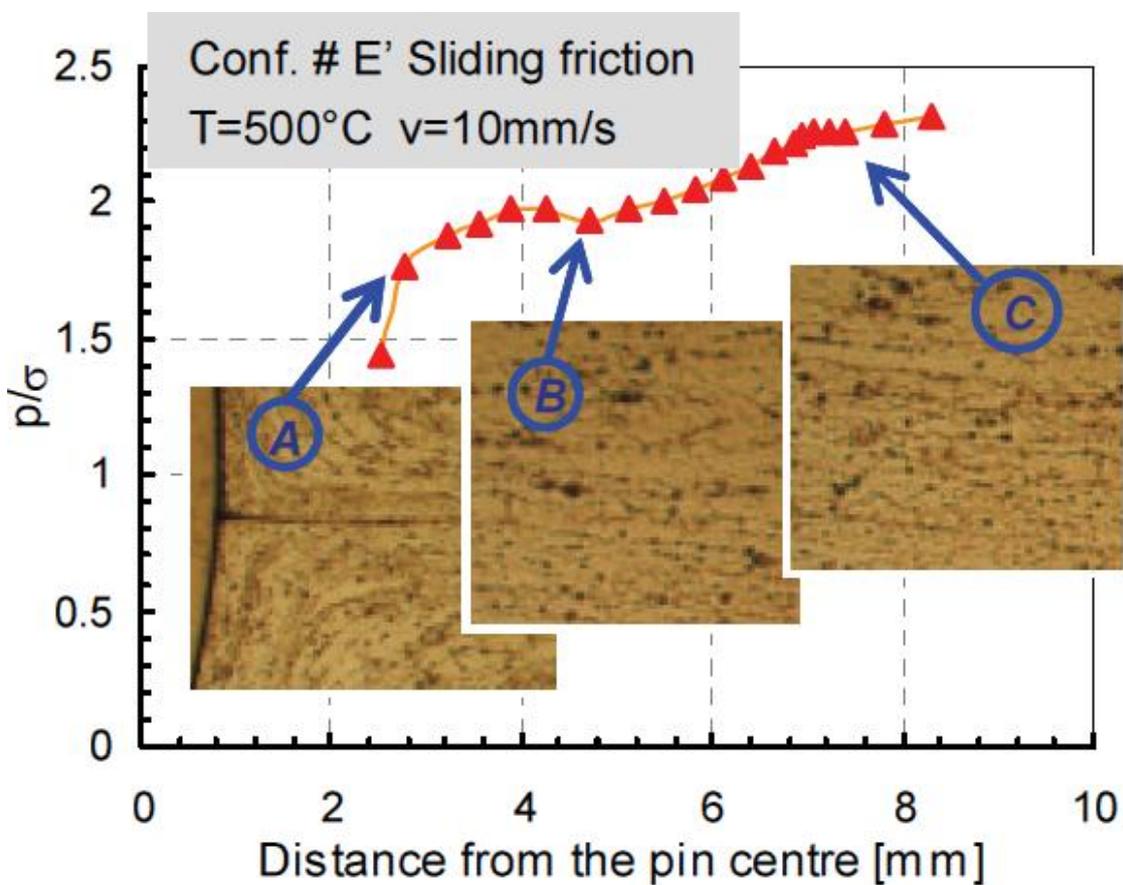


Fig. 4.1: Presentazione grafico articolo scientifico [9]

## 4.2 CRITICITA' ROTTURA FIBRE

Valutando alcuni lavori di tesi precedenti, e le proprietà delle fibre utilizzate, si sono notati due principali fattori che potrebbero portare ad una rottura delle fibre durante il processo di roll bonding.

- 1 Resistenza a taglio: le fibre di carbonio e vetro possiedono un'ottima resistenza a trazione longitudinale, ma una scarsa resistenza a taglio in quanto per loro non valgono le equazioni costituenti la meccanica dei solidi, essendo la scala considerata microscopica (proprietà meccaniche di taglio in tab. 4.1). Durante il processo, il materiale non solo subisce uno stiramento lungo la direzione di laminazione, ma anche una deformazione trasversale e una compressione, le quali creano appunto sforzi di taglio sul piano di saldatura. Tali tensioni possono portare alla rottura della fibra.

	Carbonio HS	Vetro S
Modulo di taglio [GPa]	5	35

Tab. 4.1 : Proprietà dei moduli di taglio delle fibre utilizzate

- 2 Allungamento a rottura: nel caso di una forte adesione con la matrice, si deve considerare il fatto che durante laminazione il provino subisce una grande deformazione (c.a. 50%). Tali deformazioni possono portare alla frattura delle fibre le quali, pur avendo una grande resistenza a trazione, hanno una bassa deformazione a frattura (per il carbonio circa 2%, per la fibra di vetro circa il 5%). Bisognerà quindi verificare se le fibre possano scorrere all'interno della matrice, quindi non subendo la stessa deformazione, ma allo stesso tempo esservi adeguatamente ancorate.

## 4.3 CALCOLO ANALITICO

Noti i parametri critici, si è andati a simulare il processo di roll bonding analiticamente e agli elementi finiti. Il calcolo analitico si basa sulla simulazione del processo di laminazione tramite il metodo della slab analysis, e non tiene conto del fatto che le lamiere in gioco sono due, né tantomeno dell'attrito presente fra esse, ma considera unicamente una lamiera (spessore 2 mm) e gli stati tensionali che subisce (fig. 4.2).

Per tutta la dimostrazione del procedimento e i calcoli analitici si fa riferimento all'appendice 1.

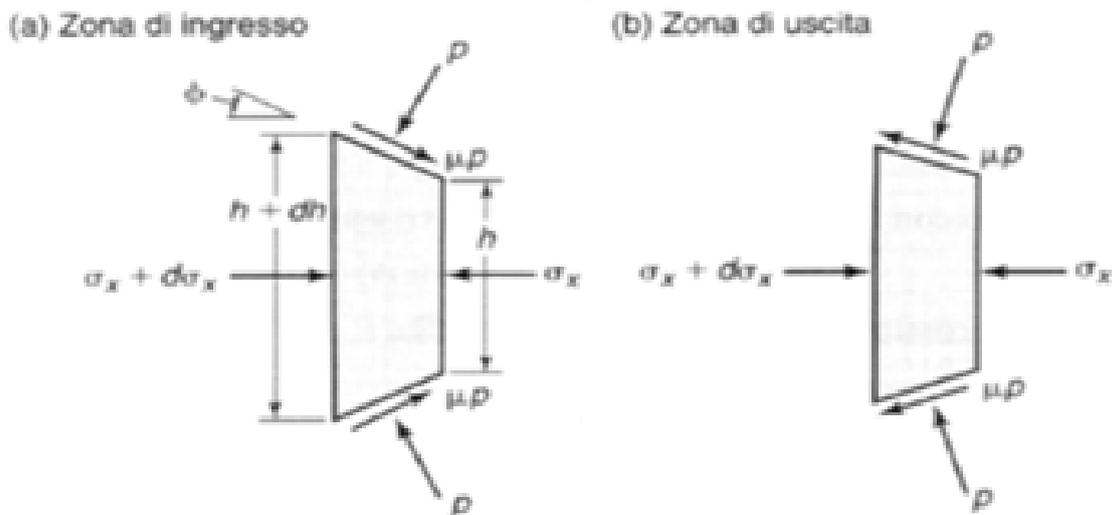


Fig. 4.2: Semplificazione del metodo della slab analysis

### 4.3.1 CALCOLO DELLE TENSIONI IN GIOCO

Inizialmente si è andati a calcolare il parametro Z per diversi spessori di lamiera e per diversi rapporti di riduzioni (fig. 4.3). Il calcolo è stato effettuato lungo l'asse neutro .

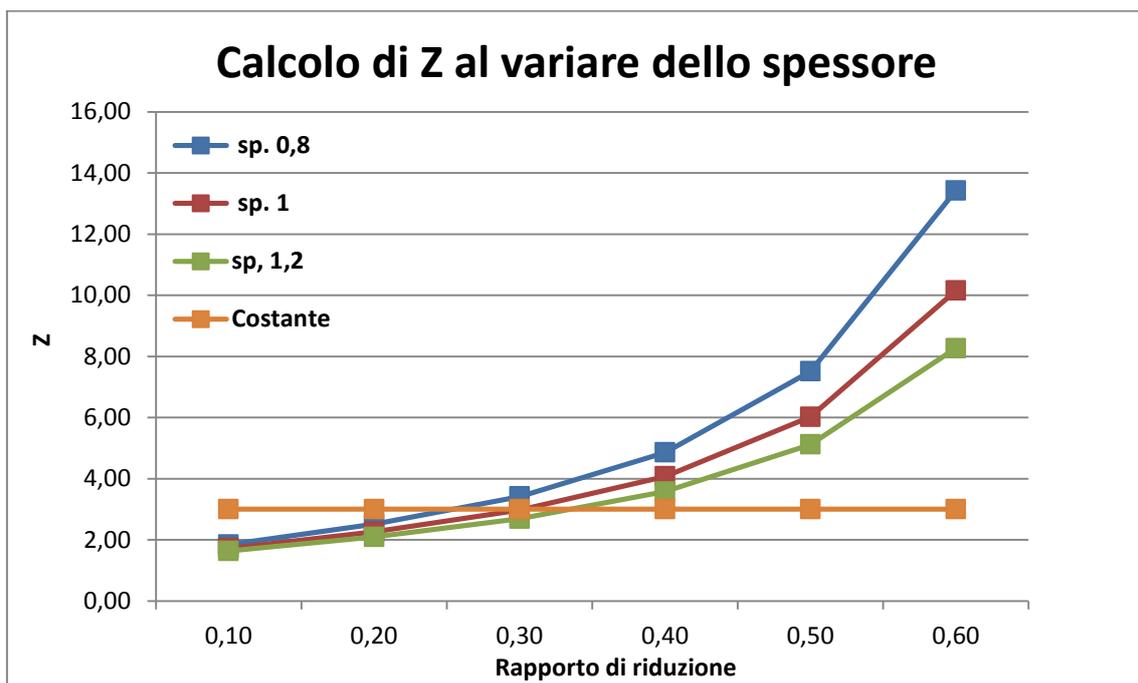


Fig. 4.3: Andamento del fattore Z al variare dello spessore iniziale e del rapporto di riduzione

Da notare come all'aumentare dello spessore iniziale, il parametro Z critico viene raggiunto per riduzioni maggiori. Nel nostro caso quindi si è scelto di lavorare con lamiere di 1 mm di spessore per limitare le deformazioni (cfr. par. 4.2) e raggiungere la criticità a saldatura tra il 30% e il 40% di riduzione. Inoltre, si nota come il parametro non abbia una dipendenza lineare dal rapporto di riduzione, ma ha un andamento esponenziale, come ci si aspetta dalle equazioni presentate nell'Appendice 1.

### 4.3.2 CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI

Scelto lo spessore più adeguato (1 mm), si è andati a calcolare il valore di deformazione in funzione dei rapporti di riduzione.

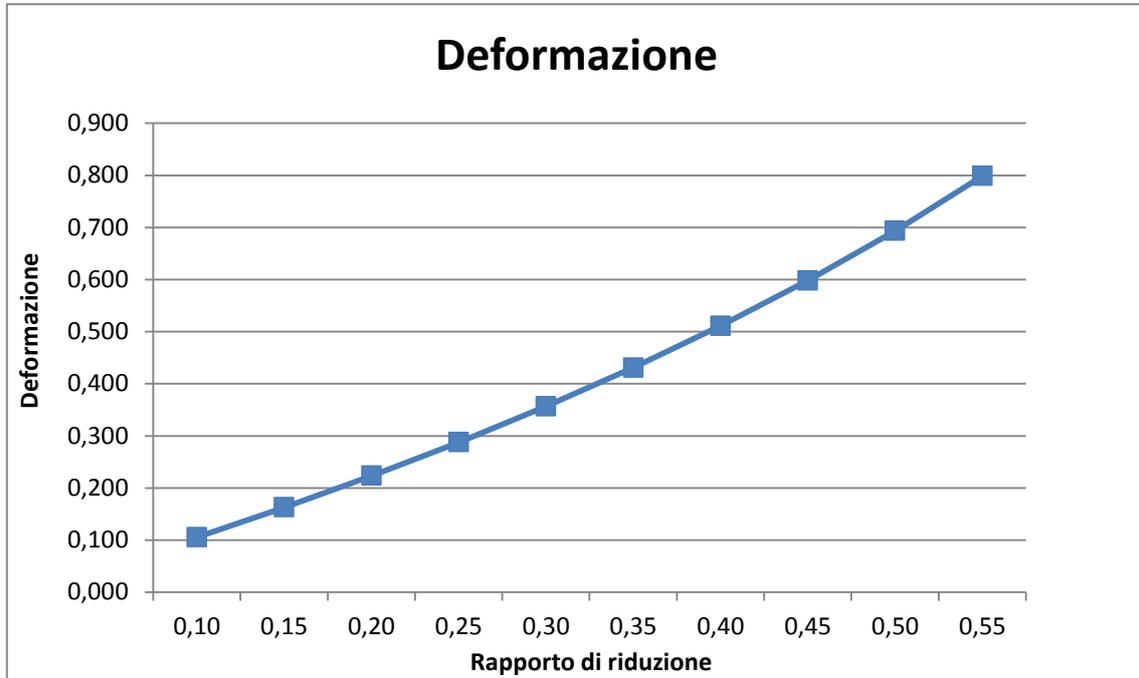


Fig. 4.4: Andamento della deformazione per una lamiera di 2mm di spessore iniziale al variare del rapporto di riduzione

Si è andati a verificare tramite la teoria della conservazione del volume la deformazione per un rapporto di riduzione  $R = 0.40$  (tab 4.3), in quanto sarà quello più utilizzato, lungo la direzione di laminazione, cioè dove si sono misurate le deformazioni maggiori durante le prime prove.

V [mm <sup>3</sup> ]	L finale [mm]	$\epsilon$
8000	167	0,51

Tab. 4.3: Verifica delle deformazioni in gioco

### 4.3.3 CALCOLO DELLE VELOCITA' DI DEFORMAZIONE

Analogamente a quanto fatto per la deformazione, si sono andate a calcolare le velocità di deformazione, al variare del rapporto di riduzione. Naturalmente ci si aspetta anche qui un andamento crescente del parametro, speculare a quello della deformazione.

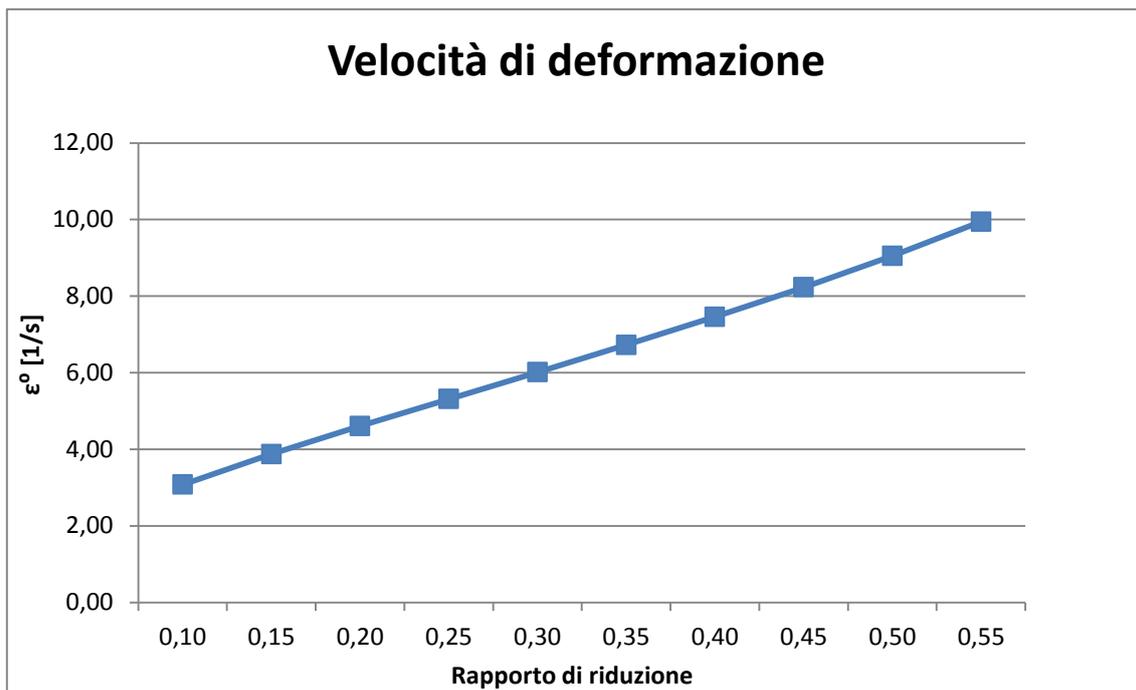


Fig. 4.5: Andamento della velocità di deformazione per una lamiera di 2mm di spessore iniziale al variare del rapporto di riduzione

Le velocità di deformazione in gioco non sono critiche per la matrice, in quanto essa lavora principalmente a compressione; per il rinforzo valgono le stesse considerazioni fatte per la deformazione.

## 4.4 SIMULAZIONE NUMERICA

### 4.4.1 FORGE: IL SOFTWARE

FORGE è un sistema software dedicato alla simulazione dei processi di deformazione massiva dei metalli, quali la forgiatura a stampo chiuso o aperto, lo stampaggio, l'estrusione, la laminazione, o altri processi di formatura.

Con FORGE è possibile la simulazione dinamica del processo di stampaggio a caldo, a tiepido o a freddo, considerando i fenomeni termici, tensionali e deformativi ad esso correlati. Può essere utilizzato per la simulazione di un intero processo di stampaggio, partendo dal raffreddamento della billetta nel passaggio tra forno di riscaldamento e l'aggiustamento sullo stampo della prima fase di deformazione, fino all'apertura dello stampo finitore con la previsione del ritorno elastico.

E' possibile simulare operazioni complesse di stampaggio con un numero notevole di stampi/punzoni che sono soggetti a cinematiche di movimento non lineari, con stampi flottanti o blindati.

Nel software sono presenti le più avanzate tecniche numeriche (remeshing automatico, solutore parallelo) che consentono a FORGE la simulazione di componenti geometricamente molto complessi come fusi a snodo ed alberi a camme, in tempi rapidi. FORGE è prodotto dalla società francese Transvalor ed è continuamente sviluppato in collaborazione con il Centre for Material Processing (CEMEF) dell'Ecole des Mines de Paris e con partner industriali di tutto il mondo [18].

#### 4.4.2 ELEMENTI DI SIMULAZIONE

Nel nostro caso il software è stato utilizzato nella modalità “3d hot forging”. Per la simulazione è stato necessario creare in formato .STL gli elementi che prendono parte al processo, e quindi i rulli (upper/lower die) e le lamiere (billet/3d billet). E’ stato creato un asse di simmetria longitudinale rispetto le lamiere, per ridurre il tempo di elaborazione, e tutti i risultati ottenuti sono stati specchiati rispetto ad esso. Inoltre è stato inserito un ulteriore stampo (3d hot die) il quale ha il compito di spingere inizialmente le lamiere all’interno del laminatoio (fig. 4.6, nella figura è anche rappresentata la terna del sistema di riferimento a cui si rimanderà per tutte le figure a seguire). La velocità di questo ulteriore stampo, e quindi la velocità di immissione delle lamiere, è stata impostata molto minore della velocità tangenziale dei rulli: questo accorgimento ha fatto in modo che durante la prova le billette non subissero carico di punta.

Infine è stato inserito un manipolatore il cui compito era quello di simulare l’adesione che si veniva a creare, mantenendo le 2 facce a contatto delle lamiere su uno stesso piano per l’intero processo; la velocità di tale manipolatore non è stata impostata, e quindi il software l’ha estrapolata dalle velocità delle billette stesse.

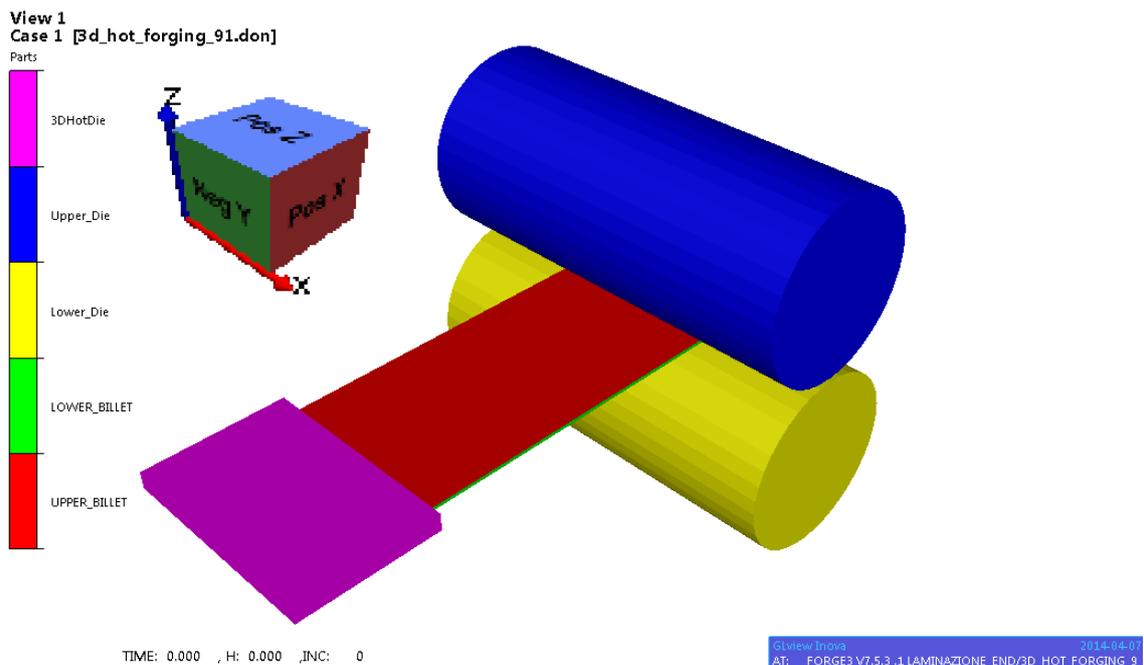


Fig. 4.6: Elementi di simulazione del processo e sistema di riferimento utilizzato

### 4.4.3 PARAMETRI DI SIMULAZIONE

Per la simulazione sono stati impostati i parametri di processo in tabella 4.4.

