



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Friction stir welding di piastre in materiale  
polimerico ottenute tramite operazioni di  
stampa 3D**

Friction stir welding of plates in polymeric  
material obtained through 3D printing  
operations

Relatore:  
Prof. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:  
Amedeo Amichetti

Correlatore:  
Prof.ssa Michela Simoncini

A.A. 2020/2021

# Ringraziamenti

In primis, vorrei ringraziare il mio relatore, il professor Archimede Forcellese, e la mia co-relatrice, la professoressa Michela Simoncini, per avermi permesso di svolgere il tirocinio presso il laboratorio di tecnologia meccanica nella Facoltà di Ingegneria Meccanica dell'Università Politecnica delle Marche. Inoltre, vorrei ringraziare soprattutto Tommaso Mancia e Serena Gentili, gli assistenti che mi hanno maggiormente seguito durante il mio percorso di tirocinio e che mi hanno aiutato nella stesura della mia tesi di laurea.

Vorrei ringraziare particolarmente la mia famiglia, mio padre, mia madre e le mie due sorelle che mi hanno supportato al meglio durante tutto il mio percorso di studi fino a qui e che mi hanno sempre garantito tutto il necessario per permettermi di concentrarmi al meglio sui miei studi.

Infine, vorrei ringraziare Arianna e tutti i miei amici, che mi hanno sempre aiutato nel momento del bisogno e con i quali ho festeggiato e festeggerò ogni traguardo, compreso quest'ultimo.

# INDICE

<b>Introduzione</b>	<b>6</b>
<b>1. Additive Manufacturing (AM)</b>	<b>8</b>
<b>1.1. Generalità sull'additive manufacturing</b>	<b>8</b>
<b>1.2. Tecniche di additive manufacturing</b>	<b>10</b>
<b>1.2.1. Fused Deposition Modelling (FDM)</b>	<b>11</b>
1.2.1.1. Additive manufacturing per estrusione a siringa o a stantuffo	12
1.2.1.2. Additive manufacturing per estrusione a filamento	13
1.2.1.3. Additive manufacturing per estrusione a vite	13
1.2.1.4. Direct Ink Writing (DIW) ed estrusione reattiva	14
<b>1.2.2. Selective Laser Sintering (SLS)</b>	<b>15</b>
<b>1.3. Materiali usati nell'additive manufacturing</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1. Materiali polimerici</b>	<b>19</b>
1.3.1.1. Acrilnitrile Butadiene Stirene (ABS)	20
<b>2. Friction Stir Welding (FSW)</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Generalità sul Friction Stir Welding</b>	<b>22</b>
<b>2.1.1. L'utensile</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2. Parametri di saldatura</b>	<b>27</b>
2.1.2.1. Velocità di rotazione dell'utensile	28
2.1.2.2. Velocità di avanzamento dell'utensile	28
2.1.2.3. <i>Angolo di inclinazione dell'utensile</i>	29
2.1.2.4. <i>Forza verticale assiale</i>	30
2.1.2.5. <i>Penetrazione dell'utensile</i>	30

2.1.2.6. <i>Posizione del pezzo</i>	31
<b>2.1.3. Difetti di saldatura</b>	<b>32</b>
2.1.3.1. Tunnel defects	33
2.1.3.2. Voids	33
2.1.3.3. Kissing bonds	33
2.1.3.4. Mancanza di penetrazione	34
2.1.3.5. Bava	35
2.1.3.6. Scanalature	35
<b>2.2. Tecniche di FSW</b>	<b>36</b>
2.2.1. Traditional Friction Stir Welding	36
2.2.2. Under Water Friction Stir Welding	37
2.2.3. Friction Spot Stir Welding	38
<b>2.3. Materiali usati nella FSW</b>	<b>41</b>
2.3.1. FSW di materiali polimerici	43
2.3.1.1. Hot shoe	45
<b>3. Materiali e procedure sperimentali</b>	<b>46</b>
<b>3.1. Materiale</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Stampante 3D</b>	<b>47</b>
<b>3.3. CNC</b>	<b>48</b>
<b>3.4. Parametri FSW</b>	<b>49</b>
<b>3.5. Provini</b>	<b>50</b>
<b>3.6. Prova di trazione</b>	<b>51</b>
<b>3.7. Prova di flessione</b>	<b>53</b>
<b>3.8 Stereomicroscopio</b>	<b>55</b>

<b>4. Risultati e discussione</b>	<b>56</b>
<b>4.1. Analisi delle prove di trazione</b>	<b>56</b>
4.1.1. Confronto one side – double side	58
4.1.2. Confronto tra velocità di rotazione diverse e parametri costanti	58
<b>4.2. Analisi delle prove di flessione</b>	<b>59</b>
4.2.1. Confronto one side – double side	60
4.2.2. Confronto tra velocità di rotazione diverse e parametri costanti	61
<b>4.3. Analisi allo stereomicroscopio delle saldature con minore qualità superficiale</b>	<b>61</b>
<b>4.4. Analisi allo stereomicroscopio delle saldature con maggiore qualità superficiale</b>	<b>63</b>
<b>4.5. Analisi delle temperature</b>	<b>67</b>
<b>5. Conclusioni</b>	<b>71</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>73</b>
<b>Indice delle figure</b>	<b>75</b>
<b>Indice delle tabelle</b>	<b>77</b>

# Introduzione

L'elemento che contraddistingue la maggior parte delle tecnologie che sono state sviluppate negli ultimi anni è la parola innovazione: il miglioramento di una tecnica già ampiamente utilizzata, ma resa più performante, più economica o più ecosostenibile rispetto a quella tradizionale.

Il caso che viene analizzato nella seguente trattazione è quello della saldatura, che per definizione è "l'operazione, e la tecnica, che consente di unire intimamente, sotto l'azione del calore e della pressione, due pezzi con metallo base (cioè quello di cui sono costituiti i pezzi da saldare) oppure con metallo d'apporto, in modo da realizzare nei tratti di collegamento (giunti saldati) la continuità metallica fra i pezzi stessi" [1]. La saldatura tradizionale, quindi, avviene portando il materiale da saldare ad una temperatura superiore a quella di fusione, operazione che comporta un grande di utilizzo di energia e la creazione di fumi e vapori che possono essere nocivi per l'operatore e per l'ambiente. Allora, nel 1991, presso il The Welding Institute di Cambridge, fu sviluppata la Friction Stir Welding (saldatura per attrito), un tipo di saldatura che avviene sfruttando solamente il calore generato sulla zona da saldare tramite l'attrito di un utensile che ruota ad una certa velocità premendo sulla superficie e avanzando contemporaneamente. Questa tecnica permette una notevole diminuzione dei consumi di energia, non porta il materiale alla temperatura di fusione, diminuisce i vapori generati dal processo e per questo può essere definita maggiormente ecosostenibile rispetto alla saldatura tradizionale. Inoltre, gli ultimi studi si stanno concentrando sull'utilizzo di questa tecnica su ampia scala di produzione, in quanto fino ad ora è stata utilizzata principalmente in settori di nicchia e di alta precisione (ad esempio industria aerospaziale o aeronautica) e non solo su materiali metallici, ma anche su materiali plastici, molto più leggeri e meno costosi rispetto ai metalli, ma allo stesso tempo con proprietà meccaniche molto elevate.

Contemporaneamente si stanno sviluppando anche delle tecniche di additive manufacturing, anche detta stampa 3D, che consiste nella creazione di oggetti aggiungendo diversi layers di materiale uno sopra all'altro, fino ad ottenere la forma finale dell'oggetto desiderata. Nonostante gli svantaggi di questa tecnica, che è ancora abbastanza lenta, poco utilizzata per produzioni su larga scala e ha dei limiti per quanto riguarda le dimensioni degli oggetti da creare, si stanno facendo grandi progressi nel suo utilizzo. In particolare, l'utilizzo delle tecniche FDM (Fused Deposition Modelling)

sta rendendo la stampa 3D accessibile ad un pubblico sempre maggiore di utenti e sempre più veloce e semplice da svolgere. Tra i maggiori vantaggi di questa tecnica troviamo la quasi totale assenza di materiale di scarto e la possibilità di creare oggetti con forme complesse senza dover ricorrere a successive operazioni. Per questo motivo anche le tecniche di additive manufacturing possono essere considerate maggiormente ecosostenibili rispetto alle tradizionali operazioni per asportazione.