Temperatura ambiente [°C]	20
Velocità rotazione rulli [RPM]	24
Velocità immissione lamierini [mm/s]	0,5
Temperatura dei rulli	230
Temperatura iniziale dei lamierini	450
Attrito tra le superfici	"No lube" Friction: no lubrication Law's name: Coulomb mbarre = 8.000000e-01 mu = 4.000000e-01
Scambio termico con gli stampi	"Steel hot strong" alphas = 2.000000e+04 effus = 1.176362e+04
Scambio termico con l'aria	"Air" AlphasExt = 10.000000e+02
Mesh (altezza massima tetraedro) [mm]	0,5 – 1 (fig. 4.7 e 4.8)

Tab. 4.4

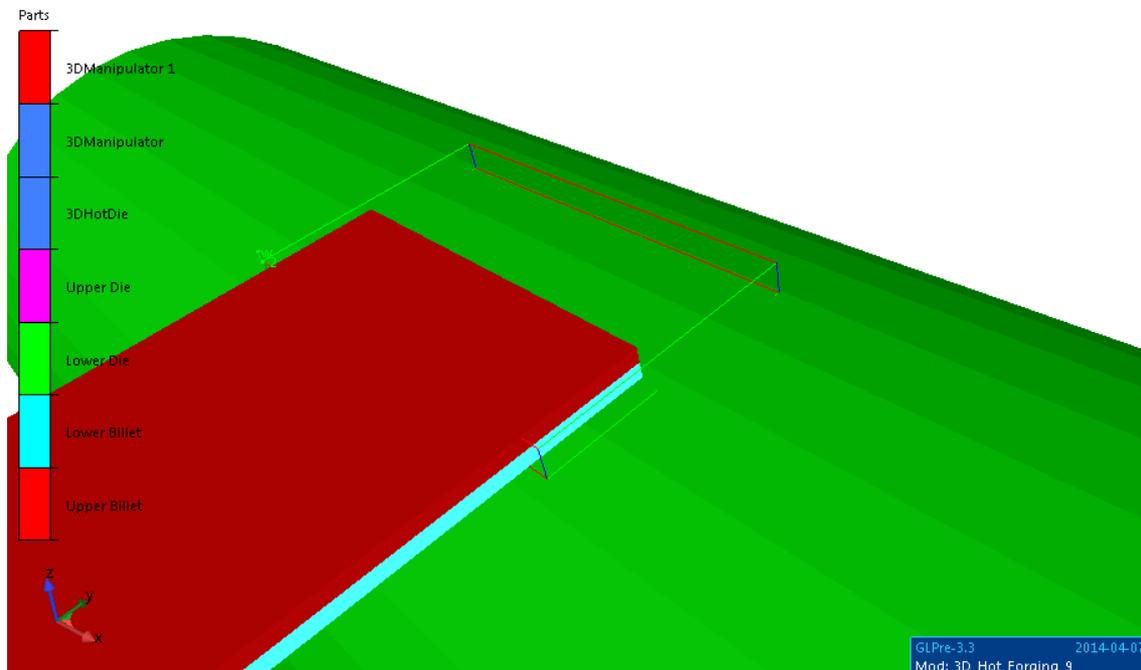


Fig. 4.7: Volume in cui si è deciso di mantenere una mesh più fina

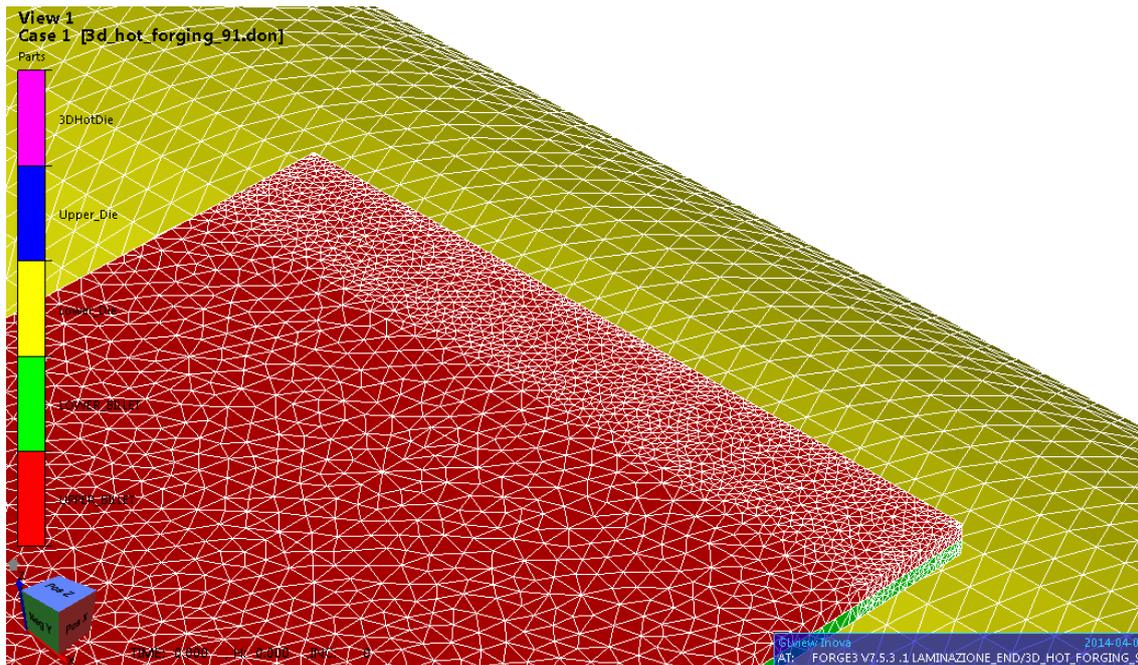


Fig. 4.8: Differenza durante il processo tra mesh fina e mesh grossa

#### 4.4.4 CALCOLO DELLE TENSIONI IN GIOCO

Vengono ora presentati i risultati agli elementi finiti riguardanti i parametri di tensione. Si è deciso di stampare i dati riguardanti l'interfaccia tra le due lamiera, in quanto è quella oggetto di studio. Sono presentati i risultati dopo 0.180 secondi dall'inizio della lavorazione in quanto la parte finale della lamiera ha già cominciato a raffreddarsi per convezione essendo a contatto dell'aria, e quindi risulta più critica per il processo. Vengono presentate in particolar modo la tensione normale alla superficie (corrispondente alla pressione del calcolo analitico) e la tensione equivalente di Von Mises per verificare la criticità a saldatura (cfr. par. 4.1, fig. da 4.9 a 4.14) e tutte le tensioni di taglio in gioco per la criticità di rottura delle fibre (cfr. par. 4.2, fig da 4.15 a 4.17) e le altre tensioni principali (fig. 4.18 e 4.19)

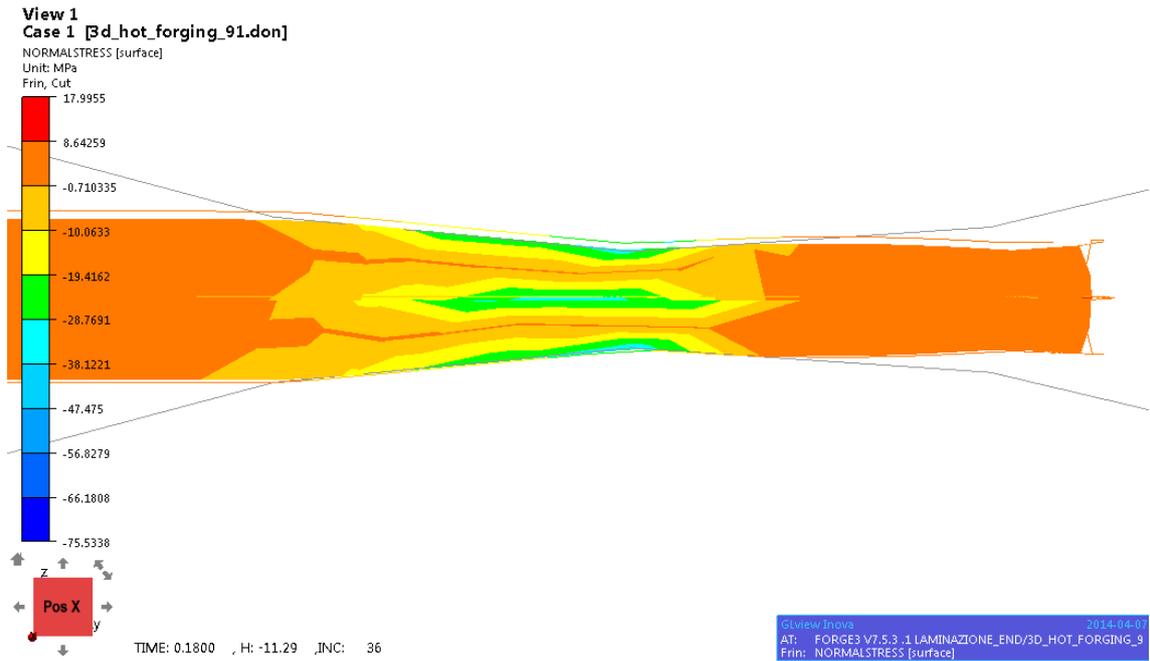


Fig. 4.9: Tensione normale alla superficie durante il processo, piano yz passante per il centro del provino

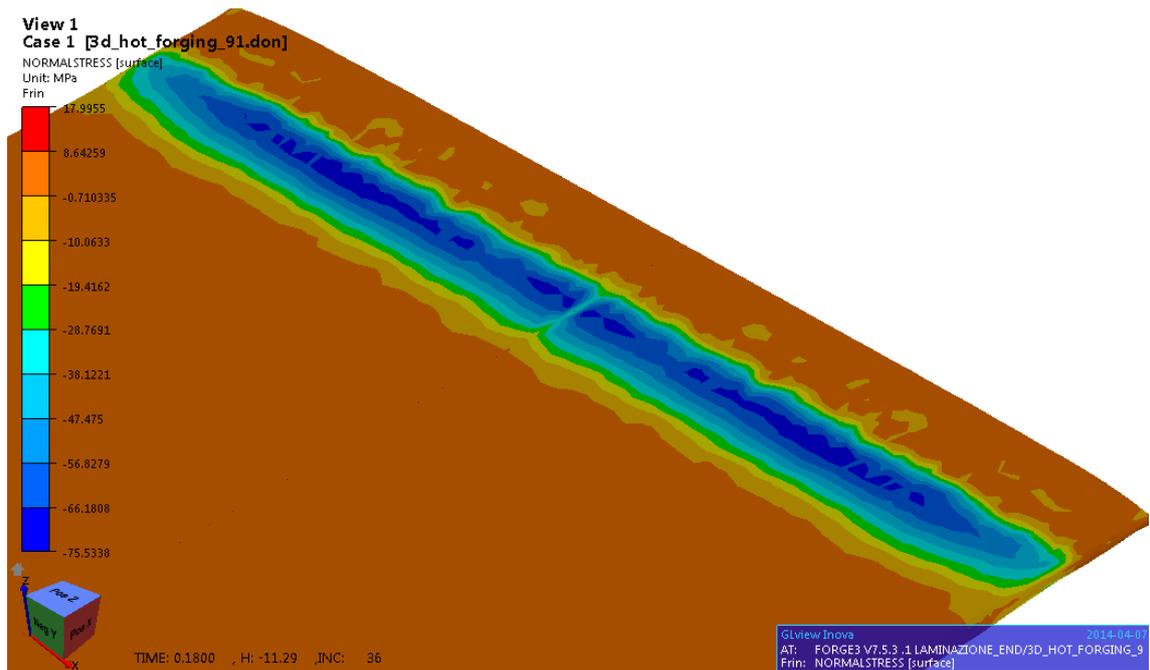


Fig. 4.10: Tensione normale alla superficie durante il processo, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

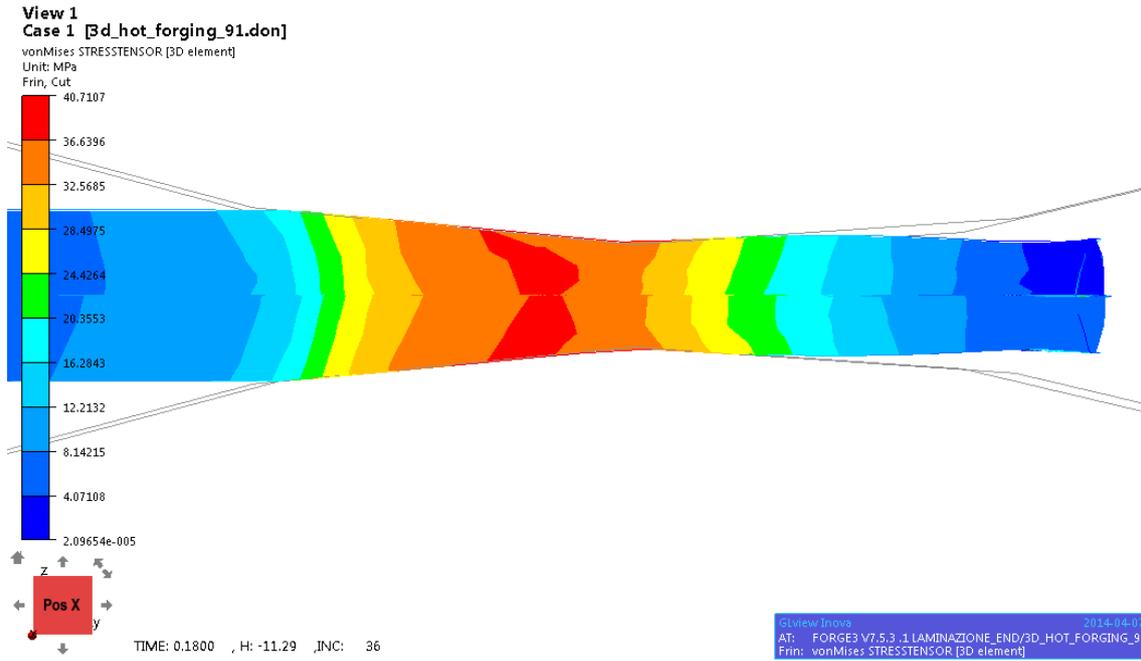


Fig. 4.11: Tensione equivalente di Von Mises durante il processo, piano yz passante per il centro del provino

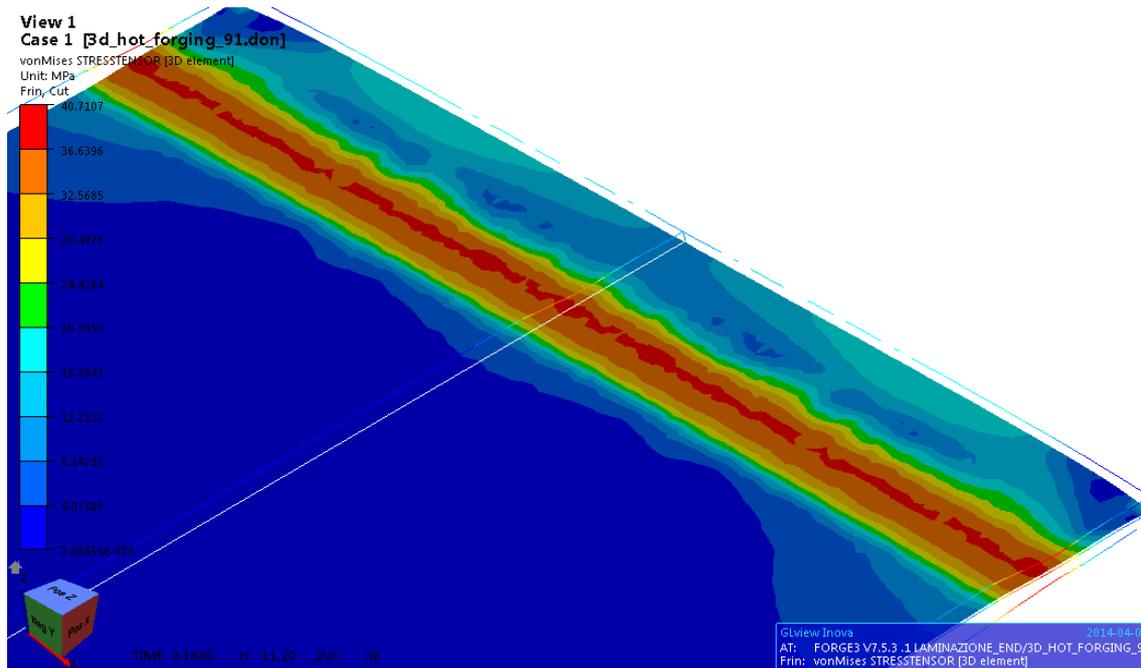


Fig. 4.12: Tensione equivalente di Von Mises durante il processo, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

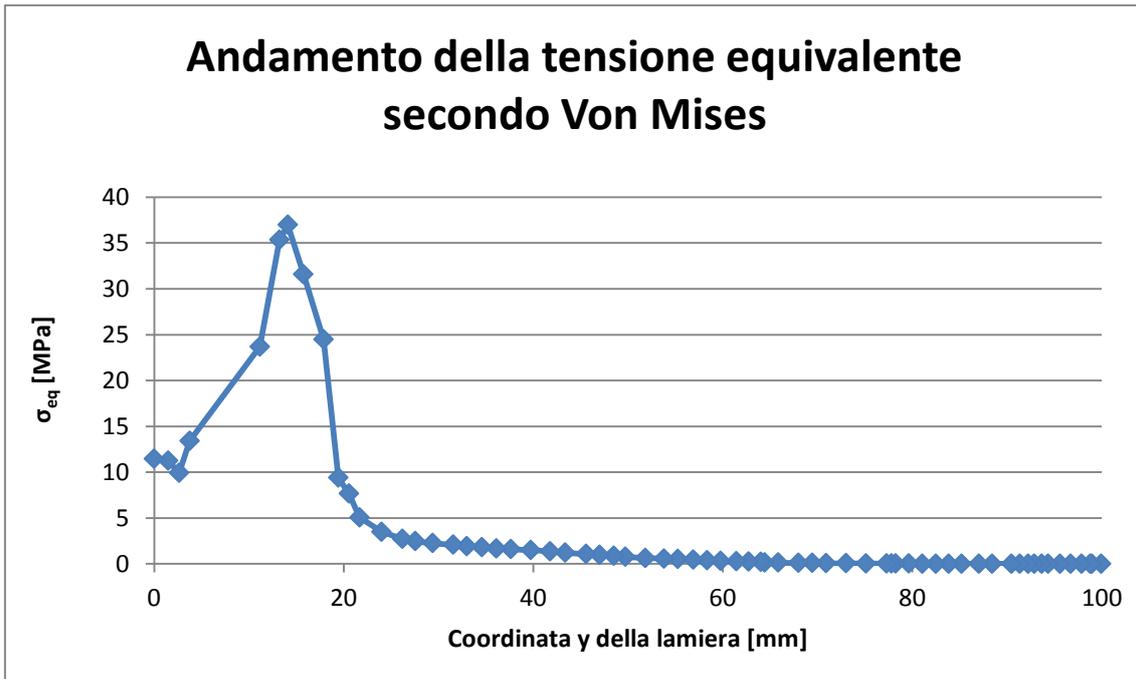


Fig. 4.13: Tensione di Von Mises rispetto al piano centrale a 0.1800 secondi dall'inizio del processo

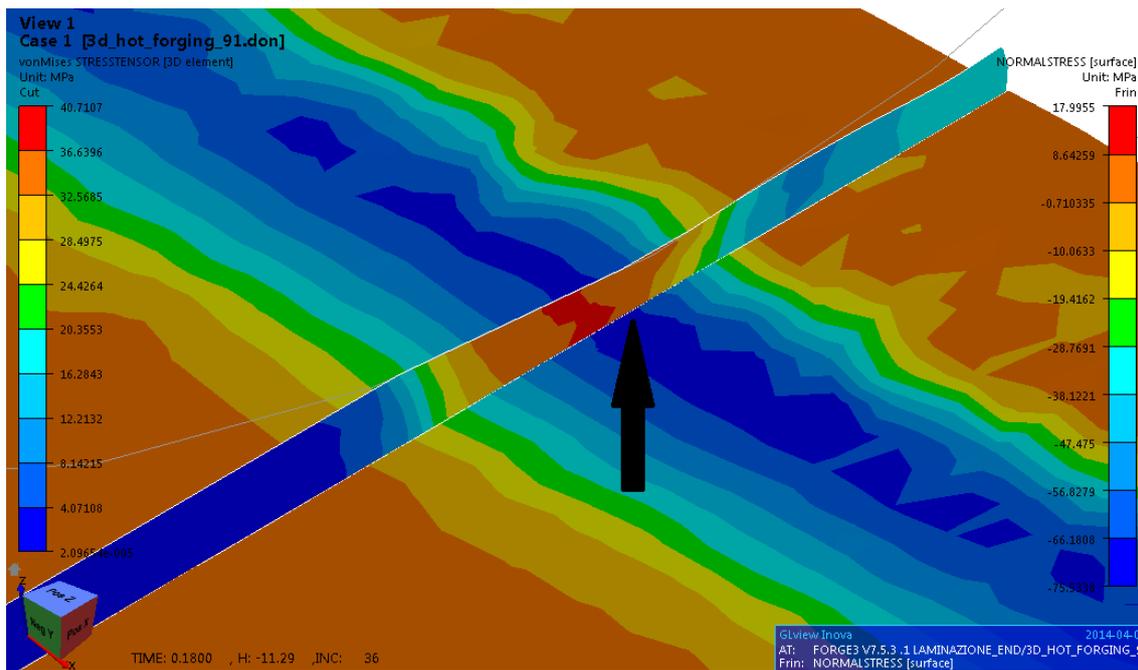


Fig. 4.14: Tensione normale alla superficie (piano y/z) e tensione equivalente secondo Von Mises (piano x/y) durante il processo. Dal grafico si può calcolare il fattore Z

Da notare come i punti in cui si ha una massima pressione non corrispondano ai punti in cui è massima la tensione equivalente, favorendo l'aumento del parametro Z.

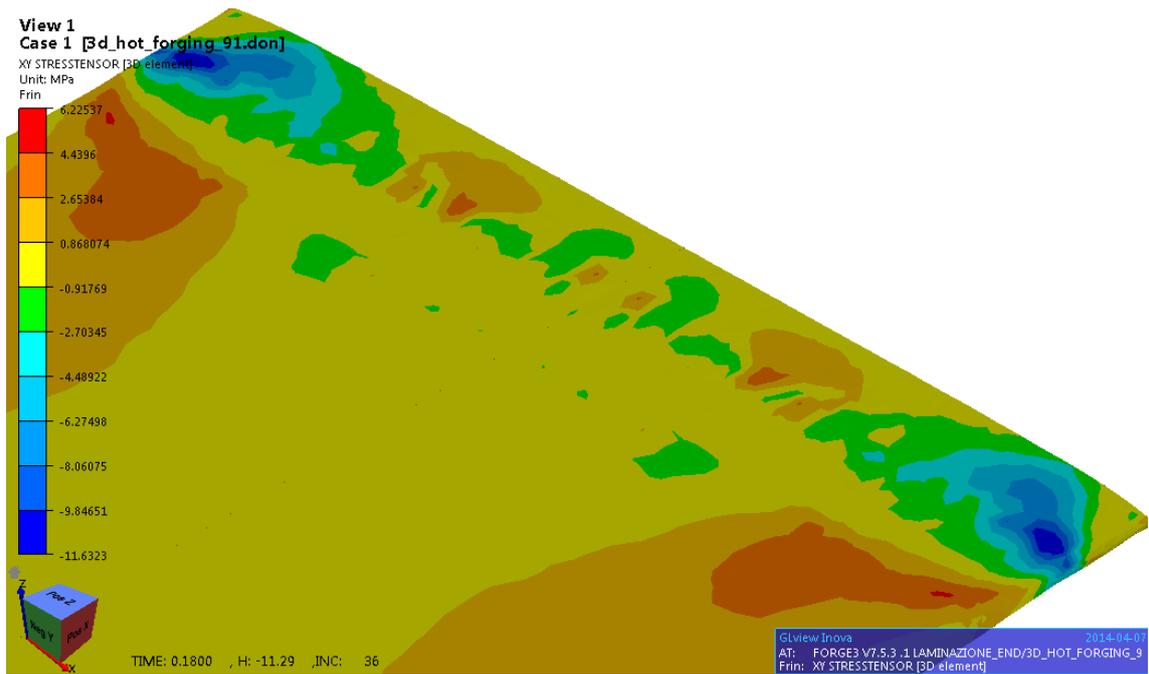


Fig. 4.15: Sforzi di taglio lungo il piano xy durante il processo, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

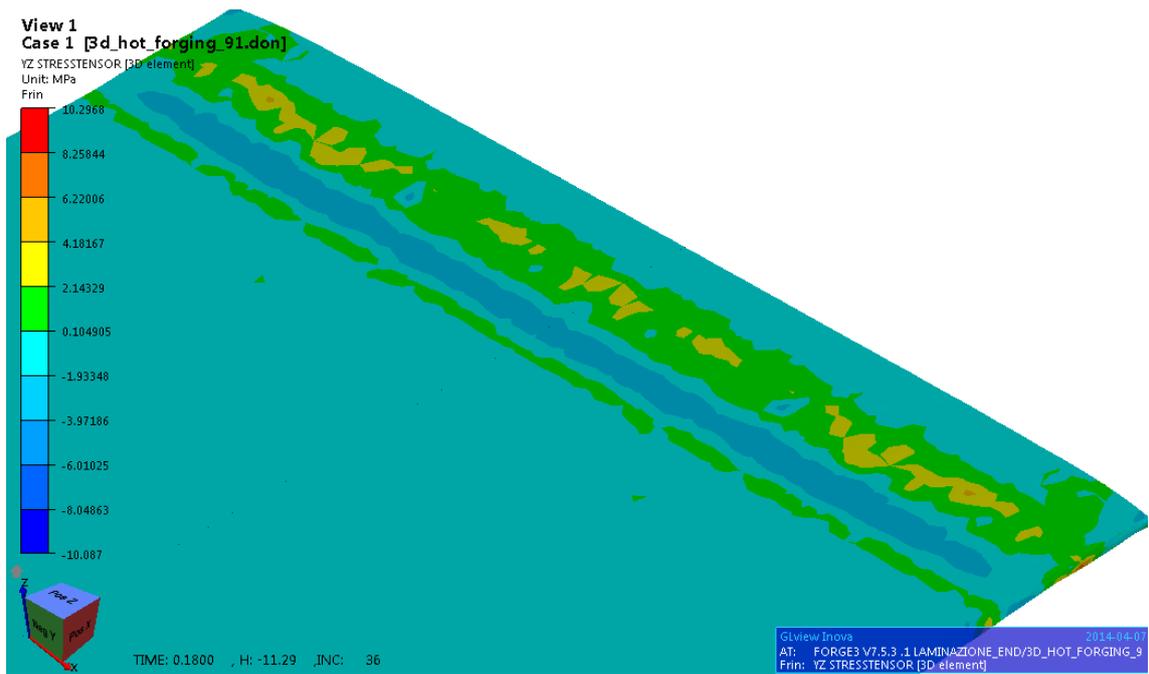


Fig. 4.16: Sforzi di taglio lungo il piano xz durante il processo, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

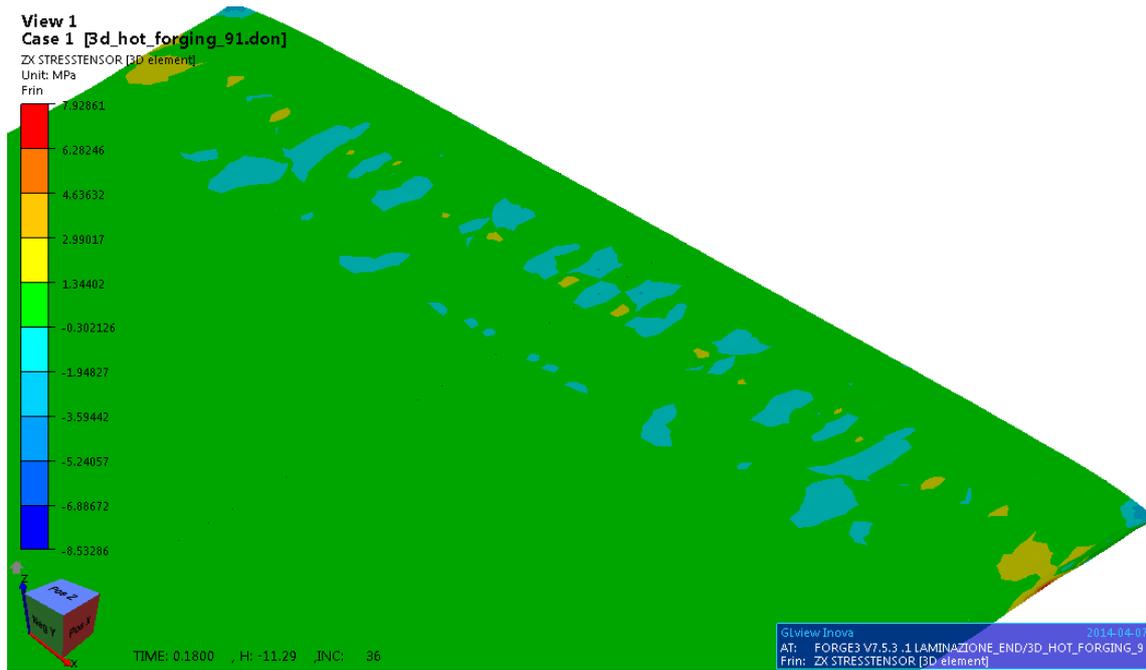


Fig. 4.17: Sforzi di taglio lungo il piano yz durante il processo, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