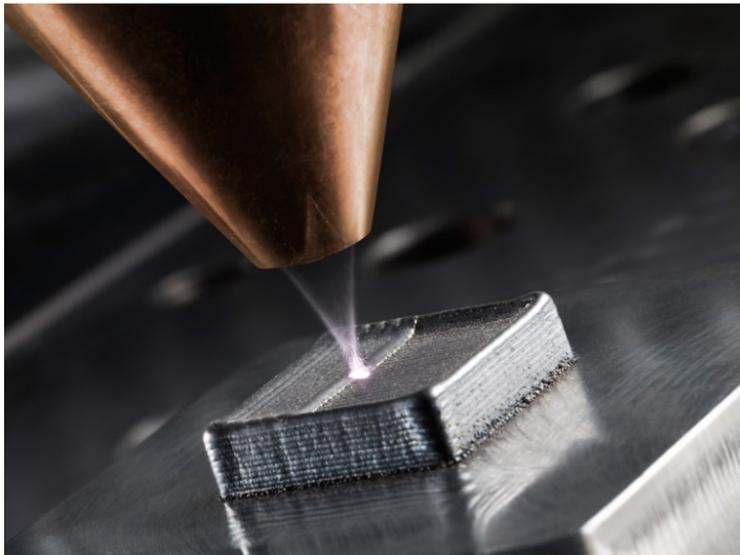
Nel seguito della trattazione saranno prese in considerazione entrambe le tecniche precedentemente introdotte: in particolare, si andrà a studiare la resistenza dei cordoni di saldatura ottenuti tramite FSW su delle piastre in ABS, create tramite stampa 3D, attraverso prove di trazione e prove di flessione svolte in laboratorio, che permetteranno di determinare come cambiano le proprietà meccaniche al variare dei parametri di saldatura. Il motivo per cui si è deciso di svolgere questo particolare studio sta nel fatto che fino ad ora la FSW è stata applicata principalmente su materiali metallici e si sa ancora molto poco del suo utilizzo su materiali polimerici. Le seguenti prove che verranno svolte, naturalmente, non puntano ad indagare e risolvere tutti i quesiti aperti in questo nuovo campo, ma sono un modo per fare un passo avanti verso l'utilizzo di tecniche e materiali più ecosostenibili e con proprietà meccaniche migliori, seguendo a pieno il concetto di innovazione di cui si è parlato all'inizio.

# 1. Additive Manufacturing (AM)

## 1.1. Generalità sull'additive manufacturing

L'additive manufacturing (AM), come definita da Nurhudan et al., è una tecnica di fabbricazione utilizzata per creare un oggetto strato per strato utilizzando la progettazione assistita da computer (CAD) [2].

Secondo la Norma ISO-ASTM F2792-10 [3], la fabbricazione additiva contempla le tecnologie che sfruttano un "processo di unione di materiali per ottenere oggetti da modelli 3D, usualmente attraverso deposizione di strati successivi, al contrario delle tecniche di fabbricazione sottrattiva quali le tradizionali lavorazioni alle macchine utensili".



*Figura 1 – Esempio di Additive Manufacturing di un oggetto metallico [4]*

Anche detta stampa 3D, questa tecnica, un cui esempio si può vedere in Figura 1, permette di creare oggetti con forme molto più complesse rispetto alle classiche tecniche di lavorazione utilizzate, come fresatura o tornitura, in tempi minori, con minori sprechi di materiale, in quanto l'oggetto finale non si ricava per asportazione di materiale (creazione di trucioli e scarti) ma per aggiunta, e a volte anche con minori consumi di energia. Inoltre, l'alleggerimento delle strutture è reso possibile dall'uso di strutture trabecolari e dall'uso di parti a sezione variabile, utilizzando il materiale solo dove questo è necessario ai fini della resistenza. Infine, tramite l'AM è anche possibile implementare canali interni a geometria complessa o produrre insieme di parti pre-assemblate in un'unica fase. [5]

Allo stesso tempo, gli oggetti prodotti mediante AM hanno anche dei limiti, come le dimensioni massime che possono raggiungere, che dipendono dalla dimensione della stampante utilizzata, o le proprietà meccaniche, che possono essere inferiori rispetto a quelle ottenute tramite lavorazioni convenzionali, soprattutto a causa della possibile presenza di tensioni residue all'interno del materiale e del fatto che il materiale stampato è anisotropo. Un altro aspetto importante è quello della finitura superficiale: si stanno sviluppando tecniche che permettono di avere finiture sempre migliori, che permettano di non dover migliorare le superfici tramite lavorazioni classiche. [6]

Inoltre, la stampa 3D può essere ottenuta con tantissimi tipi diversi di materiali: metalli, materiali ceramici, vetro, materiali plastici o con combinazioni di materiali diversi, che possono trovarsi sotto forma di polvere, trucioli o filamenti.

I primi sviluppi dell'additive manufacturing furono ottenuti da Hideo Kodama nel 1980, quando sviluppò una luce ultravioletta in grado di indurire e solidificare un materiale. Nel 1990 Charles Hull sviluppò la stereolitografia (SLA) e nel 1991 Scott Crump sviluppò la tecnica di modellazione a deposizione fusa (FDM). Questi ultimi svilupparono tecniche in grado di stampare in 3D solamente polimeri plastici, mentre solamente nei primi anni '90 Ely Sachs sviluppò una tecnica di stampa che impiega materiali metallici. Successivamente Carl Deckard sviluppò la sinterizzazione laser diretta del metallo (DMLS), una tecnica in grado di creare un oggetto a partire dalla polvere metallica tramite una fonte ad elevata intensità di energia. Da quel momento in poi sono state sviluppate tantissime altre tecniche di additive manufacturing di materiali metallici, come ad esempio: la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS), la Deposizione Diretta di Metallo (DMD), e molte altre, come affermato in un articolo di A. Nurhudan et al. [2]

Con il passare degli anni le tecniche di additive manufacturing sono diventate sempre meno costose e di uso più comune, arrivando ad interessare una platea molto ampia, tanto da poter arrivare potenzialmente nelle case di tutti. Allo stesso tempo il grande sviluppo di queste tecniche permette di pensare di utilizzarle non solamente nell'ambito della prototipazione industriale, ma anche in quello della produzione industriale vera e propria.

## 1.2. Tecniche di additive manufacturing

Esiste una vasta gamma di tecnologie additive, per questo è conveniente dividerle in alcune famiglie che consentono di distinguerne le caratteristiche principali.

La prima famiglia è composta dai processi di deposizione diretta, basati sull'estrusione, che prendono origine da altre tecniche di deposizione già utilizzate industrialmente (PTA, TIG) spinte alla creazione di spessori rilevanti e per ottenere pareti estese o volumi pieni. Molte delle applicazioni basate sulla deposizione diretta sono sviluppate anche per grandi strutture e si basano sulla fusione di polvere metallica o filo.

Esistono anche i processi di deposizione da letto di polvere, che si basano sulla rifusione localizzata di strati successivi di polvere mediante un fascio laser o degli elettroni in grado di creare un volume tridimensionale. Il processo si svolge all'interno di una camera di dimensioni relativamente contenute e con atmosfera di gas inerte oppure sottovuoto (nel caso del fascio elettronico).

Infine, esistono anche dei processi ibridi che combinano tecniche di deposizione diretta con tecniche sottrattive classiche in un unico centro di lavoro. [5]

È importante ricordare come le tecniche di additive manufacturing si differenziano in base al materiale che viene utilizzato nel processo. In particolare, nei paragrafi successivi l'attenzione sarà rivolta su tecniche utilizzate per lo stampaggio di polimeri. Per completezza della trattazione è giusto citare anche qualche tecnica di AM utilizzata per lo stampaggio di metalli.