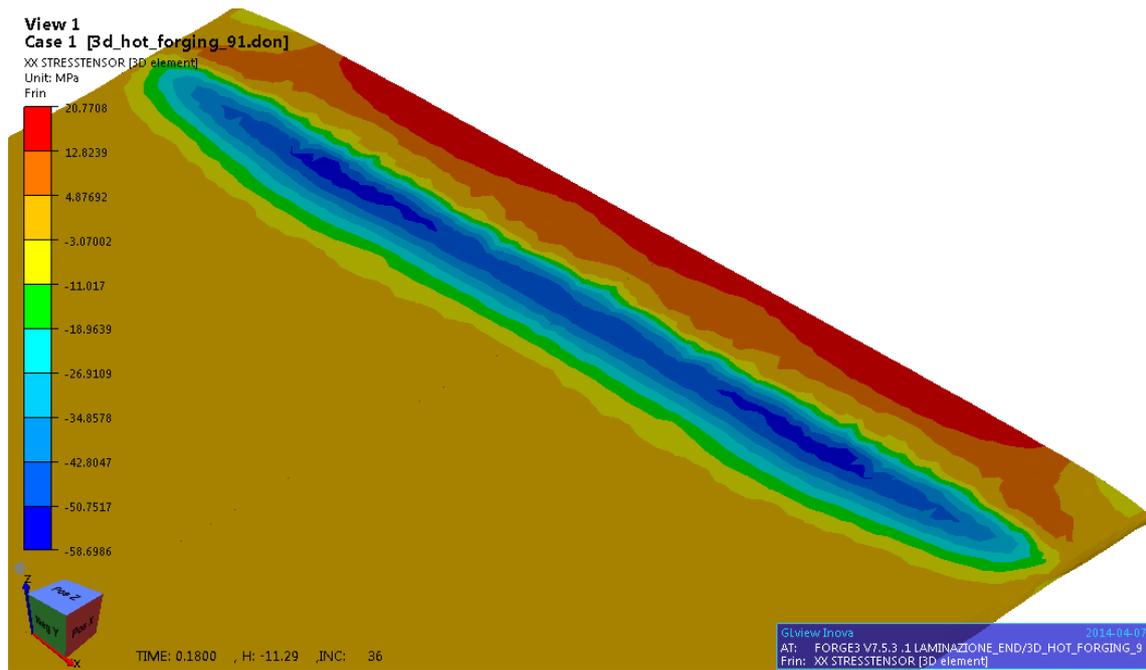


Fig. 4.18 : Tensione xx agente sull'interfaccia, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

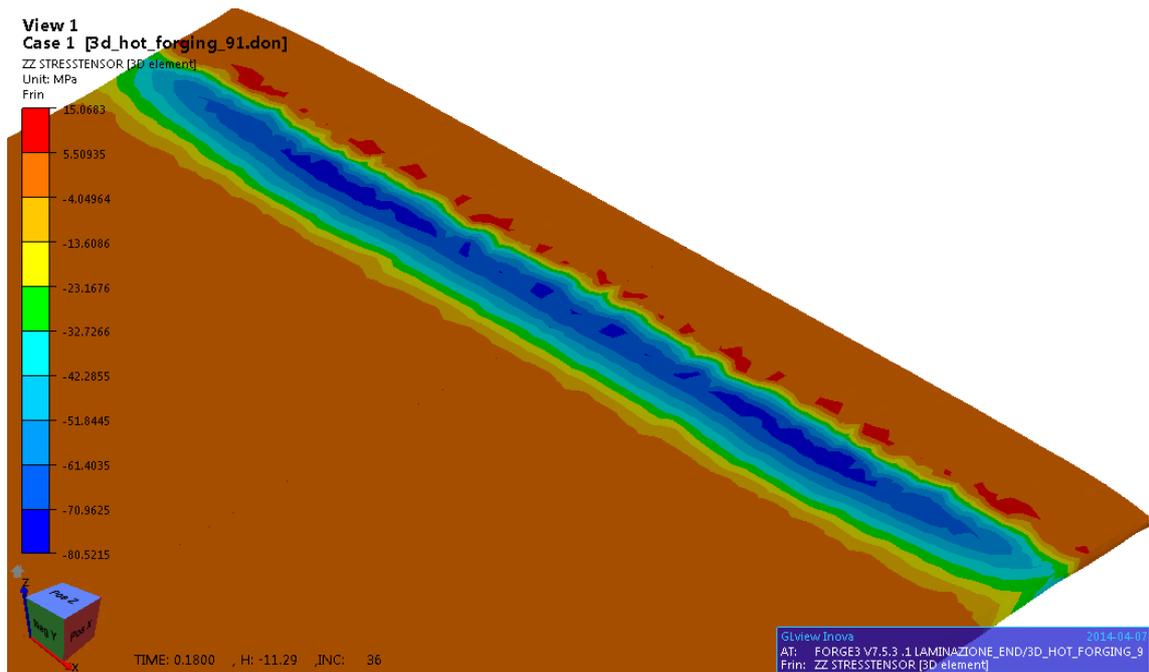


Fig. 4.19 : Tensione zz agente sull'interfaccia, piano xy passante per l'interfaccia tra le due lamiere

#### 4.4.5 CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI E DELLA VELOCITA' DI DEFORMAZIONE

Vengono presentate le deformazioni e le velocità di deformazione (4.20 e 4.21), parametro che può essere critico per la rottura delle fibre (cfr. par. 4.2).

Il software non è in grado di calcolare le singole componenti della deformazione (lungo i tre assi principali) ma restituisce il valore della deformazione totale. Nel nostro la deformazione più critica è quella lungo l'asse y, che sicuramente è la predominante rispetto a quella lungo le altre direzioni, e che quindi può essere assimilata a quella totale.

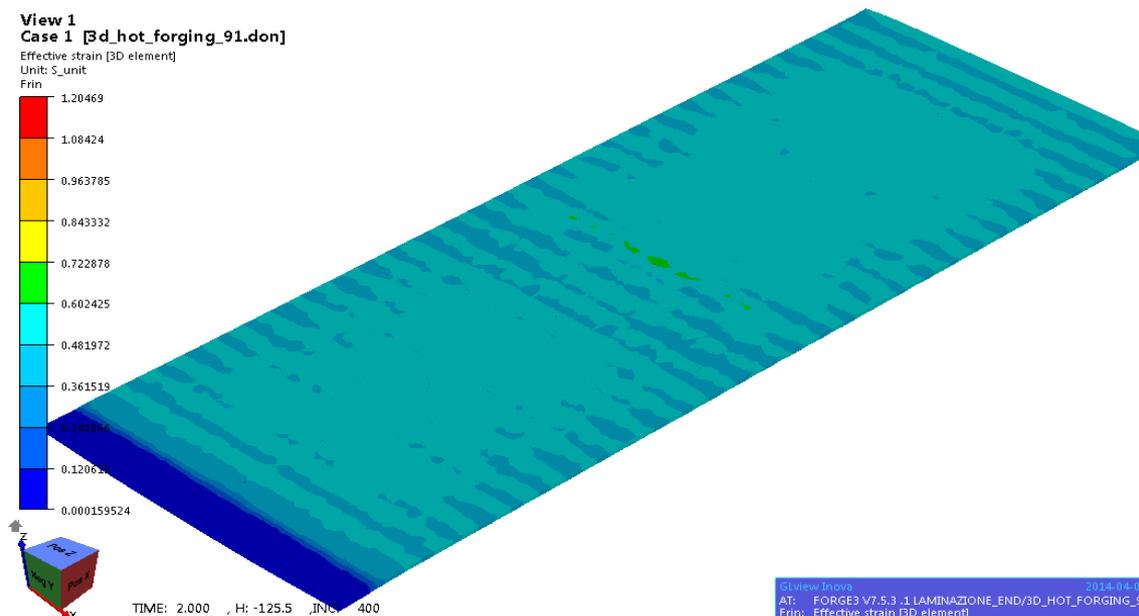


Fig 4.20: Deformazione totale agente durante il processo

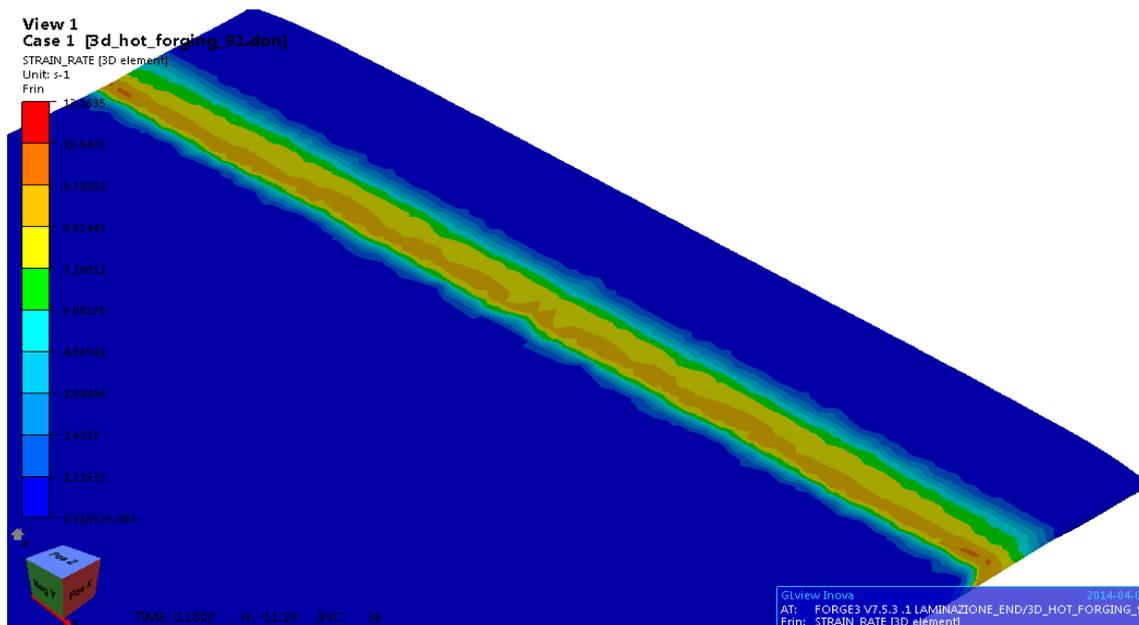


Fig. 4.21: Velocità di deformazione

#### 4.4.6 CALCOLO DELLA TEMPERATURA DI LAVORO

Il software ha anche permesso di calcolare l'andamento della temperatura durante il processo. La temperatura di immissione delle lamiere è stata posta a 450 °C in quanto, da alcune prove sperimentali, era circa la temperatura misurata dal pirometro nel momento dell'immissione dei provini che avevano subito preriscaldamenti dell'ordine di 550-600°C.

Vengono presentate due acquisizioni: una dopo 0.320 secondi dall'inizio del processo (fig. 4.22) e una dopo 1.300 secondi (fig. 4.23); in ambedue i casi si fa riferimento alla

temperatura dell'interfaccia tra i due lamierini. Viene anche presentato l'andamento della temperatura massima e di quella minima (fig. 4.24)

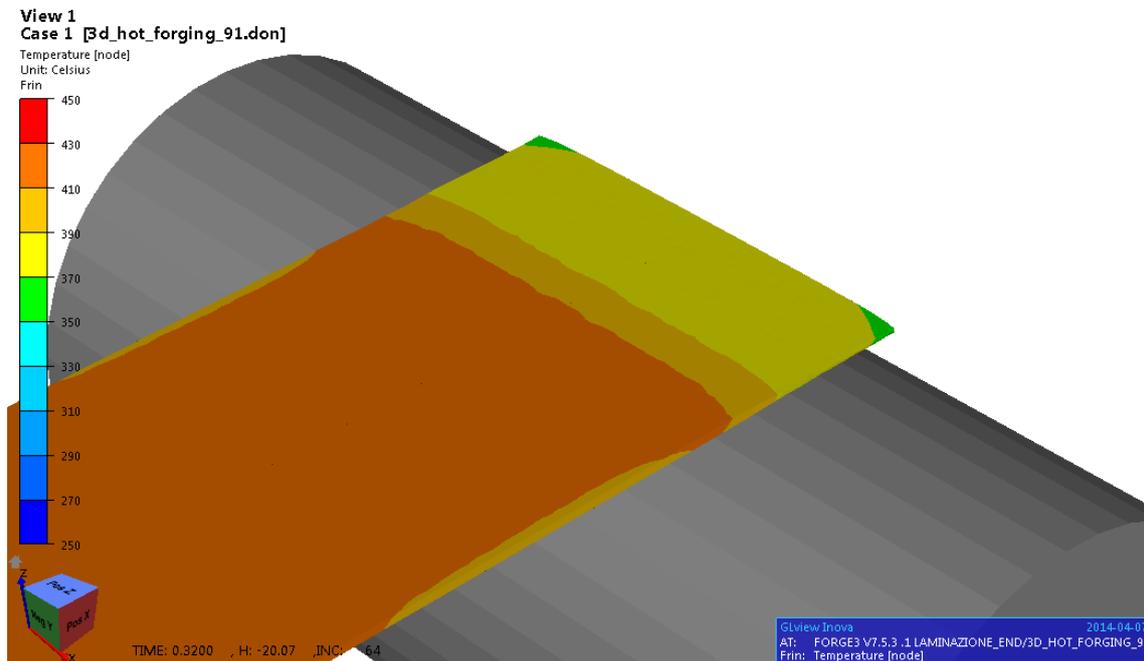


Fig. 4.22: Andamento della temperatura all'interfaccia dopo 0.320 secondi

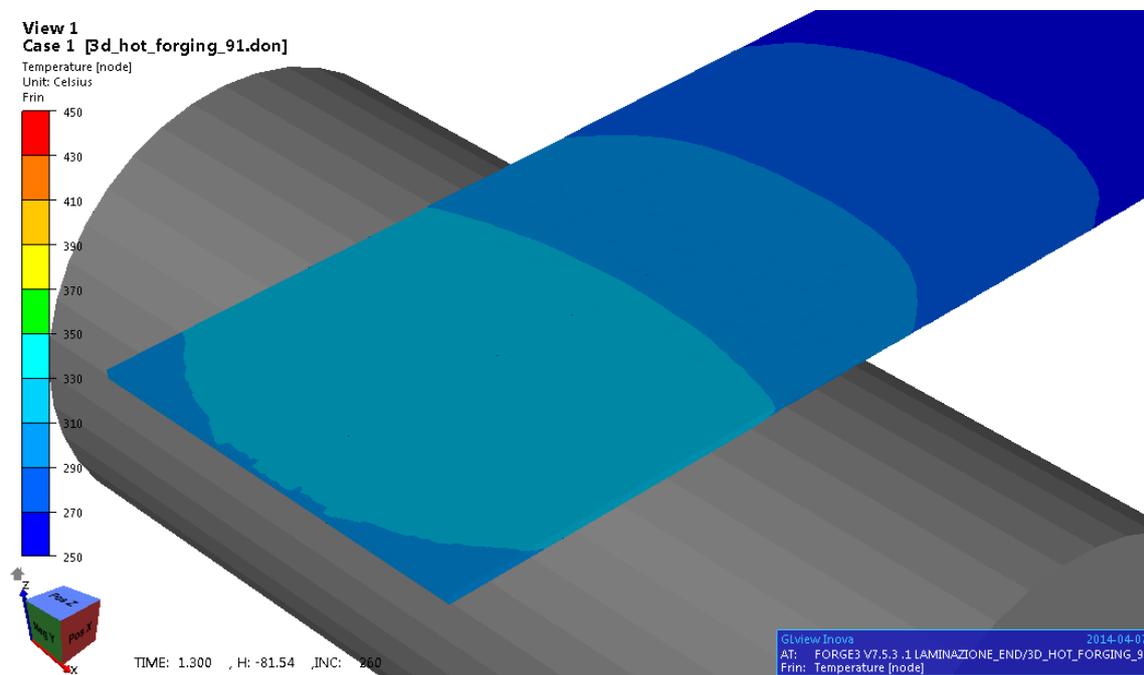


Fig. 4.23: Andamento della temperatura all'interfaccia dopo 1.300 secondi

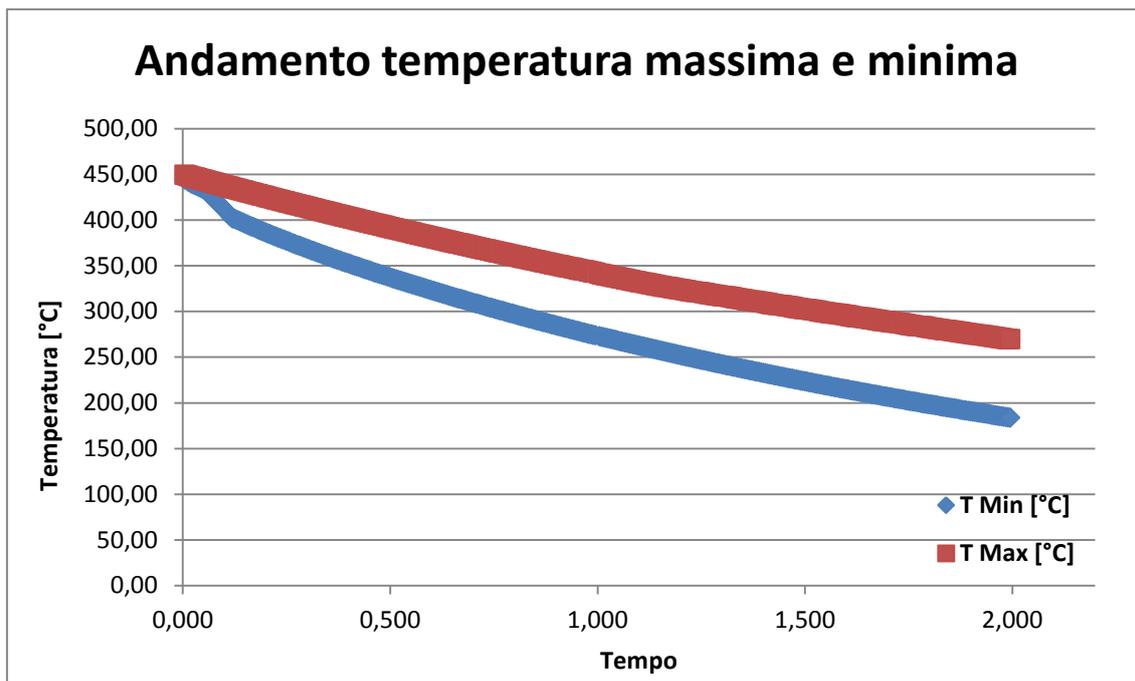


Fig. 4.24: Andamento delle temperatura massima e minima

#### 4.4.7 CONFRONTO TRA I METODI E CONCLUSIONI SULLE CRITICITA'

Confrontando i due metodi si è giunti alle seguenti conclusioni:

- Sebbene il calcolo analitico non tenga conto dell'interfaccia presente, il calcolo delle pressioni normali risulta non differire di molto (analitico 51,7 MPa, agli elementi finiti 38,1-47,5 MPa; cfr. fig. 4.9 e 4.10, e tab. A1.1). Confrontando i dati con una curva ottenuta da una prova di compressione del nostro campione (fig. 4.25) e con parametri di temperatura e velocità di deformazione simili, si nota come i dati siano attendibili.
- Si nota una differenza maggiore nel calcolo del parametro Z ed in particolare nel calcolo del  $\sigma_{eq}$ . Nel calcolo agli elementi finiti la tensione equivalente risulta maggiore di quella calcolata analiticamente, e quindi il parametro Z non viene raggiunto in maniera uniforme all'interfaccia; ciò può dipendere dalla presenza dell'attrito all'interfaccia. Esistono tuttavia dei punti in cui il rapporto raggiunge i valori di 2.5 all'uscita dei rulli (cfr. fig. 4.14, punti indicati dalla freccia) i quali potrebbero essere sufficienti alla formazione della saldatura (cfr. par. 4.1)
- Gli sforzi di taglio calcolati agli elementi finiti non si discostano in maniera elevata tra un piano e l'altro. Tuttavia, gli sforzi che risultano più critici per le fibre risultano essere le tensioni normali lungo gli assi x e z (cfr. fig. 4.18 e 4.19). Queste tensioni raggiungono valori anche di 80 MPa di compressione e potrebbero portare a rottura della fibra.
- Non si notano sostanziali differenze tra i due metodi nel calcolo delle deformazioni e delle velocità di deformazione (cfr. fig. 4.20, 4.21 e tab. A1.3 e A1.4). Questo parametro risulta critico sia per il carbonio che per il vetro ma, come anticipato, nel caso di una scarsa adesione tra matrice e rinforzo il parametro potrebbe non essere critico.

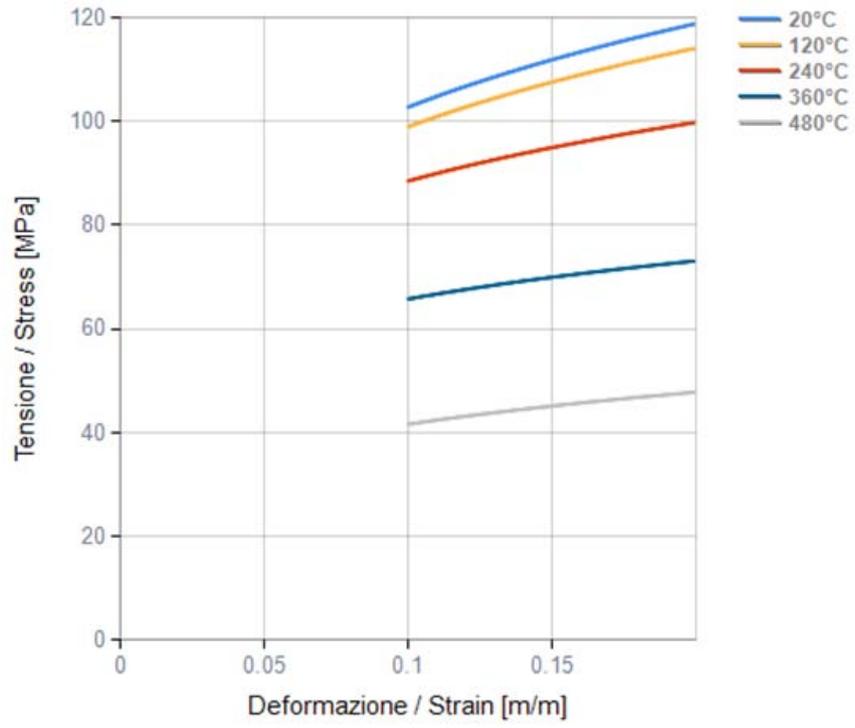


Fig. 4.25: Curve sforzo/deformazione (sopra ingegneristica, sotto reale) dell'Al 1050 per una prova di compressione ( $\dot{\epsilon}^0 = 50 \text{ 1/s}$ ) [17]

# CAPITOLO 5: CAMPAGNA PROVE

## 5.1 PARAMETRI DI PROCESSO ANALIZZATI

Durante la prima campagna prove si è deciso di verificare la dipendenza dai seguenti parametri di processo:

1. Temperatura: prima di essere laminati, i provini sono stati preriscaldati a diverse temperature per osservare la dipendenza del processo alle diverse tensioni di flusso del materiale. Le temperature considerate sono state: 450-500-550-600 °C, e le permanenze in forno di 10 minuti. Si è inoltre considerato il caso in cui i lamierini fossero racchiusi in una batteria termica costituita da 2 lamiere di acciaio dallo spessore di 2 mm per diminuire la dispersione termica tra l'uscita del forno e l'immissione nel laminatoio. Inoltre si è voluto andare ad osservare la differenza tra lavorazioni con rulli caldi o freddi, e quindi l'influenza dello shock termico subito dai provini.
2. Dipendenza dai diversi trattamenti di pulitura superficiale: sono stati analizzati diverse condizioni di pulizia dell'interfaccia dove sarebbe dovuta avvenire la saldatura. A seguito di ricerca bibliografica i trattamenti considerati sono stati:
  1. P1 = Pulizia dell'interfaccia con carta abrasiva (2 passate: prima granulometria 100, poi 400).
  2. P2 = Pulizia tramite bagno in soda caustica per 10 secondi, risciacquo in acqua deionizzata e asciugatura con aria compressa.
  3. P3 = Pulizia con macchina ad ultrasuoni in bagno di soda caustica (20 secondi), risciacquo in acqua deionizzata e asciugatura con aria compressa.
  4. Pulizia con carta abrasiva (P1) e lavaggio in soda (P2).
  5. Pulizia con carta abrasiva (P1) e bagno in ultrasuoni (P3).In seguito si è deciso di effettuare anche un trattamento atto a modificare l'interfaccia che sarebbe andata in contatto con i rulli in quanto l'attrito tra lamierino e rullo influenza in modo significativo le pressioni in gioco nel processo (cfr. Appendice A).
6. P4 = Trattamento della superficie con carta abrasiva (1 passata, granulometria 40).
3. Dipendenza dal diverso rapporto di riduzione: si sono considerate diverse riduzioni per vedere la minima alla quale avvenisse la saldatura dei provini. Essendo i nostri provini di 1 mm di spessore l'uno si è deciso di considerare le seguenti riduzioni:
  1. 40%
  2. 30%
  3. 20%In seguito si è deciso di considerare l'influenza del numero di passate sulla saldatura per diffusione, considerando un processo in 2 passate (una fino a spessore 1.5mm e la seconda fino a 1.2 mm) la quale garantisse una riduzione percentuale totale del 40%.

## 5.2 CAMPAGNA PROVE SENZA FIBRA

In seguito è presentata la prima campagna prove effettuata. Lo scopo di tale campagna era di verificare o meno la presenza di completa saldatura all'interfaccia. Tutti i lamierini utilizzati erano in Al 1050 e avevano spessore di 1 mm e dimensioni di 50 x 100 mm. Il materiale di partenza aveva subito un trattamento H24 (incrudito e parzialmente ricotto).

La procedura sperimentale utilizzata nella realizzazione di ogni singolo provino è stata la seguente:

1. Accensione del sistema di riscaldamento dei rulli e del sistema di raffreddamento, raggiungimento della temperatura target;
2. Pulizia del campione attraverso le metodologie presentate;
3. Preriscaldamento in forno (10');;
4. Laminazione;
5. Raffreddamento in aria.

Nel caso di un processo con più passate, la procedura è stata la seguente:

1. Accensione del sistema di riscaldamento dei rulli e del sistema di raffreddamento, raggiungimento della temperatura target;
2. Pulizia del campione attraverso le metodologie presentate;
3. Preriscaldamento in forno (10');;
4. Prima laminazione;
5. Nuovo riscaldamento in forno (5');;
6. Seconda laminazione;
7. Raffreddamento in aria.

Il tempo trascorso dall'uscita dal forno di preriscaldamento all'immissione nel laminatoio è sempre stata di circa 2 secondi.

N° Provino	Trattamento	T forno [°C]	N° passate riduz.	H finale [mm]	T rulli [°C]	Batteria
1	P1	450	1	1,2	230	no
2	P1	450	2	1,5---1,2	230	no
3	P1	500	1	1,2	230	no
4	P1	500	2	1,5---1,2	230	no
5	P1	550	1	1,2	230	no
6	P1	550	2	1,5---1,2	230	no
7	P1	600	1	1,2	230	no
8	P1	600	2	1,5---1,2	230	no
9	P1	600	1	1,2	230	si
10	P2	450	1	1,2	230	no
11	P1+P2	450	1	1,2	230	no
12	P2	500	1	1,2	230	no
13	P1+P2	500	1	1,2	230	no
14	P2	550	1	1,2	230	no
15	P1+P2	550	1	1,2	230	no
16	P2	600	1	1,2	230	no

17	P1+P2	600	1	1,2	230	no
18	P1	600	1	1,2	20	no
19	P3	450	1	1,2	230	no
20	P1+P3	450	1	1,2	230	no
21	P3	500	1	1,2	230	no
22	P1+P3	500	1	1,2	230	no
23	P3	550	1	1,2	230	no
24	P1+P3	550	1	1,2	230	no
25	P3	600	1	1,2	230	no
26	P1+P3	600	1	1,2	230	no
27	P1+P3	600	1	1,4	230	no
28	P1+P3	600	1	1,6	230	no
29	P1	600	1	1,4	230	no
30	P1	600	1	1,6	230	no
31	P1	600	1	1,8	230	no
32	P4	600	1	1,4	230	no
33	P4	600	1	1,6	230	no
34	P4	600	1	1,8	230	no

Tab. 5.1: Prima campagna prove

I trattamenti utilizzati sono quelli specificati nel paragrafo precedente.

Si è scelto di misurare la temperatura del rullo superiore, essendo quello più caldo. Il pirometro era comunque puntato a 2.5 centimetri dal centro del rullo in quanto la lavorazione ha richiesto di utilizzare un distaccante sui rulli, in quanto i provini tendevano a saldarvisi (fig. 5.1). Avendo notato che il pirometro leggeva con un grande disturbo sulla superficie trattata con il distaccante, si è deciso di misurare la temperatura appunto a 2.5 cm dal centro.



Fig. 5.1: Adesione tra rulli e provini durante il processo

Con il termine batterie si vuole indicare se fosse presente o no la batteria termica descritta nel paragrafo precedente (no = non utilizzata, si = utilizzata).

I provini 28, 31 e 34 non solo non sono arrivati a saldatura, ma neanche ad adesione (riduzione del 20%), e quindi non verranno più considerati.

### 5.3 ANALISI MICROSTRUTTURALE E VERIFICA SALDATURA

E' stata effettuata un analisi microstrutturale utilizzando in primis il microscopio elettronico (fig. 5.2 e 5.3) e andando a vedere a quanti ingrandimenti fosse possibile vedere distintamente le due facce dei provini, sintomo di una non corretta saldatura. Per la prima analisi sono stati presi in considerazione dei provini significativi (1,2,3,26,27), ossia provini in cui ci si aspettava una avvenuta saldatura e provini in cui ci si aspettava solamente una forte adesione.

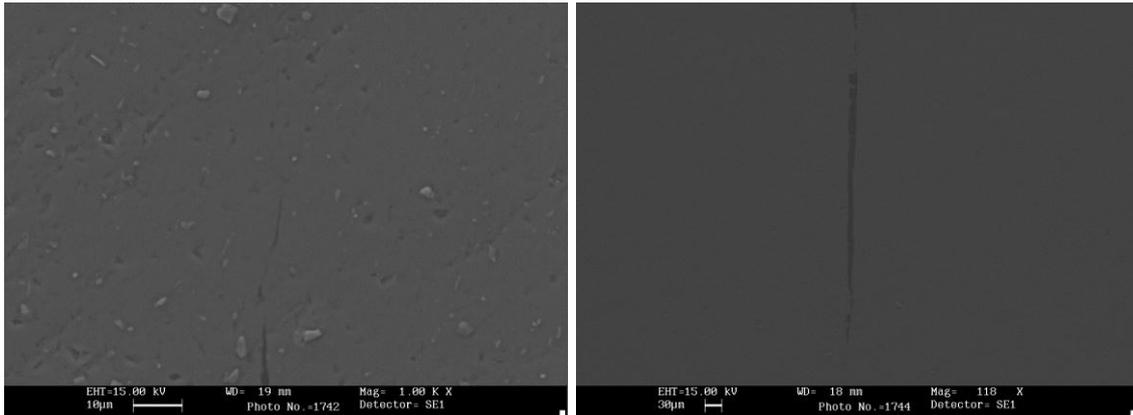


Fig. 5.2 e 5.3: Micrografia a microscopio elettronico del provino 1 (sinistra, 3000 x) e del provino 27 (destra 360 x)

Durante l'analisi, si è deciso di seguire l'interfaccia dei lamierini dalla parte più esterna (dove era sempre visibile in quanto i lamierini non sono perfettamente sovrapposti, fig. 5.4) e di vedere se scompariva o meno muovendosi verso il centro del provino.

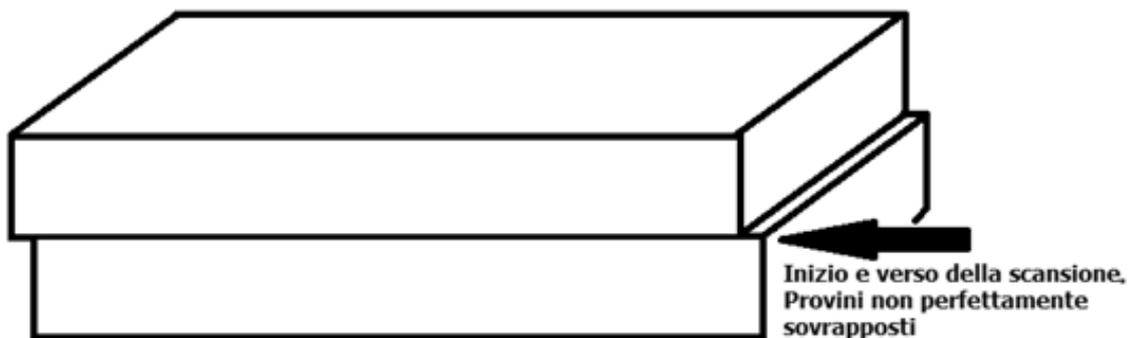


Fig. 5.4: Schematizzazione dell'analisi microstrutturale

In particolare, il provino 1 mostra come, sebbene ad un alto ingrandimento, l'interfaccia tenda a sparire. Viceversa il provino 27 mostra come anche ad un basso ingrandimento le interfacce siano visibili, e quindi si può concludere che la saldatura non è avvenuta. Considerando gli ingrandimenti a cui l'interfaccia risulta visibile, si è deciso di effettuare le altre analisi al microscopio ottico.

Passando al microscopio ottico si è potuto verificare l'effettivo peso dei parametri analizzati. Tutte le micrografie sono state effettuate senza attacco chimico (in quanto era di interesse solo verificare o meno la presenza dell'interfaccia tra i provini). Innanzitutto

è stato tagliato un pezzo di ogni provino (circa 10 x 20 mm) nella parte sua parte iniziale, la quale risultava la più calda durante il processo, il quale è stato inglobato in una resina polimerica per renderne facile la lucidatura e per renderlo maneggevole. Per la lucidatura è stata utilizzata carta vetrata (granulometria 180, 320, 500, 800, 1200, 4000), polvere di diamante (3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ ) e silica (0.2  $\mu\text{m}$ ). In particolare la lappatura finale con polvere di diamante è risultata alquanto difficoltosa: la polvere molto dura creava degli strisci sui lamierini, molto più duttili. In alcuni casi si è anche formato il cosiddetto “effetto meteora”, ossia la presenza di solchi nel provino dovuti dalla polvere di diamante che prima si piantava nel lamierino stesso e poi veniva strappata via.

### 5.3.1 ANALISI AL MICROSCOPIO OTTICO SENZA ATTACCO CHIMICO

Inizialmente i provini non sono stati attaccati chimicamente cercando quindi di non evidenziare i bordi grano ma di osservare l’interfaccia a livello macroscopico. Per evidenziare l’interfaccia dei lamierini si è deciso di applicare un filtro Sobel alle micrografie (Appendice 2).

Vengono presentate solo alcune microstrutture a titolo di esempio (da fig. 5.5 a 5.11) in quanto, come si verrà spiegato nel paragrafo successivo, l’attacco chimico sarà fondamentale per evidenziare la presenza o meno della saldatura.

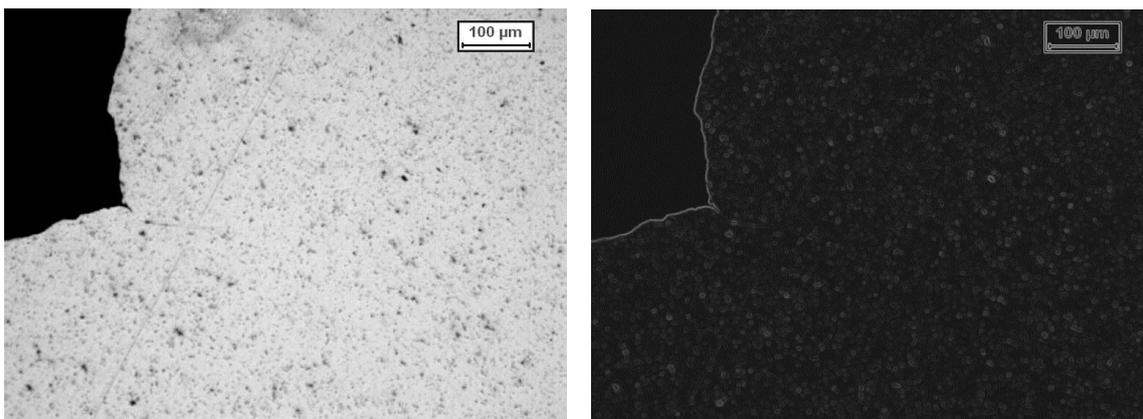


Fig. 5.5 e 5.6: Micrografia del provino 2 senza attacco chimico (a destra applicato il filtro Sobel)

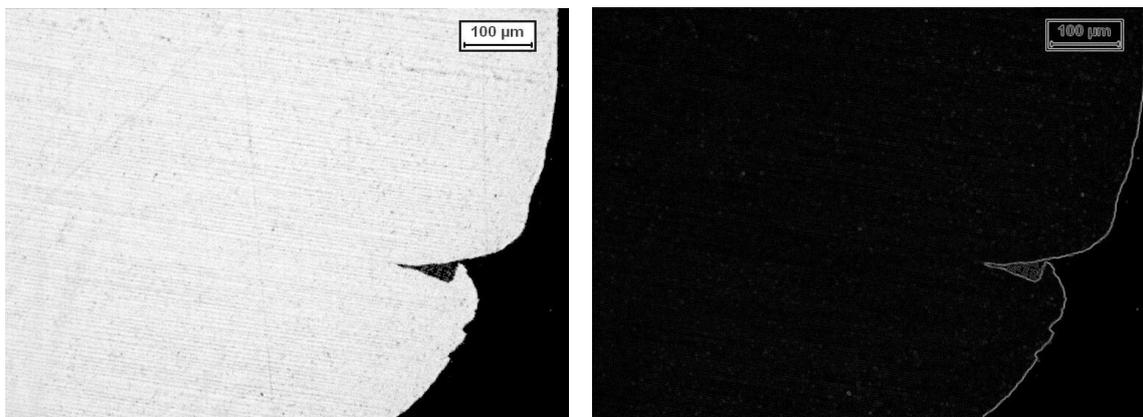


Fig. 5.7 e 5.8: Micrografia del provino 19 senza attacco chimico (a destra applicato il filtro Sobel)

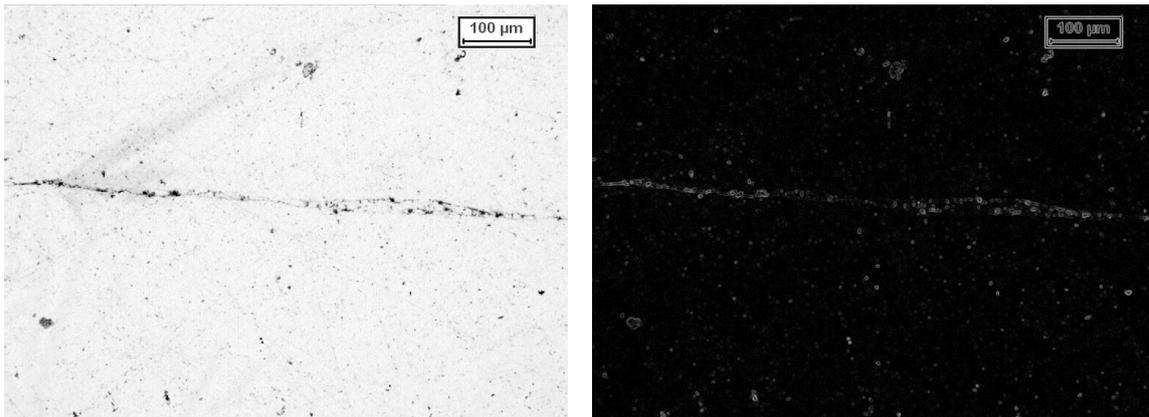


Fig. 5.8 e 5.9: Micrografia del provino 27 senza attacco chimico (a destra applicato il filtro Sobel)

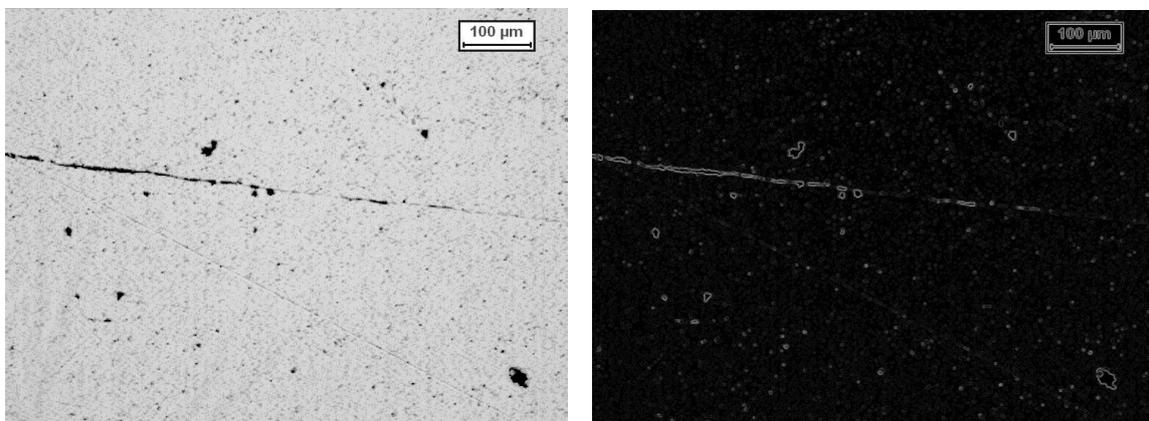


Fig 5.10 e 5.11: Micrografia del provino 30 senza attacco chimico (a destra applicato il filtro Sobel)

Provini che presentano una netta interfaccia: 2, 8, 18, 27, 29, 30, 33

Provini che non presentano una netta interfaccia: 1, 3, 7, 9, 10, 11, 16, 17, 19, 20, 25, 32

Da queste prime analisi:

- Non si nota una differenza tra le diverse temperature utilizzate, ciò può essere legato al fatto che la tensione dell'alluminio oltre i 450°C risulta già notevolmente bassa, e non diminuisce in maniera significativa con l'aumentare della temperatura. Inoltre non si nota una differenza tra l'utilizzo o meno della batteria termica, una volta che i rulli sono caldi. Da sottolineare il fatto che con i rulli freddi e in assenza della batteria l'interfaccia risulta visibile, contrariamente alle stesse lavorazioni ma con rulli caldi.
- Non si nota una sostanziale differenza tra le pulizie utilizzate.
- I provini che hanno subito una lavorazione con più passate risultano non saldati, contrariamente agli stessi provini che hanno subito una stessa deformazione finale in una passata. Ciò può essere spiegato con il fatto che il fattore  $P/\sigma_{eq}$  (cfr. Appendice 1) non raggiunge mai il valore che porta a saldatura, essendo la riduzione suddivisa in più parti. Inoltre, la riduzione del 40% sembra sufficiente a saldare i provini. Gli unici provini in cui non è visibile l'interfaccia, ma con una riduzione del 30% risultano essere quelli che hanno subito il trattamento P4, sintomo che l'attrito svolge un ruolo importante nel processo.

Come spiegato nei paragrafi successivi, tali considerazioni possono essere utilizzate solo per ipotizzare la qualità della saldatura avvenuta tra le lamiere; la saldatura può ritenersi completamente avvenuta se la ricristallizzazione dei grani ha interessato la zona tra le interfacce.

### 5.3.2 SCELTA DELL'ATTACCO CHIMICO

Si è scelto di effettuare un attacco chimico ai provini selezionati, per evidenziare i bordi grani dell'alluminio, ed andare a verificare se durante la lavorazione, i grani siano cresciuti a cavallo dell'interfaccia, rendendo effettiva la saldatura.

La scelta dell'attacco chimico da effettuare sull'alluminio è stata frutto di ricerca bibliografica (fig. 5.12 e 5.13), a seguito della quale si è deciso di effettuare un bagno in NaOH (12g su 100 ml di acqua) a 60°C per un minuto seguito da un bagno in HF (3 gocce su 100 ml di acqua) per un minuto e mezzo.

Etchants Aluminum		
Solution	Concentration	Specific Use
Hydrofluoric Acid	HF (conc) 0.5 ml	General Multi purpose etch for Aluminium
	H <sub>2</sub> O 99.5 ml	
General Etchant for Al	2 ml HF	This is one of the most useful reagents for etching Al
	25 ml HNO <sub>3</sub>	
	73 ml H <sub>2</sub> O	
Sulphuric Acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 20 ml	For separating (AL - Cu - Fe- Mn) from (Al - Fe - Mn) or (Al - Cu - Fe)
	H <sub>2</sub> O 80 ml	
Keller's Reagent	95 ml H <sub>2</sub> O	Good general purpose etchant for Al & AL alloys, except for high Si alloys. Outlines all common constituents, reveals grain structure in certain alloys when used by immersion.
	2.5 ml HNO <sub>3</sub>	
	1.5 ml HCL	
	1.0 ml HF	
Graffs & Sargents	84 ml H <sub>2</sub> O	For grain size of 2XXX, 3XXX, 6XXX, and 7XXX wrought alloys.
	15.5 ml HNO <sub>3</sub>	
	0.5 ml HF	
	3 g CrO <sub>3</sub>	
Poulant's Reagent	12 parts HCL	For Aluminum Alloys, use polarized light
	6 parts HNO <sub>3</sub>	
	1 part HF	
	1 part H <sub>2</sub> O	
Modified Poulant's Reagent	50 ml	Very good Macroetchant, must over etch (4L02)
	12 parts HCL,	
	6 parts HNO <sub>3</sub> ,	
	1 part HF,	
	1 part H <sub>2</sub> O	
Tucker's Reagent	25 ml HNO <sub>3</sub>	For Aluminum revealing crystallized structure
	12 g Chromic Acid 40 ml	
	H <sub>2</sub> O	
	H <sub>2</sub> O	

Fig. 5.12: Attacchi chimici per l'alluminio

**Table 1. CHEMICAL ETCHING REAGENTS FOR ALUMINUM AND ITS ALLOYS – (Cont.)**

Etching Reagent	Composition	Remarks	Use	
No. 14. Mixed acids in alcohol <sup>3</sup>	HF HNO <sub>3</sub> HCl Methanol	2 ml 50 ml 32 ml 50 ml	Immerse 10-30 sec. Temp prior to mixing is critical. Cool ingredients to 0°C and mix slowly. Keep below 10°C	Etch pits
No. 15. Wasserman's reagent	Equal parts of: HF and HCl HNO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (10% solution)	2 ml 20 ml 50 ml	Etch by inspection	For Al-Zn alloys. Results similar to 0.5% HF but should not stain
No. 16. Sodium hydroxide	NaOH H <sub>2</sub> O	10-20 gm 80-90 ml	Immerse in boiling solution 5-20 sec followed by HNO <sub>3</sub> rinse.	For grain size. Add 0.5% sodium silicate for Al-Mg
No. 17. Sodium hydroxide-sodium carbonate	NaOH Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	2 gm 4 gm 94 ml	Immerse for 60 sec at room temp	For grain size of pure Al
No. 18. Mixed acids and glycerine	HF HNO <sub>3</sub> Glycerine H <sub>2</sub> O	10 ml 10 ml 60 ml 20 ml	Heat specimen in boiling water then immerse 5 sec in reagent	For grain size of pure Al

Fig 5.13: Attacchi chimici per l'alluminio

### 5.3.3 ANALISI AL MICROSCOPIO OTTICO CON ATTACCO CHIMICO

Viene inizialmente presentata la micrografia del materiale base (fig. 5.14 e 5.15), ossia senza aver subito lavorazione, dalla quale sono ben visibili dei grani allungati, sintomo della laminazione che hanno subito durante la formazione della lamiera d'origine.

Durante queste analisi è stato anche possibile misurare lo spazio presente fra le interfacce dei lamierini.

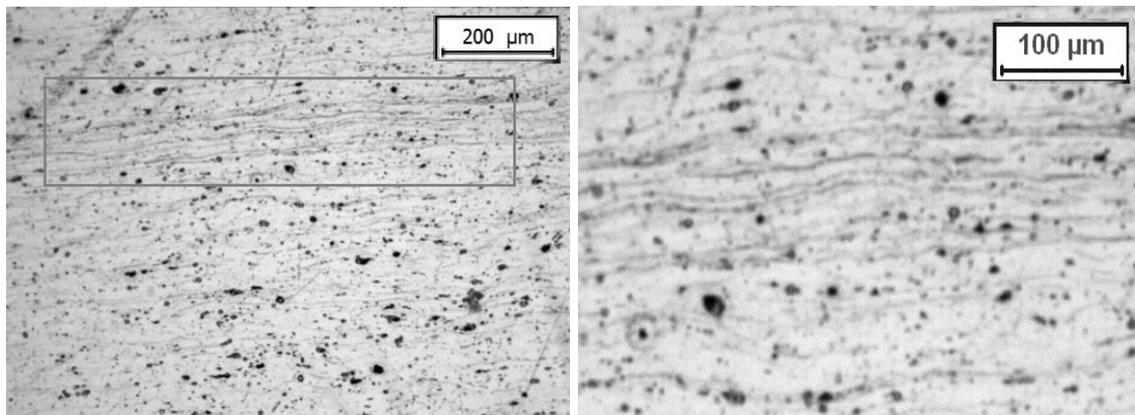


Fig. 5.14 e 5.15: Micrografia con attacco chimico del materiale base e zoom a destra

Vengono quindi presentate le micrografie con attacco chimico effettuate sui medesimi campioni analizzati precedentemente (fig. da 5.16 a 5.25). Da sottolineare che l'utilizzo di un attacco chimico indebolisce tutti i punti di discontinuità presenti e quindi rende visibili sia i bordi grano, dove sono presenti i principali precipitati, sia l'interfaccia tra le lamiere, dove presente.