Come affermato da E. Mariani [7], tra le principali tecniche troviamo la Selective Laser Melting (SLM), tecnica che realizza i componenti attraverso la fusione selettiva di un letto di polvere e che con adeguati accorgimenti durante il processo può produrre componenti con densità molto vicina al 100% e senza porosità. La SLM è un'ottima alternativa ai tradizionali processi di lavorazione per deformazione plastica e di fonderia in cui, come avviene per questi ultimi, è importante considerare un sovrametallo per permettere lavorazioni ad asportazione di truciolo, necessarie a migliorare la finitura superficiale dell'oggetto realizzato.

L'Electron Beam Melting (EBM) è una tecnica di fabbricazione additiva per metalli che sfrutta il principio di fondere in maniera selettiva un letto di polvere ma si differenzia dalla SLM in quanto non utilizza una sorgente laser bensì un fascio di elettroni. Questa

tecnologia è in grado di realizzare prototipi funzionali in materiale metallico o componenti definitivi con una densità prossima al 100%.

La Laser Deposition Technology (LDT) è una tecnica che non sfrutta il principio di portare a fusione un letto di polvere, ma consiste nell'apportare direttamente il materiale nella zona interessata sfruttando un principio simile alla saldatura. È una tecnologia molto interessante per il futuro ma tutt'ora è caratterizzata da problematiche che ne limitano una più ampia diffusione.

A questo punto ci si può concentrare sulle tecnologie additive più utilizzate per i polimeri plastici.

### **1.2.1. Fused Deposition Modelling (FDM)**

I processi di additive manufacturing del tipo FDM sono processi basati sull'estrusione di materiale plastico: costituiscono un metodo molto versatile per creare oggetti tridimensionali strato dopo strato usando vari tipi di materie prime (filamenti, pellets oppure inchiostri). In base al tipo di materia prima che viene utilizzato si adotteranno vari sistemi di estrusione. Grazie alla sua versatilità e all'essere stata la prima tecnologia in grado di realizzare componenti con un materiale termoplastico definitivo è una delle tecniche più conosciute in assoluto. Inoltre, è anche la tecnica di stampa 3D utilizzata per creare le piastrine che saranno alla base delle prove sperimentali che verranno analizzate nel seguito della tesi.

Come affermato da A. Nurhudan et al. [2], esistono diversi tipi di processi FDM, che si differenziano in base alla forma nella quale si trova il materiale, ma in tutti i casi il principio alla base della lavorazione è che il materiale plastico viene riscaldato e portato a temperature tali per cui la colata non sia troppo liquida (comprometterebbe la precisione della lavorazione) ma nemmeno troppo solida (impedirebbe l'adesione del nuovo materiale con quello già depositato) e tramite un estrusore, che fa uscire il materiale dall'ugello, viene depositato strato dopo strato. Si possono distinguere tre diversi tipi di processi basati sull'estrusione: il tipo a siringa o a stantuffo, il tipo a filamento e quello a vite. In tutti i casi il processo di manifattura inizia con la preparazione del materiale, che è creato mescolando una polvere plastica con un legante, per ottenere un filamento, granuli, ecc. Successivamente avviene l'operazione di stampa vera e propria seguita dai vari processi che servono per rifinire l'oggetto: ad

esempio, deceraggio per rimuovere il sistema legante o la sinterizzazione per comprimere l'oggetto.