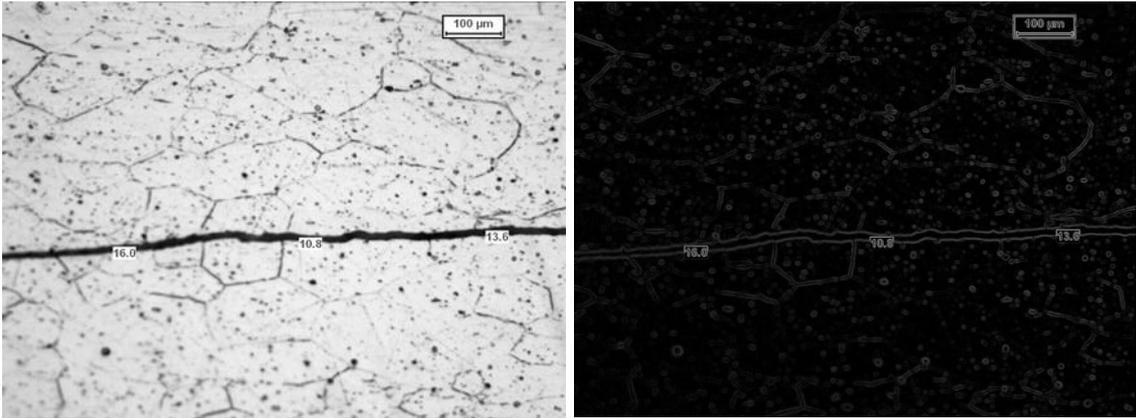


Fig. 5.16 e 5.17: Micrografia con attacco chimico del provino 7

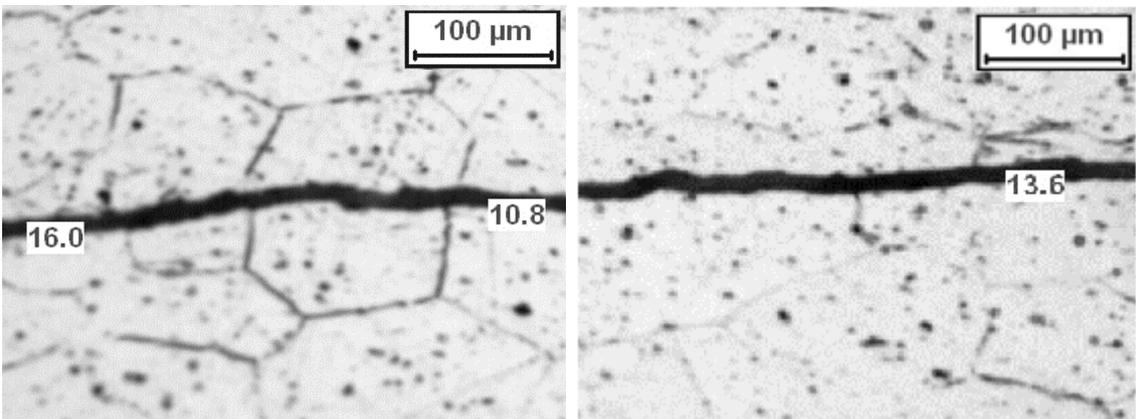


Fig. 5.18 e 5.19: Micrografia con attacco chimico del provino 7 (zoom)

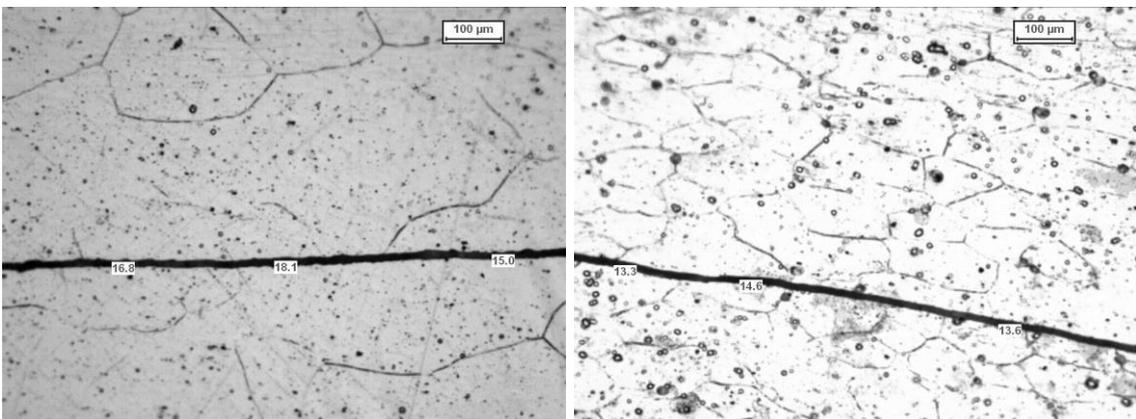


Fig. 5.20 e 5.21: Micrografie con attacco chimico del provino 8 (sinistra) e 16 (destra)

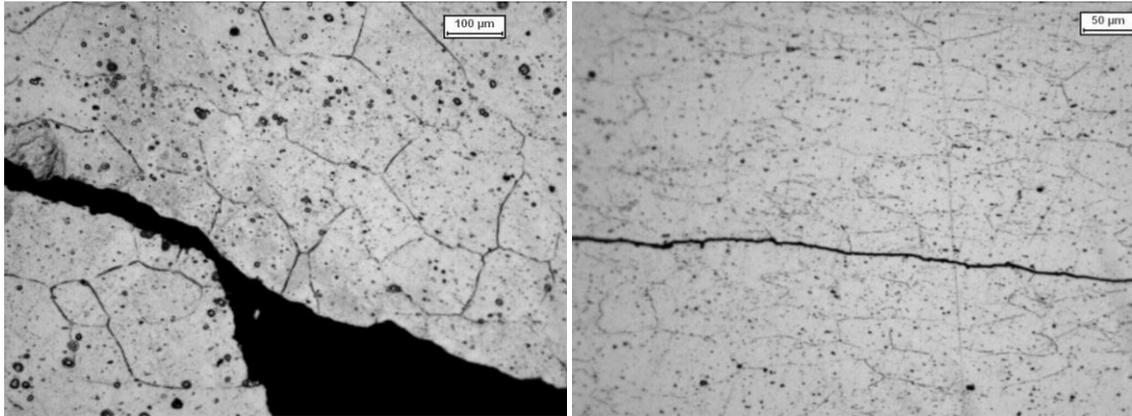


Fig. 5.22 e 5.23: Micrografie con attacco chimico del provino 18 (sinistra) e 26 (destra)

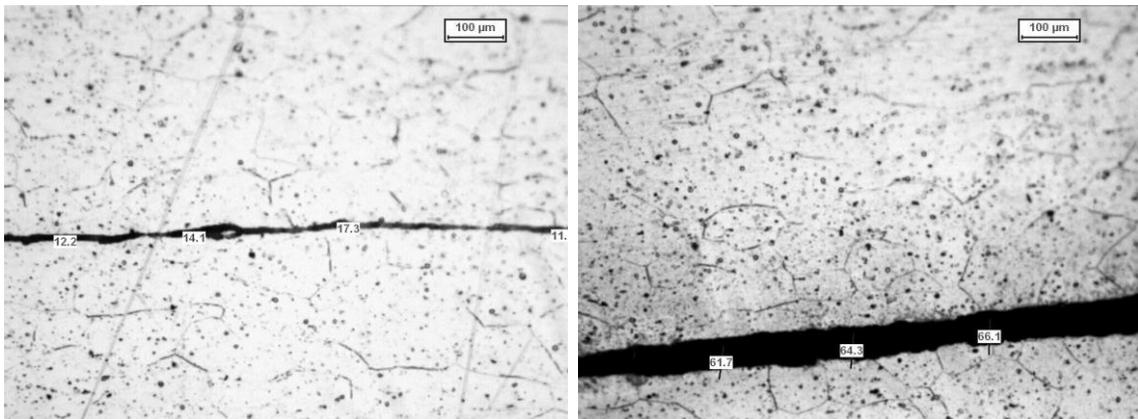


Fig 5.24 e 5.25: Micrografie con attacco chimico del provino 29 (sinistra) e 30 (destra)

## 5.4 CONCLUSIONI SULLA SALDATURA

Da queste analisi si conclude che la saldatura dei provini può considerarsi avvenuta, ma non è presente ricristallizzazione all'interfaccia, dove invece è presente una netta linea di saldatura che, essendo una zona debole del materiale, viene evidenziata dall'attacco chimico. Da sottolineare una differenza tra i provini che presentavano una netta interfaccia, anche senza effettuare attacco chimico, e quelli che la presentano solo dopo l'attacco: nel primo caso la distanza tra le interfacce è risultata di circa 60 µm, mentre nel secondo caso non si è mai andati oltre i 20 µm (cfr. fig. 5.18 e 5.19). Si può quindi concludere che sebbene la saldatura non sia avvenuta come ci si aspettava, le micrografie presentate possono dare un'idea sulla qualità dell'adesione formatasi e dell'ordine di quanto ci si è avvicinati all'ottenere il processo cercato.

La mancata ricristallizzazione può essere dovuta da due cause principali:

1. Temperatura di processo troppo bassa: durante la lavorazione la lamiera ha subito un raffreddamento troppo elevato a causa del contatto con l'aria e con i rulli. Tale effetto non può essere evitato con il sistema presentato.
2. Riduzione troppo bassa: la riduzione e quindi le tensioni in gioco sono troppo basse. Considerando che una riduzione maggiore comporterebbe anche sforzi di taglio e deformazioni maggiori, parametri critici per le fibre, si è deciso di non aumentarla

Come verrà presentato in seguito (cfr. par. 5.6 e 5.8) in alcuni punti la saldatura risulterà completa e la linea di saldatura non visibile, segno che le simulazioni effettuate sono in parte attendibili.

## 5.5 CMAPAGNA PROVE CON LA FIBRA: INGLOBAMENTO DELLA FIBRA

Le fibre utilizzate sono di 2 tipi: fibra di carbonio HS e fibra di vetro tipo S.

Sono state disposte all'interno dei provini in due modi: parallele alla direzione di laminazione o ortogonali ad essa (fig. 5.26 e 5.27).

In particolare per le fibre disposte in modo parallelo, sono stati tagliati 3 o 6 roving di filo della lunghezza di circa 8 cm, con l'attenzione di fare in modo che le fibre non uscissero dalle proiezioni del provino, per evitare l'insorgere di cricche.

Per quelle disposte lungo la direzione ortogonale, sono stati tagliati 4 roving di filo della lunghezza di 4 cm circa, sempre con l'accuratezza di evitare l'insorgere di fenomeni di taglio.

Tutte le fibre hanno subito un trattamento di ossidazione in forno a 600°C per 10 minuti.

Dalle conclusioni precedenti, si è deciso di effettuare tutte le prove con preriscaldamenti di 600°C e di valutare solo i trattamenti di pulizia P1 e P4. Tutte le laminazioni sono avvenute con una passata.

Sono stati inoltre laminati alcuni provini senza fibra per calcolare la resistenza del materiale base. Infine si è verificata anche la resistenza a trazione per un lamierino che non avesse subito alcun trattamento.



Fig. 5.26 e 5.27: Disposizione delle fibre all'interno dei provini (sinistra: carbonio con direzione parallela; destra: vetro con direzione ortogonale)

E' stato inoltre possibile creare 2 provini con la stessa configurazione di quelli in figura 5.26 i quali però sono stati laminati lungo il lato maggiore. (denominati 3.ort e 4.ort).

Per la seconda campagna prove sono stati creati i seguenti provini:

Provino	Trattamento	T forno [°C]	H finale [mm]	T rulli [°C]	Fibra	Direzione	N° roving
Base	/	/	/	/	/	/	/
0	/	600	1,2	230	/	/	/
0P	P4	600	1,2	230	/	/	/
1	P4	600	1,2	230	v	p	3
2	P4	600	1,4	230	v	p	3
3	P4	600	1,2	230	c	p	3
4	P4	600	1,4	230	c	p	3
3.ort	P4	600	1,2	230	v	p	3
4.ort	P4	600	1,2	230	v	p	3
5	P1	600	1,2	230	v	p	3
6	P1	600	1,2	230	c	p	3
7	P1+P4	600	1,2	230	v	p	3
8	P1+P4	600	1,2	230	c	p	3
9	P1+P4	600	1,4	230	v	p	3
10	P1+P4	600	1,4	230	c	p	3
11	P4	600	1,2	230	v	o	4
12	P4	600	1,2	230	c	o	4
13	P4	600	1,2	230	v	p	6
14	P4	600	1,2	230	c	p	6

Tab 5.2: Seconda campagna prove

### 5.5.1 RESISTENZA A TRAZIONE IPOTETICA

Facendo riferimento al paragrafo 2.5.2 si è potuto ipotizzare la resistenza a trazione finale del composito (tab. 5.3). In particolare, ipotizzando una debole adesione tra matrice e rinforzo, si fa riferimento al punto 1.

Nota la densità, il calcolo del volume delle fibre è stato fatto in maniera indiretta andandone a

misurare la massa tramite bilancia di precisione. Per i calcoli analitici si fa riferimento all'Appendice 4. Naturalmente, nel calcolo della resistenza a trazione con fibra disposta ortogonalmente, il test all'MTS dovrebbe essere fatto lungo la direzione della fibra, prova che risulta impossibile viste le ridotte dimensioni della larghezza dei provini; tali provini sono stati presi in considerazione solo nell'andare a verificare l'integrità della fibra.

Numero di roving	Totale Composito Vetro [Mpa]	Totale Composito Carbonio [Mpa]
3	210,24	222,96
6	287,67	312,43

Tab. 5.3: Calcolo analitico della resistenza a trazione

Ci si aspetta un incremento della resistenza a trazione tra il 70 e il 140 %.

## 5.5.2 ANALISI DELL'ADESIONE TRA MATRICE E RINFORZO

Sono state inizialmente effettuate delle micrografie al microscopio ottico (fig. da 5.28 a 5.31) delle sezioni dei provini contenenti la fibra: tali micrografie sono poco attendibili in quanto il taglio del lamierino e la sua lucidatura comportano una abrasione delle fibre stesse.

Sono quindi state effettuate delle micrografie al SEM (fig. 2.32 e 5.33) per verificare l'adesione tra matrice e rinforzo. Le micrografie fanno riferimento ai provini rotti a trazione, come specificato nel par. 5.9.

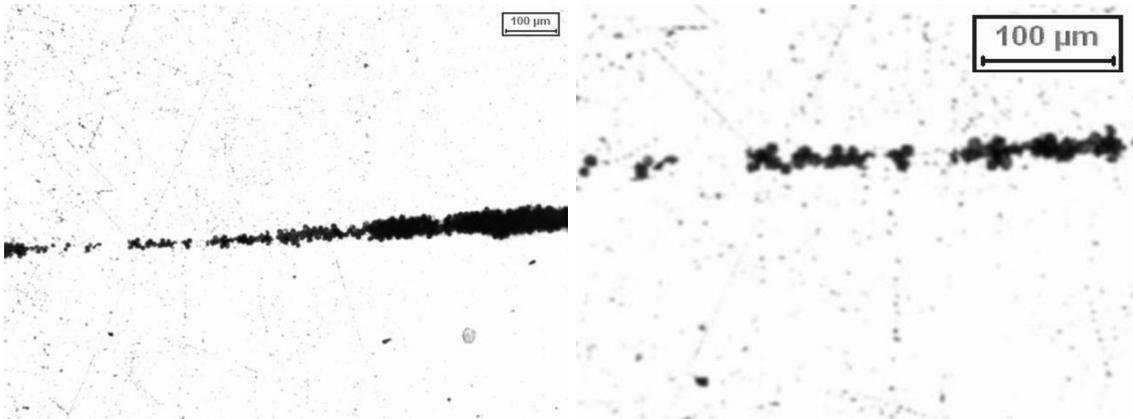


Fig. 5.28 e 5.29: Micrografie per verifica adesione del provino 3 con microscopio ottico (carbonio) e zoom

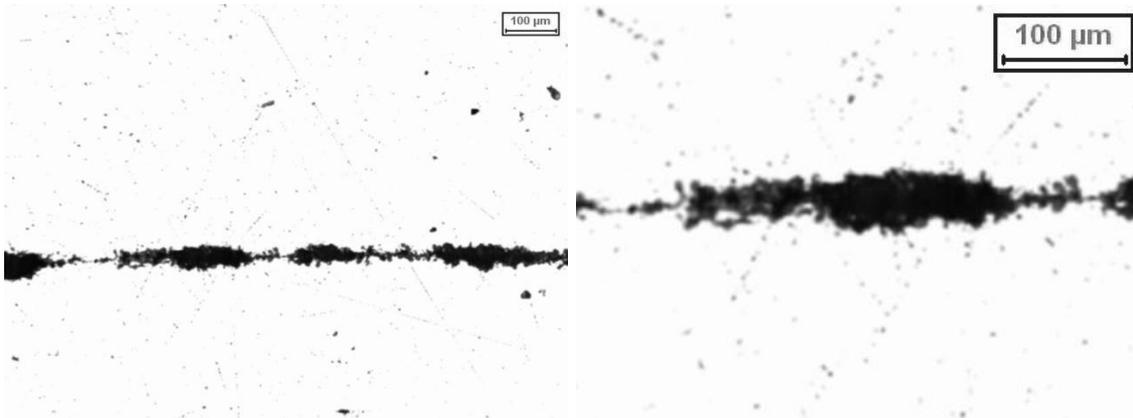


Fig. 5.30 e 5.31: Micrografie per verifica adesione del provino 3 con microscopio ottico (carbonio) e zoom

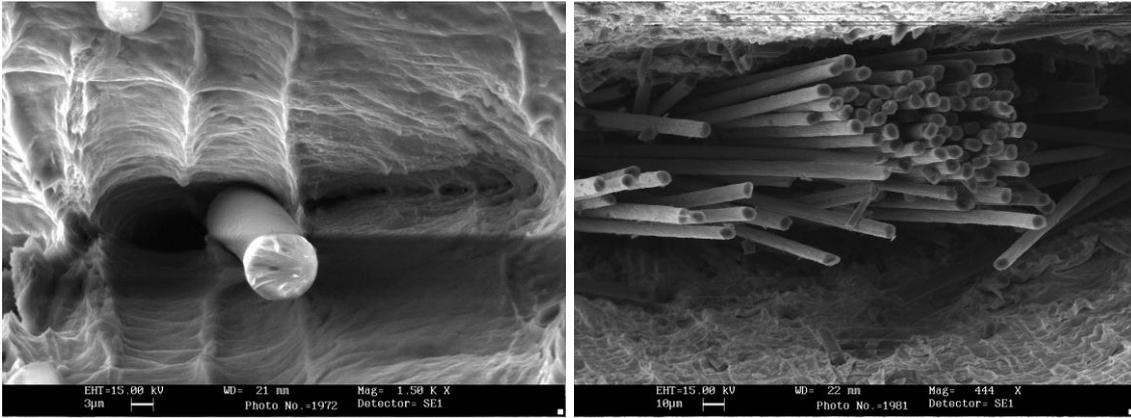


Fig. 5.32 e 5.33: Micrografie per verifica adesione del provino 1 su fibra singola (vetro) e per verifica adesione del provino 6 su ammasso di fibre (carbonio)

Dalle micrografie effettuate si deduce facilmente che nel caso in cui la fibra sia presente singolarmente nella matrice, essa vi si ancora in maniera adeguata e permette anche alla matrice circostante di aderire e/o saldarsi in maniera buona; nel caso invece in cui la fibra sia disposta sotto forma di roving sull'interfaccia, essa non permette una buona adesione nè subisce un adeguato inglobamento.

## 5.6 ANALISI TOMOGRAFICA

E' stato possibile effettuare l'analisi tomografica (fig da 5.35 a 5.39) sui soli provini contenenti la fibra di vetro, in quanto la fibra di carbonio risulta trasparente alla radiografia. Dall'analisi è stato inoltre possibile effettuare altre conclusioni sulla saldatura.

L'analisi è stata effettuata sul provino 5 (cfr. tab. 5.2) del quale ne è stato tagliato un campione di 4 mm x 8 mm (fig. 5.34) a circa 1 cm dal lato corto, nella zona centrale.

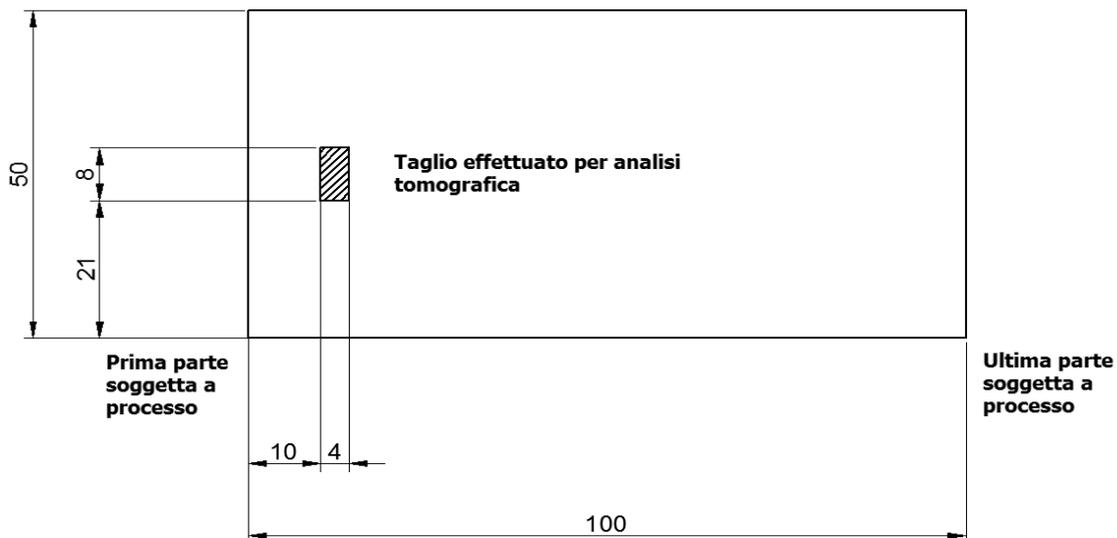


Fig. 5.34: Taglio effettuato per analisi tomografica

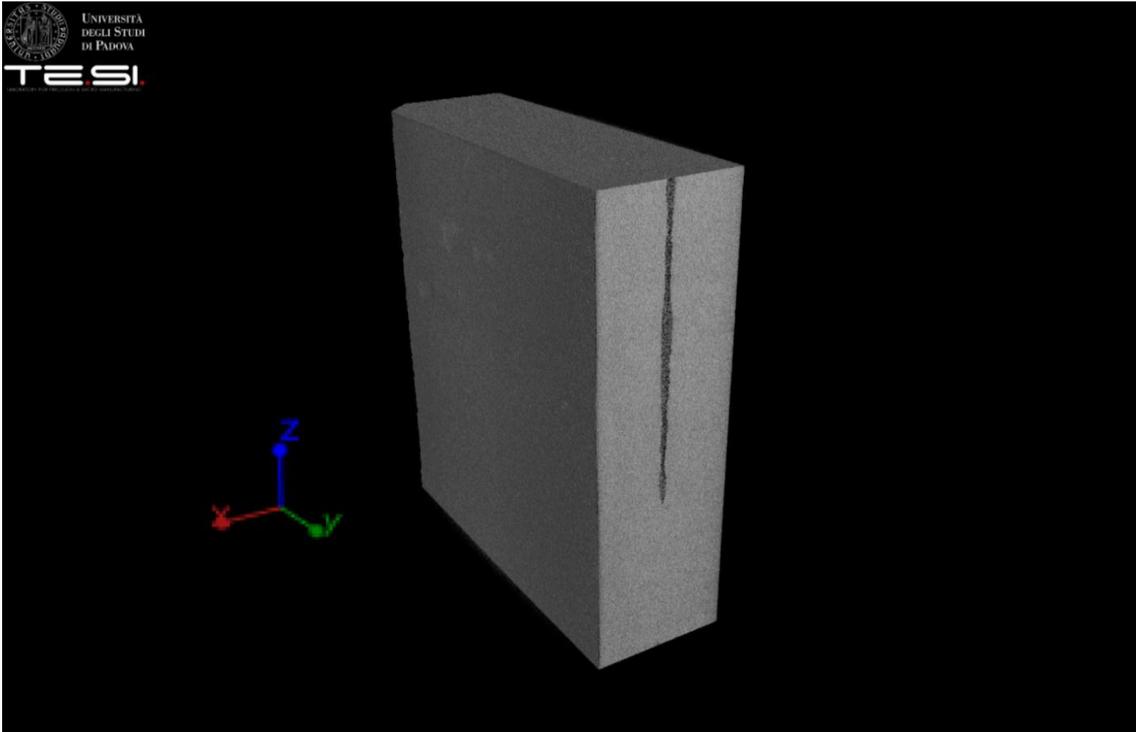


Fig. 5.35: Tomografia 3D del provino 5

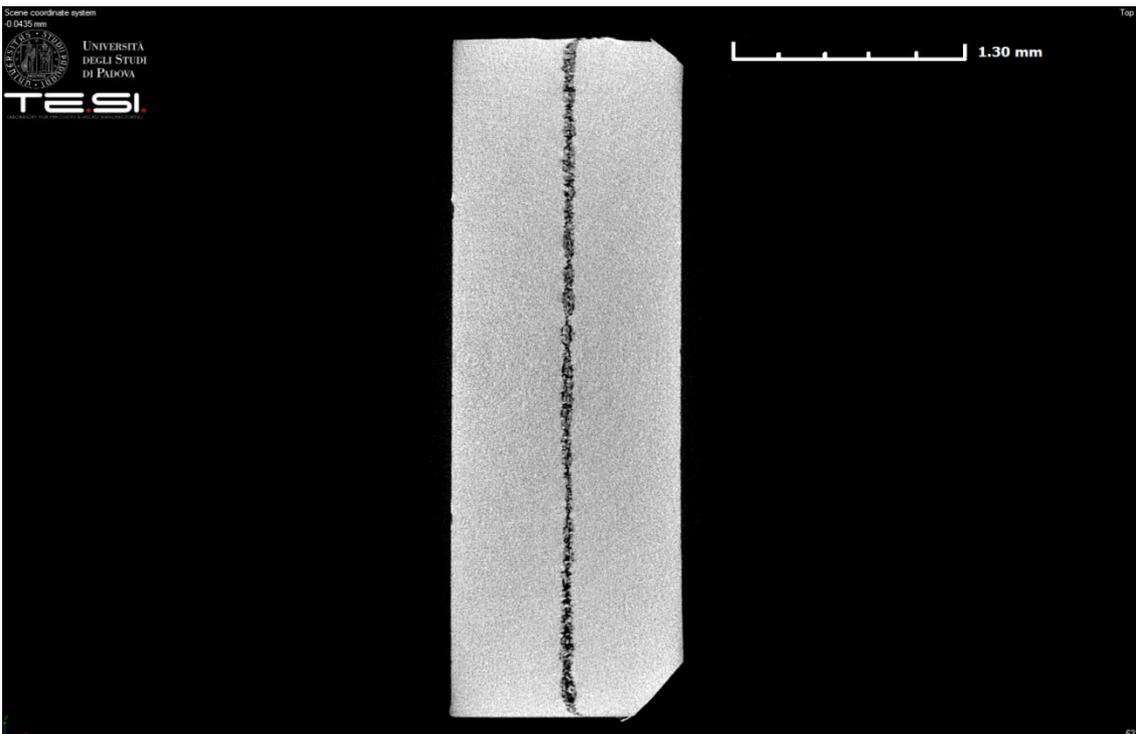


Fig 5.36: Proiezione nel piano xy della tomografia

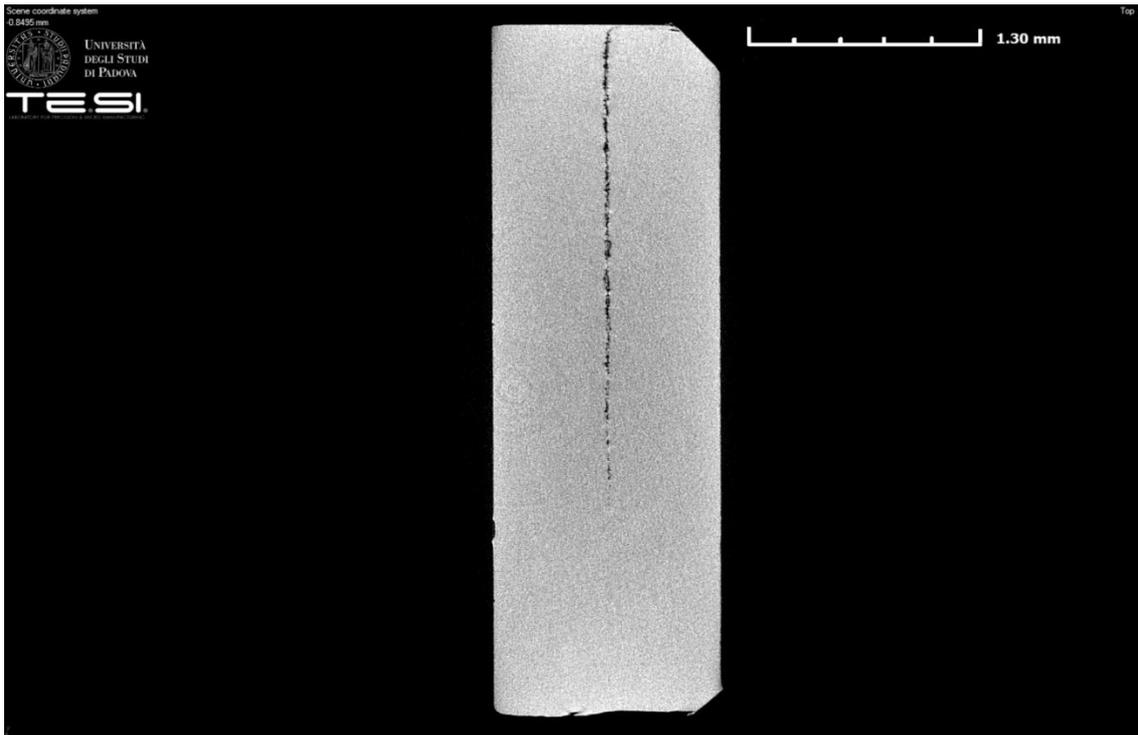


Fig 5.37: Proiezione nel piano xz della tomografia

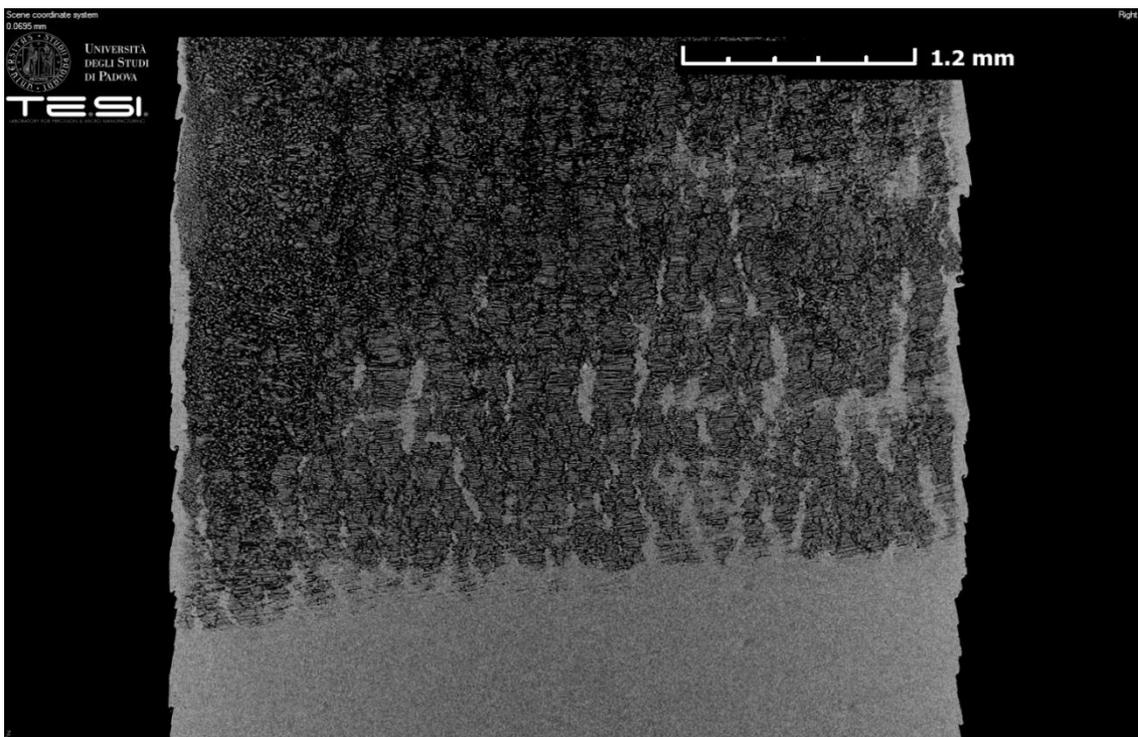


Fig 5.38: Proiezione nel piano yz della tomografia

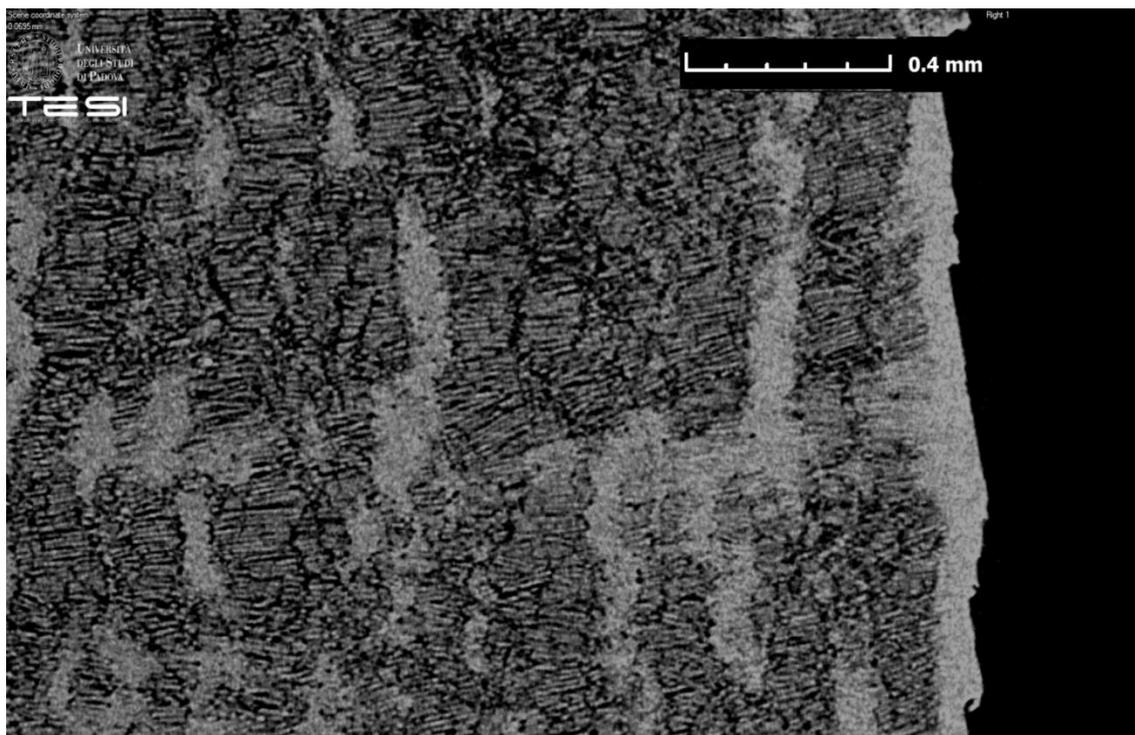


Fig. 5.39: Zoom della proiezione nel piano yz della tomografia

Dall'analisi (fig. 5.39) è visibile chiaramente la non uniformità della saldatura: la parte più centrale del provino ha subito completamente il fenomeno, mentre le zone più periferiche mantengono una netta interfaccia tra i due lamierini, a conferma dell'analisi effettuata al microscopio.

## 5.7 CALCOLO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE TRAMITE MACCHINA MTS

Per la realizzazione dei provini su cui effettuare il test si fa riferimento all'Appendice 4 e la figura 5.30.

In particolare i provini 3.ort , 4.ort (fig. 5.41), 13 e 14 hanno subito test senza essere tagliati in quanto i primi due avevano dimensioni molto diverse dagli altri laminati, in particolare una lunghezza molto ridotta, e quindi una loro lavorazione avrebbe comportato provini troppo piccoli; mentre gli ultimi due presentavano la fibra disposta lungo tutta la larghezza, contenendo più fibre, e quindi una loro lavorazione avrebbe comportato l'esportazione di parte del rinforzo.

Le prime prove (da fig. 5.42 a 5.44) sono servite a calcolare le proprietà del materiale base e del materiale senza la presenza di fibra, ma che abbia subito lo stesso trattamento dei provini contenenti la fibra.

Durante tutte le prove si sono mantenuti costanti i seguenti parametri:

- Frequenza di acquisizione: 1024 Hz;
- Velocità del pistone: 10 mm/sec;
- Allungamento massimo: 40 mm;



Fig. 5.40 e 5.41: Provini per il calcolo della resistenza a trazione e provini a trazione per i campioni 3.ort e 4.ort

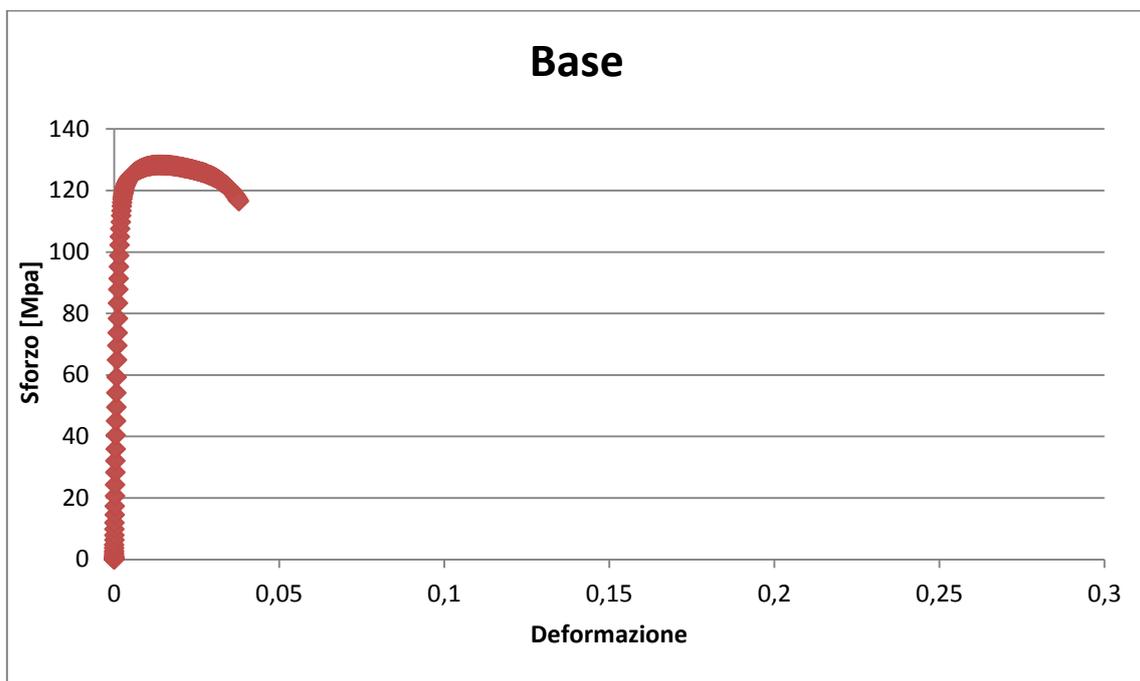


Fig. 5.42: Prova a trazione per il provino Base

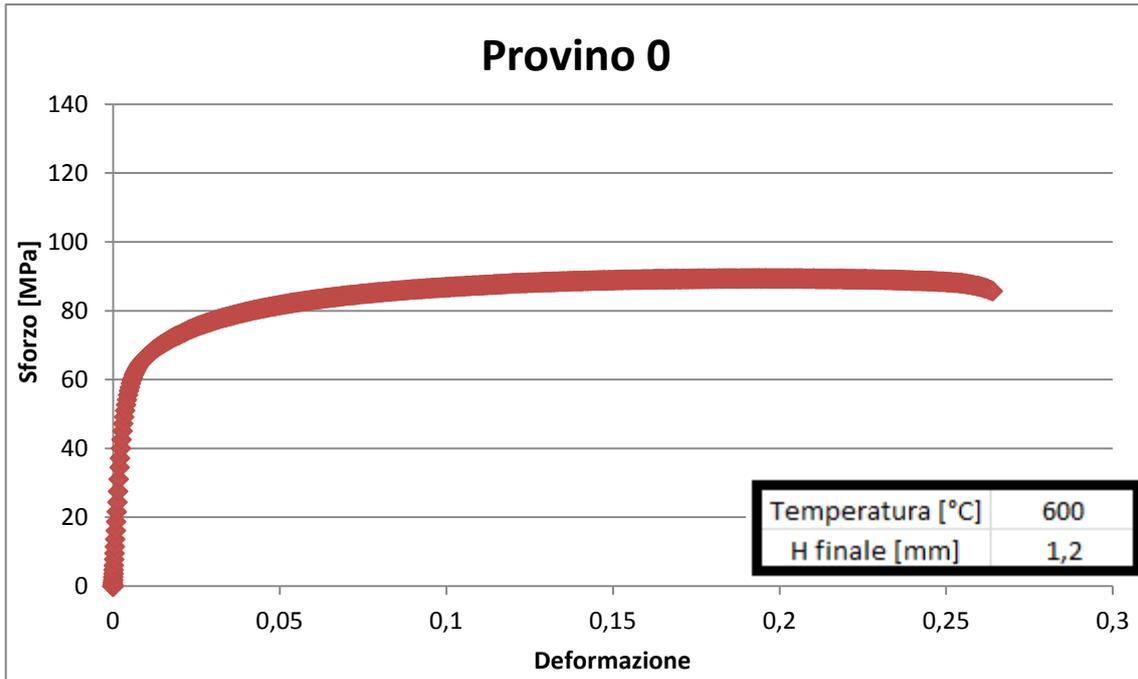


Fig. 5.43: Prova a trazione per il provino 0

Dai primi due grafici si può notare la differenza tra il materiale acquistato e quello che ha subito il trattamento da noi operato. Il primo presenta una resistenza a trazione maggiore e un minore allungamento a rottura, in quanto come anticipato ha subito un trattamento di incrudimento a freddo e parziale ricottura. Nel nostro caso è avvenuto un incrudimento a caldo: dalle micrografie si può notare che la dimensione dei grani è aumentata e ciò giustifica la minore resistenza e l'allungamento maggiore.

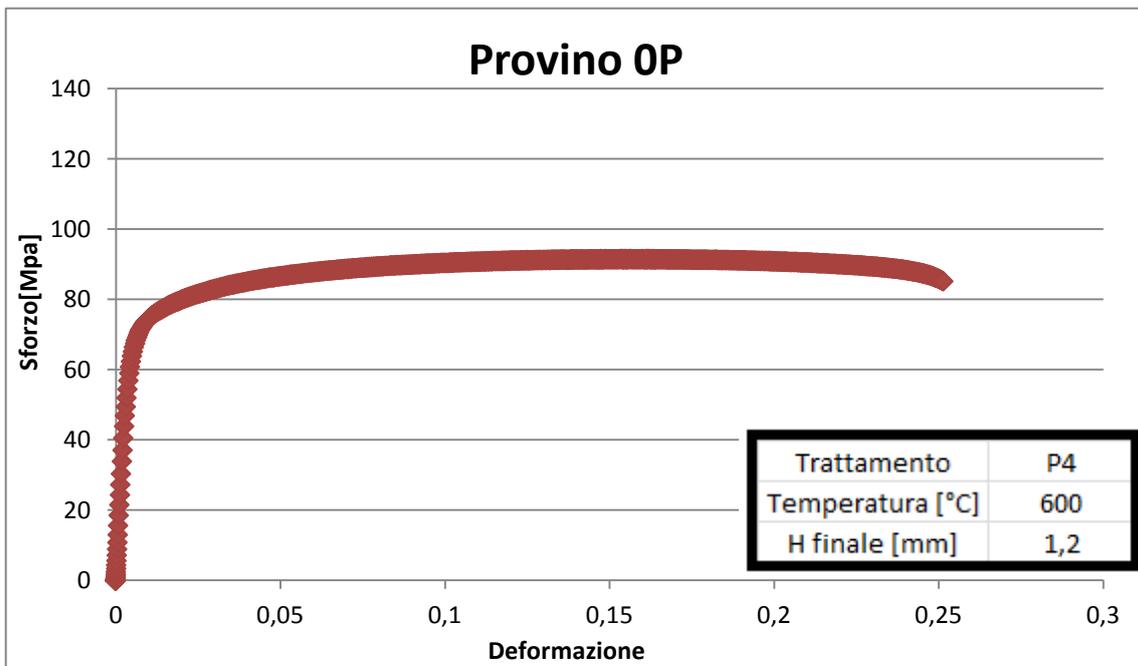


Fig. 5.44: Prova a trazione per il provino 0P

Non si notano sostanziali differenze tra i provini 0 e 0P; ciò può essere dovuto al fatto che il grado di incrudimento subito durante le due lavorazioni non si discosta di molto (in particolare l'aumento del coefficiente d'attrito tra lamiera e rullo non lo influisce). Vengono ora presentate le curve sforzo/deformazione per alcuni dei provini su cui è stato effettuato il test (fig. da 5.45 a 5.51), le quali vengono sormontate alla curva del provino 0 per verificare sostanziali differenze. Ogni prova ha avuto ripetibilità 2 e quindi sono presenti due curve per ogni provino (e.g. 2 e 2 bis), dalle quali si può calcolare una banda di dati. Per i valori puntuali medi si rimanda alla tabella conclusiva la quale richiama i principali parametri che è stato possibile misurare (tab 5.4).