### 1.2.1.1. Additive manufacturing per estrusione a siringa o a stantuffo

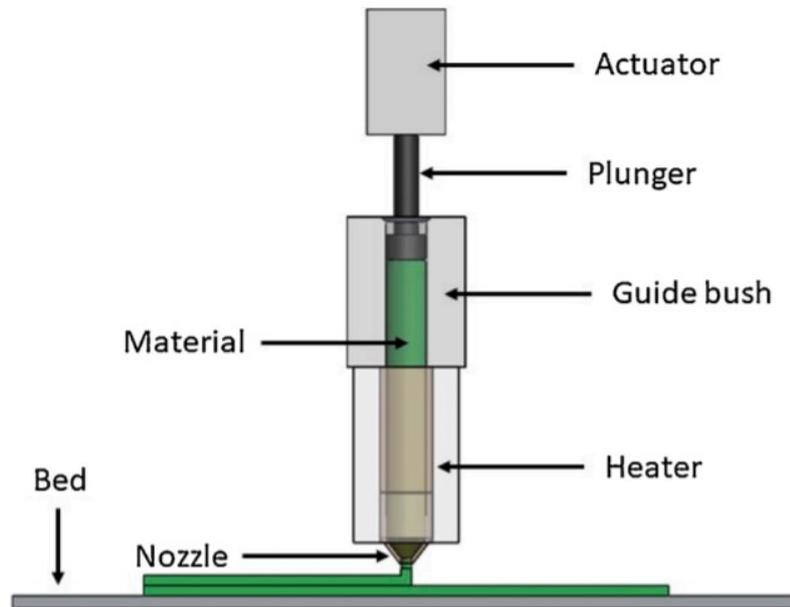


Figura 2 – Schema di AM per estrusione a siringa o a stantuffo [2]

Come si può dedurre dall'articolo di A. Nurhudan et al. [2], il tipo di materiale utilizzato nelle macchine che svolgono additive manufacturing per estrusione a stantuffo è una barra di materia prima prodotta tramite la solidificazione delle sostanze chimiche che compongono il polimero plastico. Queste cartucce di materiale vengono inserite nella macchina dove, come si può vedere nella Figura 2, un estrusore (actuator) le spinge, attraverso una boccia di guida (guide bush), verso un elemento che le riscalda (heater) e che le sottopone ad un processo di plastificazione fino a che il materiale può essere spinto fuori dall'ugello (nozzle) per formare l'oggetto che vogliamo stampare strato per strato sul letto (bed). Il processo di stampa inizia quando il materiale si riscalda e viene spinto dallo stantuffo azionato dall'estrusore: la temperatura raggiunta dall'elemento che scalda dovrebbe essere superiore al punto di fusione del materiale per permettere una corretta deposizione del materiale. Una volta che il materiale esce dall'ugello crea il nostro oggetto 3D in base al percorso da seguire che viene programmato per la macchina.

### 1.2.1.2. Additive manufacturing per estrusione a filamento

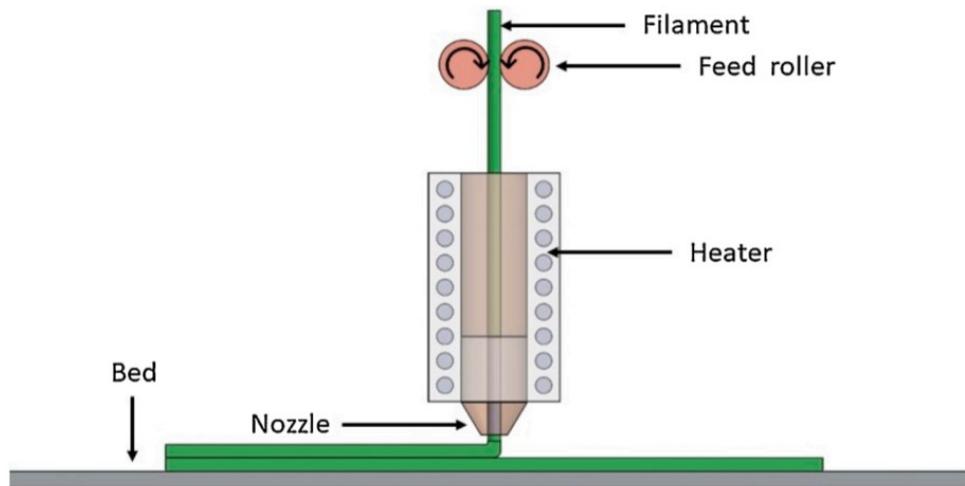


Figura 3 – Schema di AM per estrusione a filamento [2]

Dall'articolo di A. Nurhudan et al. [2] è possibile ricavare che la tecnica di additive manufacturing detta propriamente FDM è quella sviluppata per la prima volta dall'azienda produttrice di stampanti 3D Stratasys: è una tecnica di estrusione anche detta Fused Filament Fabrication (FFF) che si basa sull'utilizzo di materiale sotto forma di filamento. È una tecnica molto diffusa ed utilizzata perché il processo di fabbricazione è semplice, sicuro e i componenti utilizzati sono economici. Come è possibile osservare dalla Figura 3, in questo caso il materiale è guidato da un estrusore a rulli (feed roller) che lo spinge attraverso l'elemento riscaldatore (heater), che anche in questo caso ha il compito di scaldare il materiale e portarlo ad uno stato quasi liquido. A questo punto il materiale viene spinto attraverso l'ugello (nozzle) e viene depositato strato per strato sulla superficie di lavoro (bed). I materiali che vengono maggiormente utilizzati con questo tipo di lavorazione sono materiali termoplastici: ABS, PC-ISO, ABS-M30, PC, ABS-M30i, FDM Nylon 12 e molti altri.