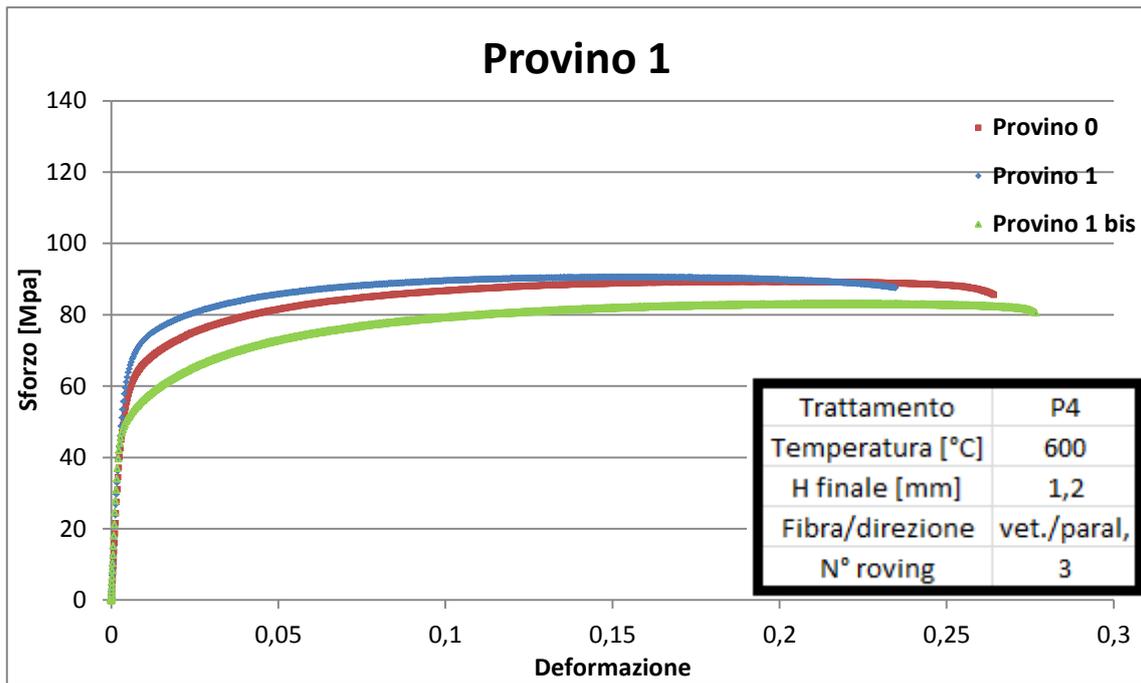


Fig. 5.45: Prova a trazione per il provino 1

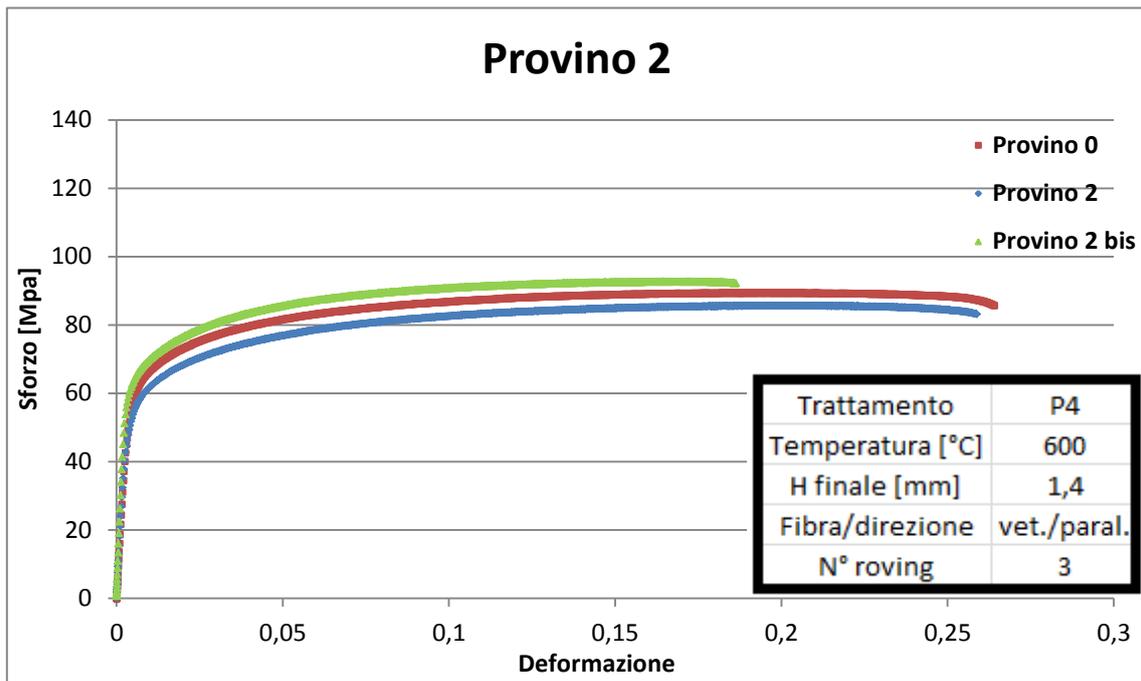


Fig. 5.46: Prova a trazione per il provino 2

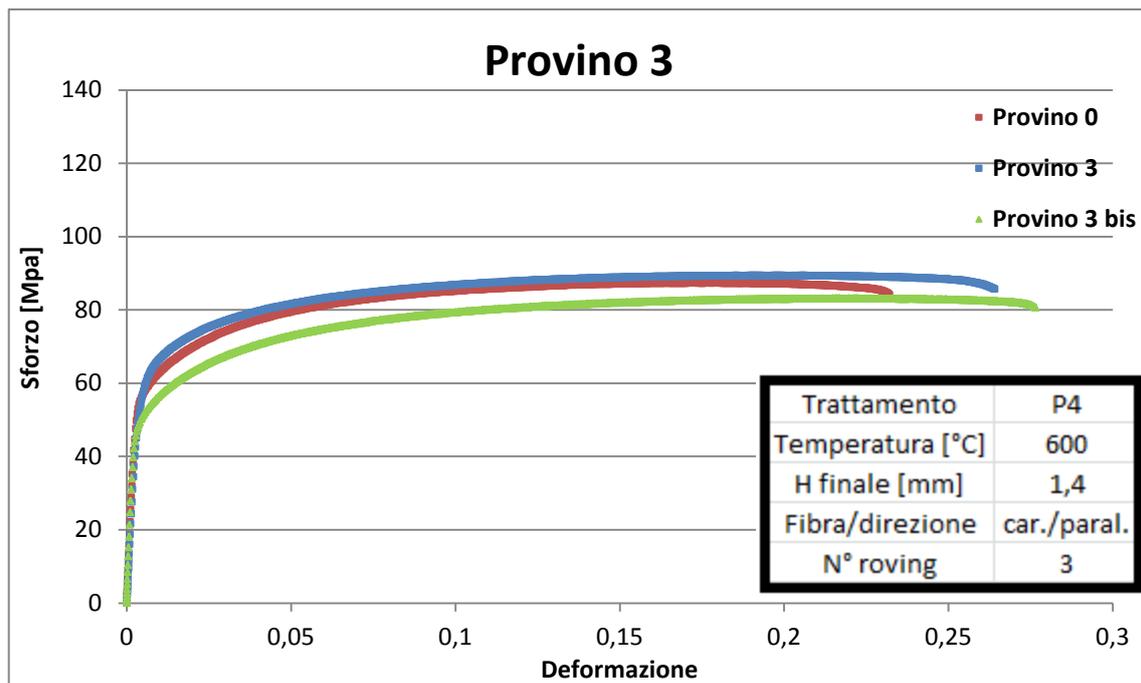


Fig. 5.47: Prova a trazione per il provino 3

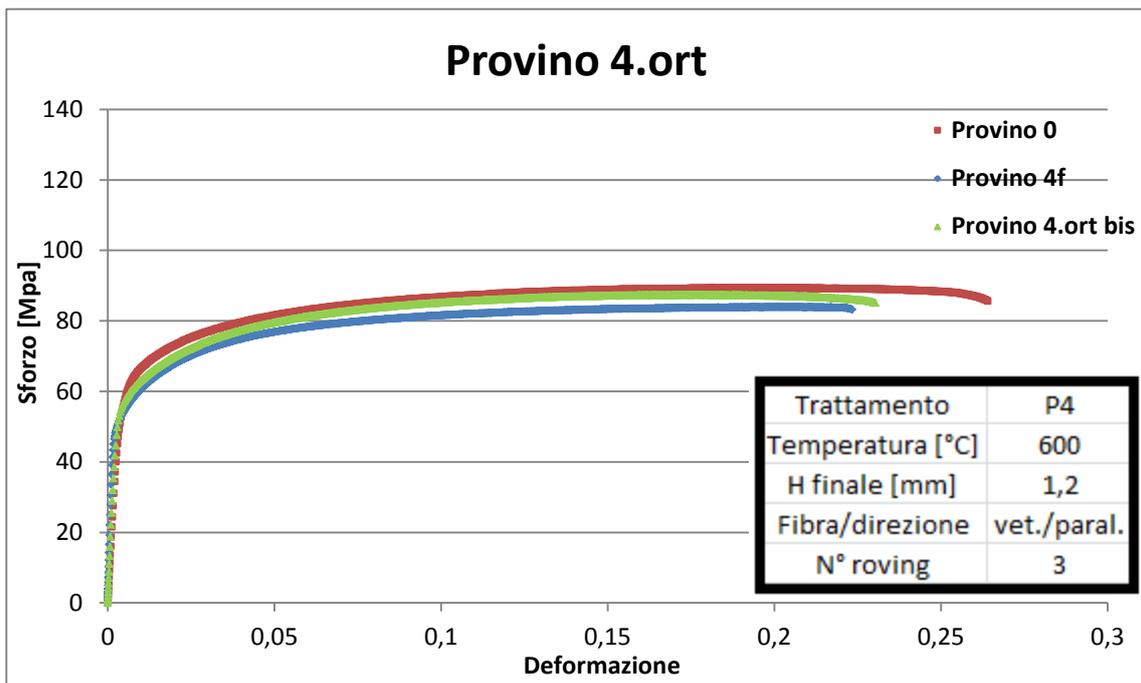


Fig. 5.48: Prova a trazione per il provino 4.ort

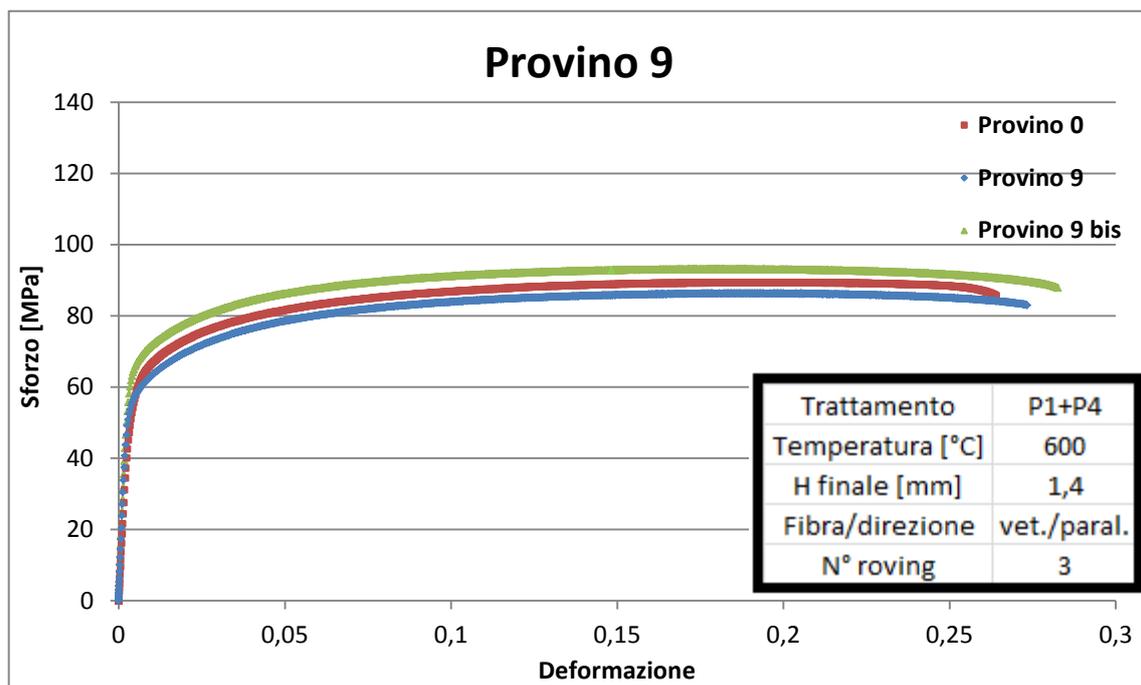


Fig. 5.49: Prova a trazione per il provino 9

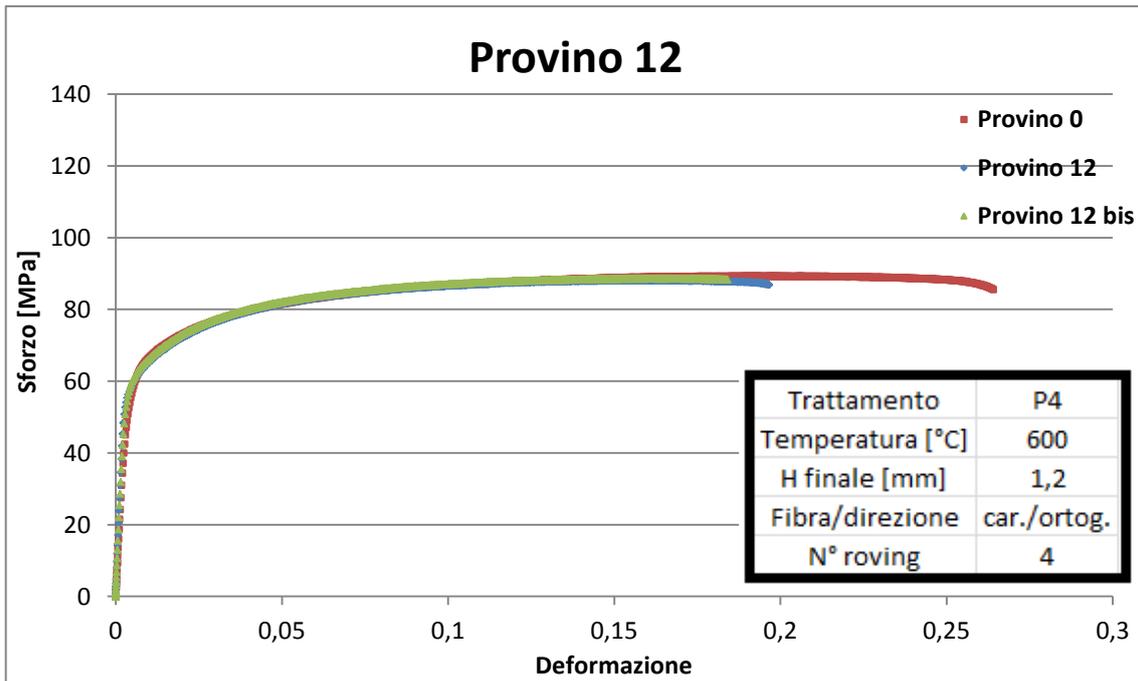


Fig. 5.50: Prova a trazione per il provino 12

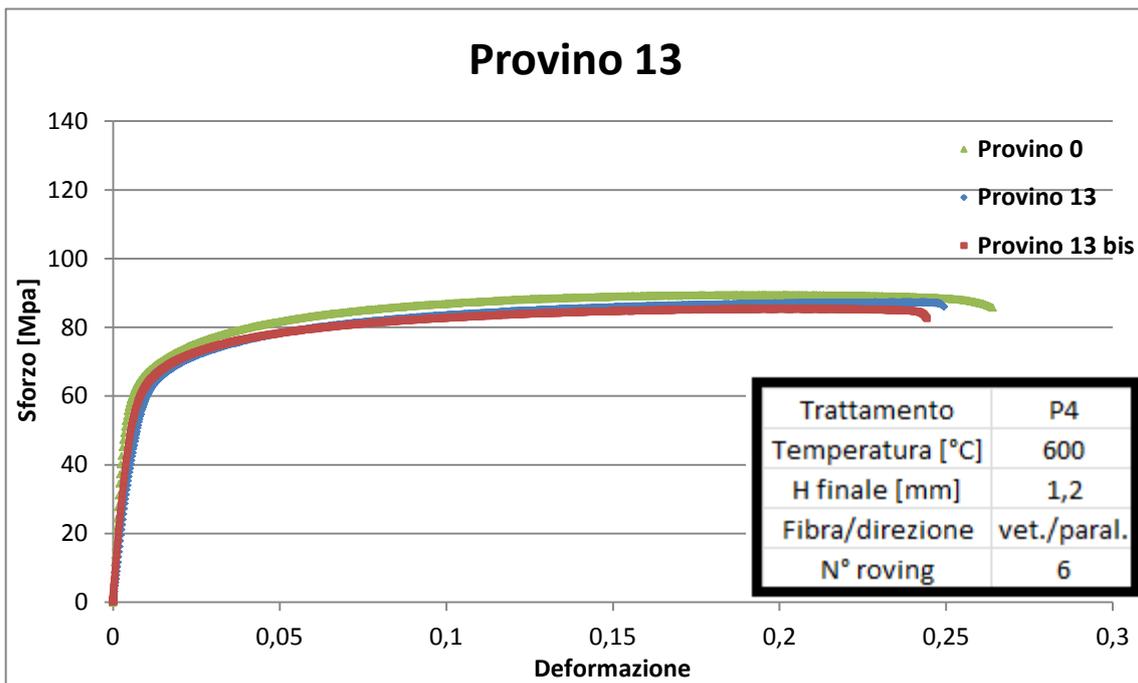


Fig. 5.51: Prova a trazione per il provino 13

Provino	UTS [MPa]	$\epsilon$ rottura	Area rottura [mm]	Spessore [mm]	Area frattura [mm <sup>2</sup> ]	F frattura [N]	$\sigma$ rottura reale [MPa]
Base	128,3	0,04	47,95	0,88	42,20	5821,64	137,96
0	89,4	0,26	25,62	1,03	26,39	3450,74	130,77
0P	91,5	0,25	24,57	1,10	27,03	3591,56	132,89
1	90,6	0,16	25,47	1,16	29,55	3689,51	144,86
2	85,7	0,23	27,21	1,28	34,83	3785,31	139,11
3	87,4	0,23	26,75	1,18	31,57	3388,27	126,66
4	83,1	0,28	26,98	1,27	34,26	3593,86	133,20
3.ort	87,0	0,15	52,53	1,30	68,29	6603,90	125,72
4.ort	83,1	0,22	48,41	1,25	60,51	6465,00	133,55
5	92,7	0,19	28,82	1,19	34,30	3798,76	131,81
6	92,1	0,26	25,17	1,15	28,95	3798,50	150,91
7	90,5	0,22	26,11	1,14	29,77	3777,15	144,66
8	93,1	0,28	24,70	1,15	28,41	3753,97	151,98
9	86,3	0,27	25,02	1,25	31,28	3882,60	155,18
10	88,9	0,25	25,51	1,20	30,61	3595,10	140,93
11	88,7	0,18	28,61	1,18	33,76	3615,35	126,37
12	88,2	0,20	27,55	1,14	31,41	3499,11	127,01
13	87,30	0,25	47,60	1,14	54,26	5817,26	122,21
14	85,44	0,24	43,67	1,15	50,22	5619,76	128,69

Tab 5.4: Tabella riassuntiva delle principali proprietà acquisite durante la prova di trazione

Dalle aree a frattura misurate sui provini è stato anche possibile calcolare la tensione a rottura reale dei provini.

Dalle prove non si nota alcun incremento delle proprietà rispetto al materiale di partenza, ciò dovuto probabilmente alla rottura della fibra e a una scarsa adesione con la matrice.

## 5.8 ANALISI AL MICROSCOPIO ELETTRONICO DEI PROVINI TRAZIONATI

Sono state effettuate le micrografie al SEM dei provini rotti (fig. da 5.52 a 5.61). Tutte le acquisizioni sono state fatte sulla zona di frattura.

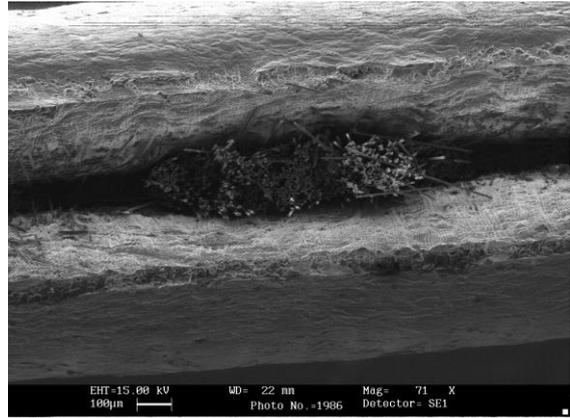
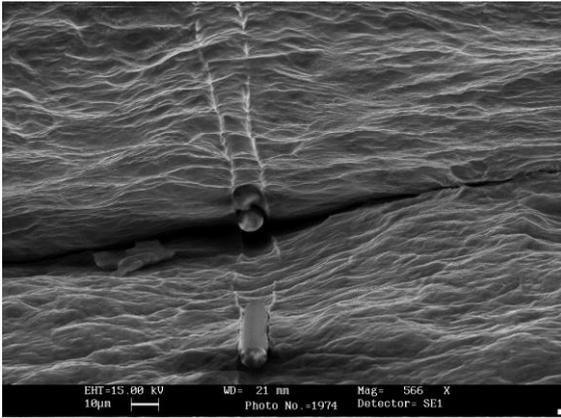


Fig. 5.52 e 5.53: Micrografia della rottura del provino 1

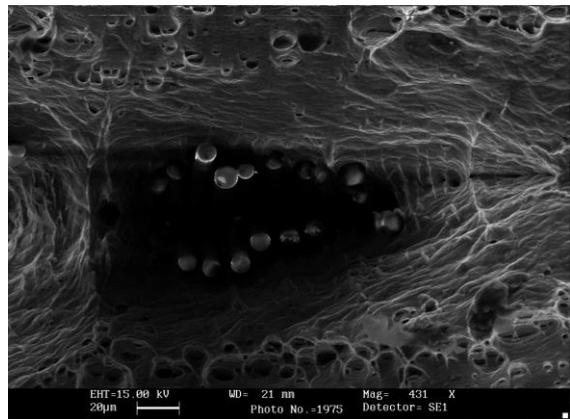
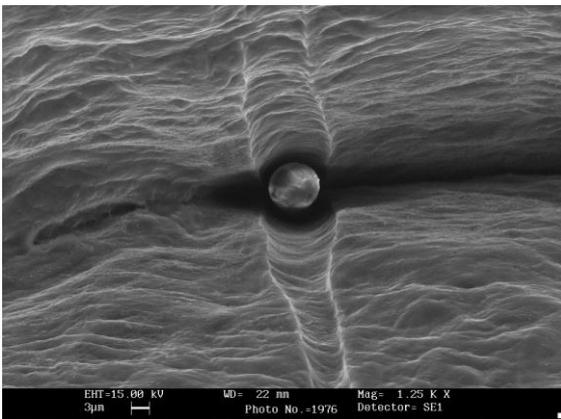


Fig. 5.54 e 5.55: Micrografia della rottura del provino 6

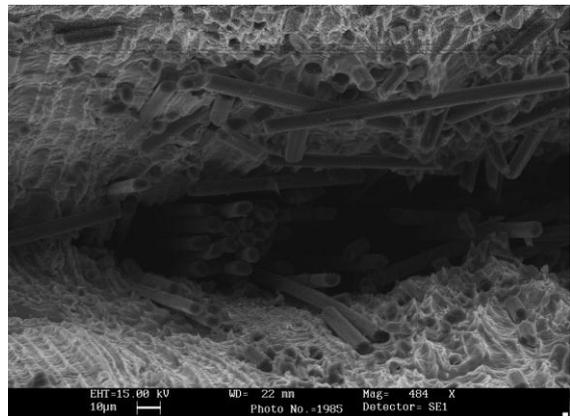
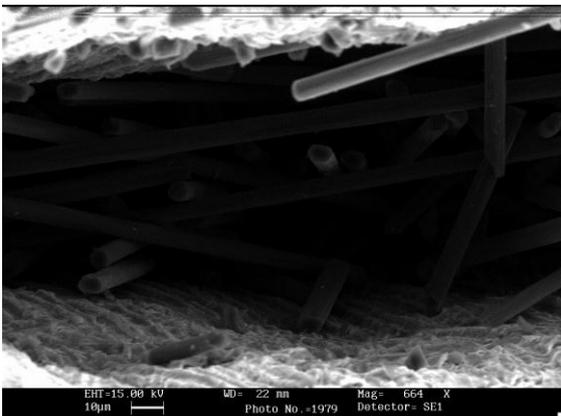


Fig. 5.56 e 5.57: Micrografie della rottura del provino 1

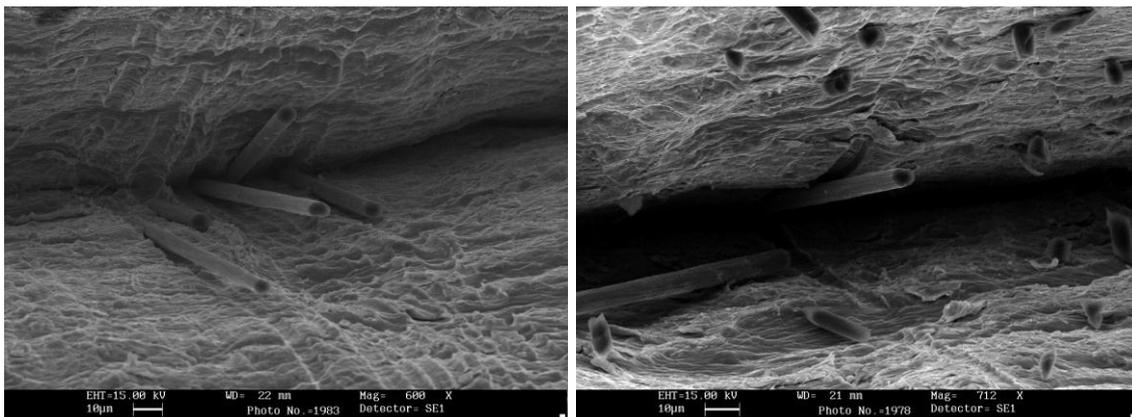


Fig. 5.58 e 5.59: Micrografie della rottura del provino 1 (sinistra) e 6 (destra)

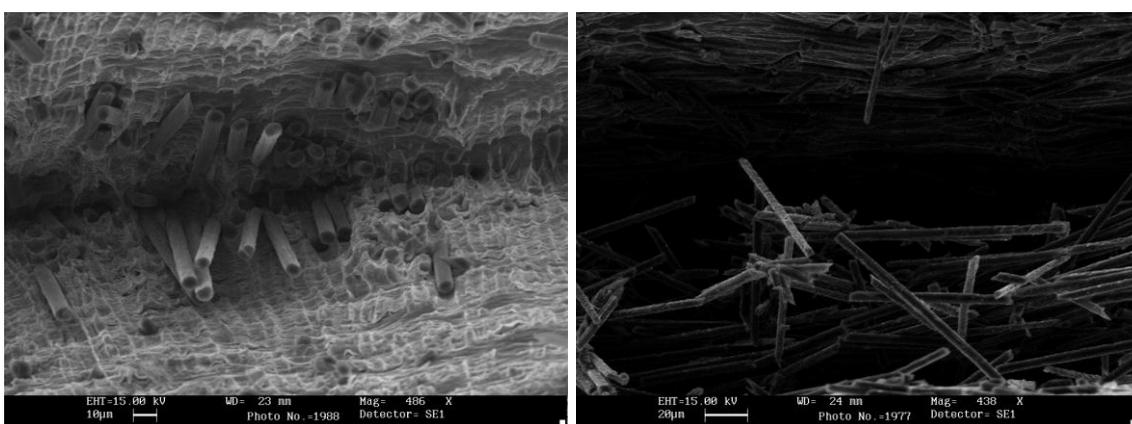


Fig. 5.60 e 5.61: Micrografie della rottura del provino 6 (sinistra) e 13 (destra)

## 5.9 CONCLUSIONI SULL'INTEGRITA' DELLE FIBRE

Dalle analisi tomografiche risulta evidente lo spezzettamento delle fibre (fig. 5.38 e 5.39). Le lunghezze dei tronconi di fibra sono dell'ordine dei 100  $\mu\text{m}$ . In particolare si può notare come esistano delle zone dove i tronconi di fibra risultano essere distanti gli uni dagli altri, mettendo in evidenza la matrice (come se fosse avvenuta una rottura per trazione), mentre in altri casi gli spezzoni risultano ammucchiati in zone che risultano di colore più scuro (come se fosse avvenuta una rottura per compressione). Noto comunque che lo spezzettamento è avvenuto per fenomeni di taglio, si può dedurre che la fibra durante il processo non rimane ferma ma, una volta rotta, si muove all'interno della matrice e quindi una adesione non forte.

Dalle micrografie presentate si può notare che la fibra risulta frammentata. Di nota è comunque il fatto che nel caso in cui le fibre si presentino singolarmente all'interfaccia (Fig. 5.52,5.54,5.58), esse risultano ben inglobate nella matrice e, osservando l'alluminio attorno, risulta presente una sorta di canale, indice del fatto che la fibra era completamente avvolta dall'alluminio, e che quindi è avvenuto l'inglobamento prima della rottura della fibra stessa, la quale può essere riferita al test di trazione effettuato.

Si può quindi concludere che la fibra, presente come filamento singolo, sembra non solo essere ben inglobata e favorire la saldatura, ma resistere anche agli sforzi di taglio che vengono ad instaurarsi durante il processo.

Si è notata una particolare difficoltà nell'acquisizione delle sezioni contenenti la fibra di vetro in quanto queste fibre tendono a polarizzarsi durante l'acquisizione: si è ovviato al problema diminuendo i tempi di acquisizione dei fotogrammi.



# CAPITOLO 6: CONCLUSIONI

## 6.1 CONCLUSIONI

Il processo presentato è risultato molto critico nella sua realizzazione. In particolare si può concludere che:

- La criticità a saldatura (cfr. par. 4.1) non è stata ovviata come aspettato in maniera uniforme nei provini (cfr. fig. da 5.16 a 5.25 e 5.35). In particolare, tutti i punti di mancata saldatura, ed in particolare di mancata ricristallizzazione, sono da ritenersi punti deboli del materiale, i quali possono dar luogo all'insorgere di cricche interne al pezzo. Per ovviare a questa criticità si ritengono percorribili due vie:
  1. Aumento della temperatura di processo
  2. Aumento dei rapporti di riduzione. In particolare si ritiene questa strada difficilmente percorribile, in quanto bisogna sempre considerare la fragilità delle fibre.

Durante le prove, è stato inoltre notato come uno dei fattori più influenti per la saldatura è stato il coefficiente d'attrito presente tra rulli e billetta.

- La criticità legata alla rottura della fibra non è stata ovviata. In particolar modo gli sforzi presenti durante il processo (cfr. fig. da 4.15 a 4.19) sono da considerarsi la principale causa di rottura della fibra. Da sottolineare il fatto che grazie all'acquisizione tomografica è stato facilmente identificabile e quantificabile il problema della rottura della fibra per le fibre di vetro (lunghezza degli spezzoni di circa 0.1 mm). Dall'acquisizione dei provini rotti a trazione è stato possibile quantificare anche il danneggiamento delle fibre di carbonio. Infine, considerando gli sforzi di taglio calcolati tramite analisi FEM, si è riscontrato come gli sforzi di taglio non siano eccessivamente elevati e che quindi la rottura sia imputabile alla sola scarsa resistenza delle fibre.
- Tutte le conclusioni finora presentate sembrano non valere nel caso in cui la fibra sia presente in maniera singola, e quindi non sotto forma di roving, all'interno del composito (cfr. fig. 5.53, 5.55, 5.57). Nei casi presentati, non solo la matrice risulta saldata nei punti adiacenti alla fibra, ma la fibra risulta anche completamente avvolta dalla matrice stessa. Inoltre, è ben visibile la presenza di canali, all'interno dei quali è probabile fosse racchiusa la fibra; tali canali risultano continui e quindi si può ipotizzare che la rottura della fibra non sia avvenuta durante il processo di formazione del composito, ma che si successiva e imputabile quindi alla prova a trazione (la fibra, essendo singola, ha poco contribuito alla resistenza del materiale, che quindi non era adeguatamente rinforzato).

Si fa riferimento al paragrafo successivo per le modifiche che si ritiene sia utile effettuare per la buona riuscita del processo.

## 6.2 POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

I possibili sviluppi futuri che si ritengono necessari per continuare il lavoro presentato sono:

- Studio approfondito degli attriti in gioco durante il processo. Si è notato una forte influenza del processo, ed in particolare della saldatura, da parte dell'attrito presente tra rulli e lamierini (tale dipendenza è ben visibile dalle equazioni costituenti la slab analysis, cfr. Appendice 1, E.A.1.3 e E.A.1.4). Nel nostro caso l'attrito non è stato studiato particolarmente in quanto ai rulli è stato necessario applicare un distaccante per evitare fenomeni di incollaggio e l'aumento del coefficiente d'attrito è stato realizzato tramite un semplice trattamento con carta vetrata. Si ritiene necessario uno studio più approfondito riguardo questo aspetto, considerando che influenza le pressioni in gioco con una correlazione di tipo esponenziale. A tal proposito si ritiene necessario anche uno studio al FEM con una particolare attenzione agli sforzi di taglio e alla loro dipendenza dal parametro attrito.
- Aumento delle temperature di processo. Al fine di favorire la saldatura si ritiene utile aumentare la temperatura di processo, tramite un nuovo sistema di riscaldamento dei rulli, ed in particolare attraverso un nuovo sistema di connessione tra cartucce e alimentazione esterna (contatti striscianti). Inoltre è da considerarsi utile la progettazione di un sistema di isolamento termico dei rulli i quali subiscono un forte raffreddamento per convezione. Riguardo a questo punto, per favorire sia la saldatura che l'integrità delle fibre, si ritiene necessario valutare la possibilità di lavorare l'alluminio in regime viscoelastico, e quindi molto vicini alla temperatura di fusione dove il materiale avrebbe un comportamento non newtoniano (tixotropico). Se si volesse intraprendere questa strada, un primo studio sarebbe da effettuarsi sul materiale da utilizzare, in quanto si renderebbe necessario utilizzare una lega di alluminio, la quale presenti una regione bifasica nel diagramma di fase.
- Con riferimento alle conclusioni fatte riguardo alle fibre singole presenti nel composito, si potrebbe studiare un metodo efficiente per la separazione dei roving nei singoli costituenti, in modo che le singole fibre siano lontane le une dalle altre il necessario per poter favorire la saldatura e un adeguata adesione tra matrice e rinforzo. Per quanto riguarda la fibra di vetro, si potrebbe sfruttare la sua facile polarizzazione. Durante le analisi al SEM, questa sua proprietà si è dimostrata alquanto ostica in quanto la fibra si caricava negativamente (merito degli elettroni provenienti dalla sorgente del microscopio), diventando quasi fluorescente e rendendo difficile l'analisi. Quindi si ipotizza utile cercare un particolare processo elettrostatico il quale potrebbe favorire la separazione delle fibre, caricandole tutte della stessa polarità.
- Considerando le basse potenze messe in gioco dal laminatoio, si ritiene utile utilizzare un nuovo macchinario, il quale sia in grado di sfruttare una maggiore potenza.