### 1.2.1.3. Additive manufacturing per estrusione a vite

Come descritto da A. Nurhudan et al. [2], questo processo è molto simile ai due processi per estrusione visti precedentemente e ciò si può notare nella Figura 4: ciò che lo differenzia è che il materiale, sotto forma di granuli, è movimentato da un motore (motor) che attraverso una vite spinge il materiale prima in un convogliatore (hopper) e poi verso il sistema di riscaldamento (heater) e verso l'ugello (nozzle). Si ritiene che

questo processo sia il più stabile grazie alla sua continuità e al fatto che il materiale è distribuito nell'ugello in maniera ottimale. D'altra parte, però, è fondamentale controllare la dimensione dei pellet ed è importante che sia omogenea.

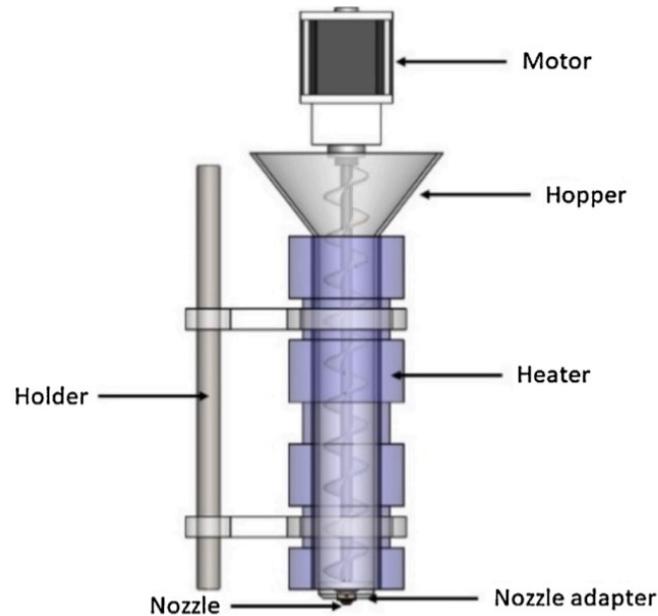


Figura 4 – Schema di AM per estrusione a vite [2]

#### 1.2.1.4. Direct Ink Writing (DIW) ed estrusione reattiva

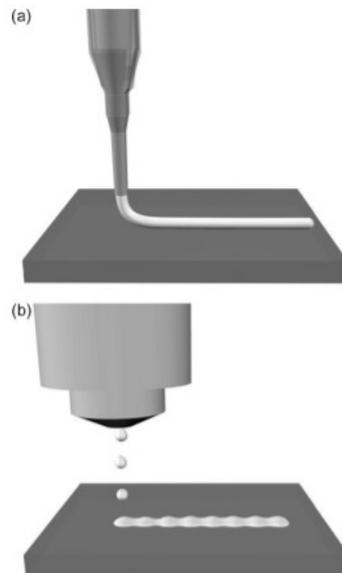


Figura 5 – Schema di DIW a filamento continuo (a) e a getto di gocce (b) [6]

Come afferma S. Yuan et al. [6], la DIW e l'estrusione reattiva sono processi di AM sviluppati recentemente per depositare in maniera additiva un liquido reattivo su una superficie, dove verrà immediatamente sottoposto a sorgenti termiche o ultraviolette

(UV) per formare delle strutture solide. Solitamente in questo tipo di processo vengono aggiunte fibre o altri tipi di additivi al materiale plastico usato per lo stampaggio in modo da modificarne la viscosità e renderlo in grado di mantenere la propria forma durante la solidificazione. Le resine maggiormente utilizzate per questi processi sono la resina fotoindurente a base acrilica e la resina epossidica termoindurente, che, come è possibile osservare in figura, possono essere stampate tramite filamento continuo (a) o a getto di gocce (b).