## APPENDICE 1: SLAB ANALYSIS

Nella zona in cui il materiale viene deformato fra i rulli, lo stato di tensione nel materiale è simile quello che si viene ad avere nella compressione di un campione cilindrico.

Tuttavia, il calcolo delle forze e della distribuzione di tensioni in laminazione è più complesso per il fatto che le superfici di contatto sono curve. Inoltre, nel processo di laminazione a freddo, il materiale in uscita è incrudito e, pertanto, il valore della tensione di flusso del materiale in uscita è maggiore rispetto a quello in ingresso tra i rulli. Le tensioni agenti su un elementino di materiale nelle zone di ingresso e di uscita sono rappresentate in Figura A.1.1. Si noti che le forze agenti differiscono solamente per la direzione delle forze di attrito.

Il metodo dello SLAB è uno dei metodi più semplici per l'analisi delle tensioni e delle forze nei processi di lavorazione massiva. Questo metodo richiede la definizione di un elementino di materiale e l'identificazione di tutte le tensioni normali e dovute all'attrito che agiscono sull'elemento.

Utilizzando il metodo dello SLAB in condizioni di deformazione piana, le tensioni agenti possono essere analizzate come riportato di seguito.

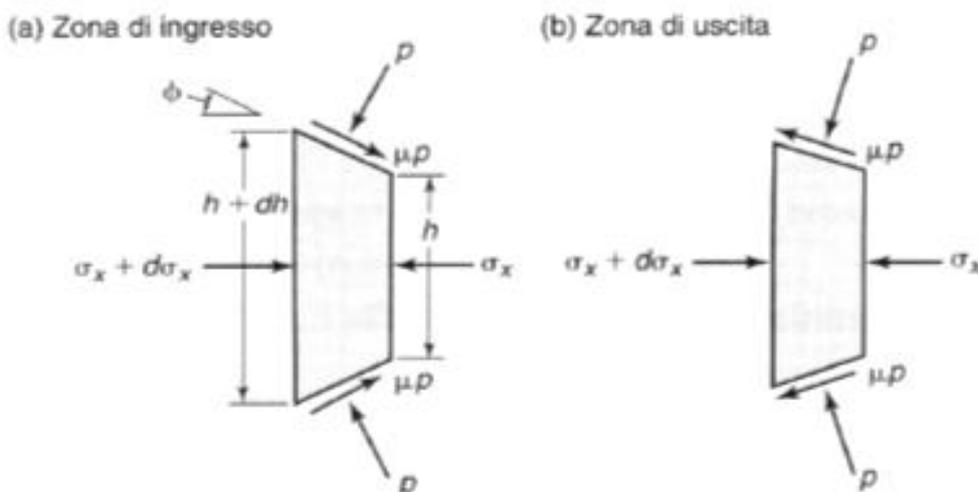


Figura A.1.1 –tensioni agenti su un elementino di materiale in laminazione: (a) zona di ingresso e (b) zona di uscita.

Dall'equilibrio delle forze orizzontali agenti sull'elemento della Figura A.1.1 si ottiene

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) - 2pR d\phi \sin \phi - \sigma_x h \pm 2\mu p R d\phi \cos \phi = 0$$

E.A.1.1

Semplificando l'espressione e ignorando i termini di secondo ordine, l'espressione diventa

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\phi} = 2pR(\sin \phi \mp \mu \cos \phi)$$

E.A.1.2

Nella pratica del processo di laminazione, l'angolo  $\Phi$ , (Figura A.1.1) è pari a pochi gradi, quindi si può assumere che  $\sin\Phi$  e  $\cos\Phi$  Quindi

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\phi} = 2pR(\phi \mp \mu)$$

E.A.1.3

Dal momento che gli angoli considerati sono piccoli, si può assumere che  $p$  sia una tensione principale. L'altra tensione principale è  $\sigma_x$ . La relazione tra le due relazioni principali e la tensione di flusso,  $Y_f$ , del materiale è data dall'equazione seguente nel caso di una condizione di deformazione piana, ossia

$$p - \sigma_x = \frac{2}{\sqrt{3}} Y_f = Y_f'$$

E.A.1.4

Si ricorda che, per un materiale incrudente, la tensione di flusso,  $Y_f$ , in queste espressioni deve corrispondere alla deformazione che il materiale subisce per una determinata posizione tra i rulli di laminazione. Riscrivendo l'equazione E.A.1.3 si ha

$$\frac{d}{d\phi} \left[ Y_f' \left( \frac{p}{Y_f'} - 1 \right) h \right] = 2pR(\phi \mp \mu)$$

E.A.1.5

che dopo aver differenziato diventa

$$Y_f' h \frac{d}{d\phi} \left( \frac{p}{Y_f'} \right) + \left( \frac{p}{Y_f'} - 1 \right) \frac{d}{d\phi} (Y_f' h) = 2pR(\phi \mp \mu)$$

E.A.1.6

Il secondo termine in questa espressione è molto più piccolo in quanto  $h$  diminuisce,  $Y_f$  aumenta (dovuto alla lavorazione a freddo) e quindi il prodotto tra le due grandezze si può considerare in prima approssimazione costante e derivando si annulla. Si ha quindi:

$$\frac{\frac{d}{d\phi} \left( \frac{p}{Y_f'} \right)}{\frac{p}{Y_f'}} = \frac{2R}{h} (\phi \mp \mu)$$

E.A.1.6

indicando con  $h_f$  lo spessore finale della striscia laminata, si ha

$$h = h_f + 2R(1 - \cos \phi)$$

E.A.1.7

ossia approssimando

$$h = h_f + R\phi^2$$

E.A.1.8

Se si sostituisce questa espressione per il valore di h nell'equazione E.A.1.6 e integrando si ottiene:

$$p = CY_f' \frac{h}{R} e^{\mp \mu H}$$

E.A.1.9

Dove

$$H = 2\sqrt{\frac{R}{h_f}} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{R}{h_f}} \phi \right)$$

E.A.1.10

All'ingresso  $F=\Phi$ ; quindi  $H=H_0$  con  $h_f$  sostituito da  $a$ . All'uscita  $\Phi=0$ , quindi  $h=h_f=0$ . All'entrata e all'uscita si ha anche  $p=Y_f$ , quindi nella zona di entrata,

$$C = \frac{R}{h_f} e^{\mu H_0}$$

E.A.1.11

e

$$p = Y_f' \frac{h}{h_0} e^{\mu(H_0-H)}$$

E.A.1.12

Nella zona di uscita

$$C = \frac{R}{h_f}$$

E.A.1.13

e quindi

$$p = Y_f' \frac{h}{h_f} e^{\mu H}$$

E.A.1.14

Si noti che la pressione  $p$ , in ogni punto nella zona di contatto con i rulli è una funzione di  $h$  e della posizione angolare lungo l'arco di contatto. Queste espressioni indicano anche che la pressione aumenta dell'attrito e all'aumentare del rapporto  $R/h_f$ .

La distribuzione delle pressioni espressa in forma adimensionale è mostrata nella Figura A.1.2. L'asse neutro si sposta verso l'uscita al diminuire del valore dell'attrito all'interfaccia. La ragione di ciò risiede nel fatto che quando il valore dell'attrito si avvicina a zero, i rulli iniziano a slittare e la velocità relativa tra i rulli e la striscia di materiale è orientata in una sola direzione.

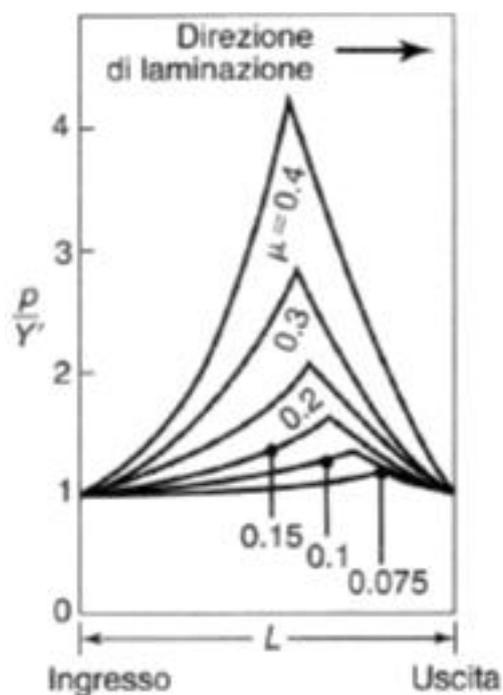


Figura A.1.2 –Distribuzione di pressione nella zona di contatto con i rulli in funzione del coefficiente di attrito. All'aumentare del valore della pressione, l'asse neutro si sposta verso la zona d'ingresso. Senza attrito, i rulli slittano e l'asse neutro si sposta completamente verso l'uscita.

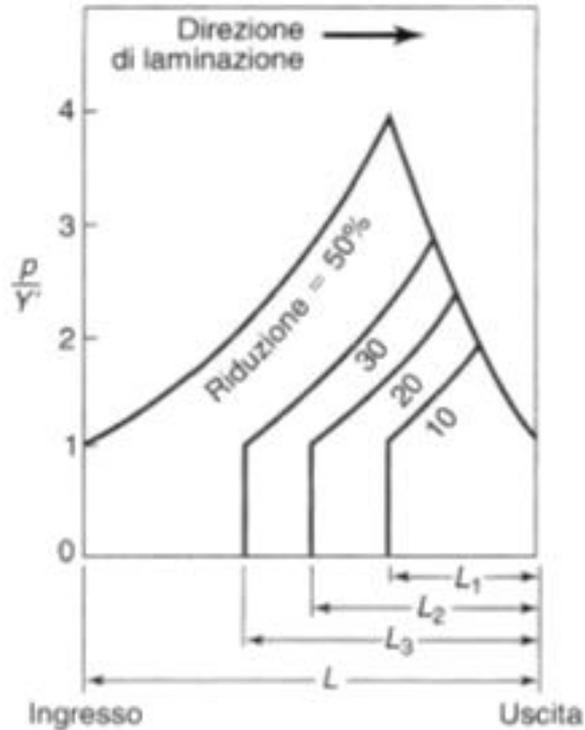


Figura A.1.3 –Distribuzione di pressione nella zona di contatto con i rulli in funzione della riduzione di spessore. Si noti l'aumento dell'area sottesa dalle curve all'aumentare della riduzione, e di conseguenza l'aumento della forza di laminazione.

L'effetto della riduzione di spessore della lamiera sulla distribuzione di pressione è mostrato nella Figura A.1.3. All'aumentare della riduzione, la lunghezza del contatto dei rulli aumenta facendo il picco di pressione. Le curve mostrate nella Figura A.1.3 sono teoriche; le distribuzioni di pressione determinate sperimentalmente sono più piatte, con picchi meno pronunciati.

L'asse neutro può essere determinato facilmente dalle equazioni E.A.1.12 e E.A.1.14; quindi in prossimità dell'asse neutro si ha

$$H_n = \frac{1}{2} \left( H_o - \frac{1}{\mu} \ln \frac{h_o}{h_f} \right)$$

E.A.1.15

Sostituendo l'Equazione (E.A.1.15) nell'Equazione (E.A.1.10) si ottiene

$$\phi_n = \sqrt{\frac{h_f}{R}} \tan \left( \sqrt{\frac{h_f}{R}} \cdot \frac{H_n}{2} \right)$$

E.A.1.16

h0 [mm]	hf [mm]	hn [mm]	Rapporto riduz.	R [mm]	L [mm]	$\mu$	$\alpha$ [rad]	$\phi_n$ [rad]	$\psi$ [rad]	H0	Hn	Pn_in [Mpa]	Pn_out [Mpa]	Pn [Mpa]	P/ $\sigma_{eq}$ sp 0,8	P/ $\sigma_{eq}$ minimo
1,60	1,44	1,53	0,10	27,00	2,08	0,47	0,08	0,03	0,00	2,79	1,28	24,62	22,16	23,39	1,84	3,00
1,60	1,28	1,47	0,20	27,00	2,94	0,47	0,11	0,05	0,00	4,26	1,89	35,41	28,32	31,86	2,51	3,00
1,60	1,12	1,41	0,30	27,00	3,60	0,47	0,13	0,05	0,00	5,69	2,47	51,04	35,73	43,38	3,42	3,00
1,60	0,96	1,37	0,40	27,00	4,16	0,47	0,15	0,06	0,00	7,26	3,09	77,10	46,26	61,68	4,86	3,00
1,60	0,80	1,33	0,50	27,00	4,65	0,47	0,17	0,06	0,00	9,13	3,83	127,16	63,58	95,37	7,51	3,00
1,60	0,64	1,30	0,60	27,00	5,09	0,47	0,19	0,06	0,00	11,51	4,78	243,59	97,44	170,51	13,42	3,00

h0 [mm]	hf [mm]	hn [mm]	Rapporto riduz.	R [mm]	L [mm]	$\mu$	$\alpha$ [rad]	$\phi_n$ [rad]	$\psi$ [rad]	H0	Hn	Pn_in [Mpa]	Pn_out [Mpa]	Pn [Mpa]	P/ $\sigma_{eq}$ sp 1	P/ $\sigma_{eq}$ minimo
2,00	1,80	1,91	0,10	27,00	2,32	0,47	0,09	0,04	0,00	2,49	1,13	22,99	20,69	21,84	1,72	3,00
2,00	1,60	1,84	0,20	27,00	3,29	0,47	0,12	0,05	0,00	3,81	1,67	31,90	25,52	28,71	2,26	3,00
2,00	1,40	1,77	0,30	27,00	4,02	0,47	0,15	0,06	0,00	5,09	2,17	44,43	31,10	37,76	2,97	3,00
2,00	1,20	1,71	0,40	27,00	4,65	0,47	0,17	0,06	0,00	6,50	2,70	64,63	38,78	51,70	4,07	3,00
2,00	1,00	1,67	0,50	27,00	5,20	0,47	0,19	0,06	0,00	8,16	3,34	101,91	50,95	76,43	6,02	3,00
2,00	0,80	1,63	0,60	27,00	5,69	0,47	0,21	0,06	0,00	10,30	4,17	184,20	73,68	128,94	10,15	3,00

h0 [mm]	hf [mm]	hn [mm]	Rapporto riduz.	R [mm]	L [mm]	$\mu$	$\alpha$ [rad]	$\phi_n$ [rad]	$\psi$ [rad]	H0	Hn	Pn_in [Mpa]	Pn_out [Mpa]	Pn [Mpa]	P/ $\sigma_{eq}$ sp 1,2	P/ $\sigma_{eq}$ minimo
2,40	2,16	2,29	0,10	27,00	2,55	0,47	0,09	0,04	0,00	2,28	1,03	21,85	19,67	20,76	1,63	3,00
2,40	1,92	2,21	0,20	27,00	3,60	0,47	0,13	0,05	0,00	3,48	1,50	29,54	23,63	26,59	2,09	3,00
2,40	1,68	2,13	0,30	27,00	4,41	0,47	0,16	0,06	0,00	4,65	1,94	40,12	28,09	34,10	2,68	3,00
2,40	1,44	2,06	0,40	27,00	5,09	0,47	0,19	0,07	0,00	5,93	2,42	56,77	34,06	45,42	3,58	3,00
2,40	1,20	2,01	0,50	27,00	5,69	0,47	0,21	0,07	0,00	7,45	2,99	86,61	43,31	64,96	5,11	3,00
2,40	0,96	1,97	0,60	27,00	6,24	0,47	0,23	0,07	0,00	9,40	3,72	150,01	60,00	105,01	8,27	3,00

Tab. A1.1: Calcoli analitici di riferimento a grafico 4.3

Per il calcolo delle deformazioni in gioco si è fatto riferimento alle equazioni della meccanica dei solidi.

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f}$$

E.A.1.17

Rapporto riduz.	$\varepsilon$ reale
0,10	0,105
0,15	0,163
0,20	0,223
0,25	0,288
0,30	0,357
0,35	0,431
0,40	0,511
0,45	0,598
0,50	0,693
0,55	0,799

Tab. A1.3: Calcoli analitici di riferimento a grafico 4.4

Per il calcolo della velocità di deformazione, si è sempre fatto riferimento alla slab analysis.

In particolare, considerando la velocità dei rulli, la lunghezza dell'arco di contatto, si può approssimare il tempo durante il quale avviene la deformazione.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_r}{L} \ln \frac{h_0}{h_f}$$

E.A.1.18

La velocità dei rulli misurata è di 67.9mm/s.

Rapporto riduz.	$\varepsilon^\circ$ [1/s]
0,10	3,08
0,15	3,87
0,20	4,61
0,25	5,31
0,30	6,01
0,35	6,72
0,40	7,46
0,45	8,23
0,50	9,05
0,55	9,94

Tab. A1.4: Calcoli analitici di riferimento a grafico 4.



## APPENDICE 2: OPERATORE SOBEL

L'operatore di Sobel è un algoritmo usato per elaborare immagini digitali, in particolare per effettuare il riconoscimento dei contorni (Edge detection). Dal punto di vista tecnico è un operatore differenziale, che calcola un valore approssimato del gradiente di una funzione che rappresenta la luminosità dell'immagine. In ogni punto dell'immagine, l'operatore di Sobel può corrispondere al vettore gradiente oppure alla norma di tale vettore. L'algoritmo utilizzato dall'operatore di Sobel è basato sulla convoluzione dell'immagine con un piccolo filtro, separato e di valore intero, applicato sia in direzione verticale che orizzontale, ed è quindi "economico" in termini di potenza di calcolo necessaria.

L'operatore calcola il gradiente della luminosità dell'immagine in ciascun punto, trovando la direzione lungo la quale si ha il massimo incremento possibile dal chiaro allo scuro, e la velocità con cui avviene il cambiamento lungo questa direzione. Il risultato ottenuto fornisce una misura di quanto "bruscamente" oppure "gradualmente" l'immagine cambia in quel punto, e quindi della probabilità che quella parte di immagine rappresenti un contorno, e fornisce anche un'indicazione del probabile orientamento di quel contorno.

L'operatore applica due kernel 3×3, cioè due matrici di convoluzione all'immagine originaria per calcolare valori approssimati delle derivate - una in direzione orizzontale, ed una in direzione verticale. Se chiamiamo A l'immagine sorgente, e  $G_x$  e  $G_y$  le due immagini i cui punti rappresentano rispettivamente i valori approssimati delle derivate in orizzontale ed in verticale, l'operazione è descritta da:

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \mathbf{A} \quad \text{e} \quad \mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \mathbf{A}$$

E.A.2.1

La coordinata x è qui considerata positiva quando aumenta in direzione destra, e la coordinata y quando aumenta in direzione verso il basso. In ciascun punto dell'immagine i valori approssimati del gradiente possono essere combinati per calcolare il valore totale del gradiente, usando la formula:

$$\mathbf{G} = \sqrt{\mathbf{G}_x^2 + \mathbf{G}_y^2}$$

E.A.2.2

Da questi risultati si può ottenere anche la direzione del gradiente:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\mathbf{G}_y}{\mathbf{G}_x}\right)$$

E.A.2.3

In figura A2.1 e A2.2 sono presentati degli esempi di utilizzo del filtro.

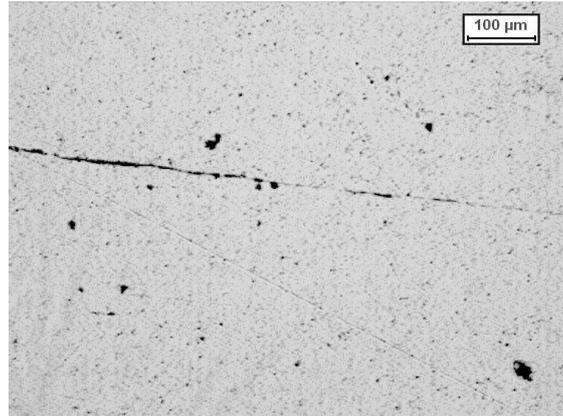


Fig. A2.1: Micrografia senza filtri

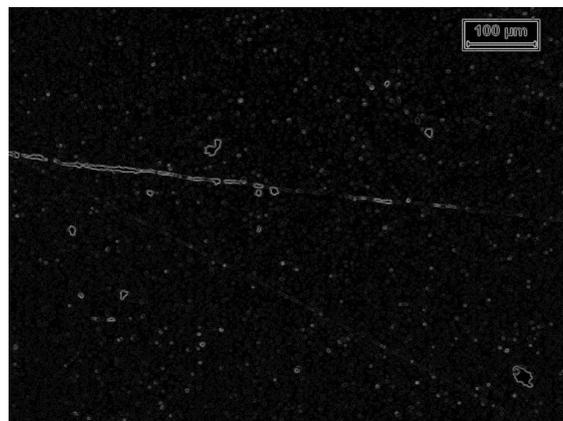


Fig. A2.2: Micrografia con filtro Sobel

## **APPENDICE 3: PROVINI LAMINAZIONE**

Per le prove alla macchina a trazione sono stati disegnati dei provini non standard. Questa scelta è stata dettata sostanzialmente dalla volontà di incorporare completamente le fibre interposte nel provino (si è quindi optato per un provino tozzo). I raggi di curvatura sono stati tenuti elevati per non avere fenomeni che potessero dare origine all'insorgere di cricche.

Questa libertà di scelta è stata possibile in quanto l'unico parametro fondamentale per la prova è l'area utile del provino, facilmente calcolabile nota la geometria.



## APPENDICE 4: CALCOLO ANALITICO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE

In riferimento ai paragrafi 2.5.2 e 5.4.1 si riportano i calcoli effettuati per il calcolo analitico della resistenza a trazione del composito utilizzando la regola delle mescolanze.

	Vetro	Carbonio
Massa 8 cm [g]	0,15	0,12
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	2,49	1,85
Volume roving [mm <sup>3</sup> ]	60,24	64,86
Volume Provino alluminio [mm <sup>3</sup> ]	10000	10000
Volume fibre [mm <sup>3</sup> ]	180,72	194,59
Volume totale composito [mm <sup>3</sup> ]	10180,72	10194,59
Volume percentuale alluminio[%]	98,22	98,09
Volume percentuale fibra [%]	1,78	1,91
Resistenza totale composito	210,24	222,96

Tab. 4.1: Calcoli analitici riferiti al paragrafo 5.4.1, 3 pezzi di roving

	Vetro	Carbonio
Massa 8 cm [g]	0,15	0,12
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	2,49	1,85
Volume roving [m <sup>3</sup> ]	60,24	64,86
Volume Provino alluminio [mm <sup>3</sup> ]	10000,00	10000,00
Volume fibre [mm <sup>3</sup> ]	361,45	389,19
Volume totale composito [mm <sup>3</sup> ]	10361,45	10389,19
Volume percentuale alluminio[%]	96,51	96,25
Volume percentuale fibra [%]	3,49	3,75
Resistenza totale composito	287,67	312,43

Tab. 4.2: Calcoli analitici riferiti al paragrafo 5.4.1, 6 pezzi di roving



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bernardo Enrico, slide del corso “Scienza e Tecnologia dei Materiali” per la Laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica, II anno (DM 270/04)
- [2] Munaretto Paolo, 2011, “Studio di materiali compositi per l’industria automobilistica”
- [3] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, 2008, “Tecnologia meccanica”, quinta edizione
- [4] Haiyan Chen, Jian Cao, Xiaoyu Tian, Rui Li, 2013, “Low-temperature diffusion bonding of pure aluminium”
- [7] A. Ureña, J. Rams, M.D. Escalera, M. Sañchez, 2005, “Characterization of interfacial mechanical properties in carbon fiber aluminium matrix composites by the nanoindentation technique”
- [8] Trentin Alberto, 2013, “Sviluppo di un laminato a duo non reversibile per laminazione a caldo”
- [9] P.F. Bariani, S. Bruschi, A. Ghiotti, 2006, “Physical Simulation of Longitudinal Welding in Porthole-Die Extrusion”
- [10] G.Q. Wu, Z.F. Li, G.X. Luo, H.Y. Li, Z. Huang, 2006, “Dynamic simulation of solid-state diffusion bonding”
- [11] Visentini Filippo, 2012, “Macro compositi a matrice metallica: ottimizzazione dei parametri di saldatura per diffusione”
- [12] Bruschi Stefania, Ghiotti Andrea, slide del corso “Progetto e prototipizzazione virtuale del processo produttivo” per laurea magistrale in Ingegneria Meccanica
- [13] Santimaria Andrea, 2012, “Macro-compositi a matrice metallica: analisi di fattibilità del processo”, tesi di laurea
- [14] Roohollah Jamaati, Mohammad Reza Toroghinejad, 2010, “High-strength and highly-uniform composite produced by anodizing and accumulative roll bonding processes”



## SITOGRAFIA

[14] <http://www.matweb.com/>

[15] <http://www.rotfil.com/it/>

[16] <http://www.servotecnica.com/>

[17] <http://www.arduino.cc/>

[18] <http://www.enginsoft.it/software/forge/index.html>

[19] <http://www.keytometals.com/IT/>