### 1.2.2. Selective Laser Sintering (SLS)

I processi di AM basati sull'utilizzo di polveri plastiche sono tecniche che permettono di costruire oggetti solidi in 3D depositando strati successivi di polvere e sinterizzando o creando legami selettivamente solo per alcune sezioni utilizzando fonti di calore o leganti plastici. Queste tecniche includono, tra le altre, la Selective Laser Sintering (SLS), che ha come vantaggi la possibilità di utilizzare nuovi tipi di polimeri e, soprattutto, la possibilità di creare oggetti con forme molto complesse senza la necessità di creare strutture di supporto, diversamente da quanto avviene per le tecniche FDM.

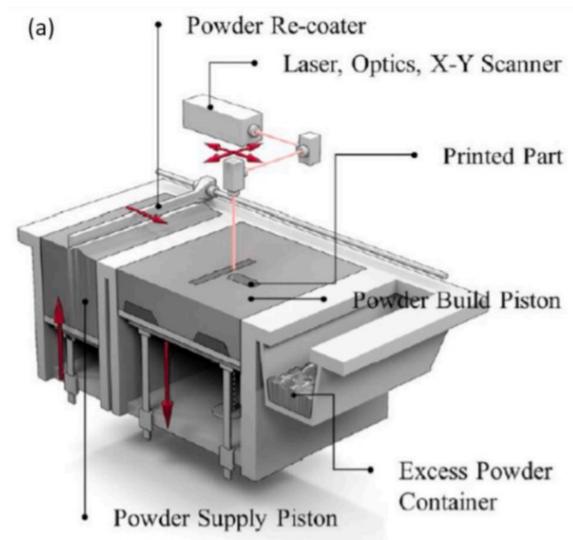


Figura 6 – Schema di AM tramite Selective Laser Sintering [6]

La SLS è una tecnica che si basa sull'utilizzo di un raggio laser che, fornendo necessaria energia termica, innesca nelle zone scelte la fusione della polvere termoplastica a pressione atmosferica, come mostrato nella Figura 6. La polvere viene riposizionata sopra al letto precedente di volta in volta e viene livellata tramite un rullo: la polvere che non viene fusa rimane all'interno della macchina e funge da supporto

per l'oggetto che si va a stampare strato su strato. La caratteristica di questo processo è che, grazie all'utilizzo della polvere, è possibile creare contemporaneamente più oggetti diversi uno sopra l'altro e separati. Naturalmente, il tipo di materiale utilizzato è importante e la sua composizione determina la morfologia, la configurazione della polvere, i parametri del processo e le caratteristiche meccaniche e microstrutturali dell'oggetto creato: spesso ai materiali vengono aggiunti additivi specifici per ottenere migliori proprietà.

### 1.3. Materiali usati nell'additive manufacturing

L'additive manufacturing ai giorni nostri offre un ampissimo range di applicazioni, che varia in settori come l'aerospaziale, la difesa, la medicina, l'elettronica, l'ingegneria civile, l'automotive, ecc. Naturalmente, come avviene un certo progresso per quanto riguarda le tecnologie additive, avviene contemporaneamente anche un avanzamento nel campo dei materiali utilizzati: metalli, polimeri, materiali compositi, ceramiche, materiali biodegradabili, ecc. Nell'ultimo periodo, come sta avvenendo un po' in tutti i settori, si sta cercando di sviluppare materiali adatti alla stampa 3D che siano il meno tossici possibili per l'uomo, che comportino la creazione di poche emissioni e che siano rinnovabili e biodegradabili. Queste ricerche sono fondamentali perché i processi di AM sono sempre meno costosi e più diffusi ed un utilizzo di materiali non adatti può portare a gravi problemi di tipo ambientale, ma anche per la salute di chi li utilizza. Come già scritto precedentemente, esistono moltissimi tipi di materiali da utilizzare e tra i più utilizzati troviamo i polimeri, che analizzeremo nel dettaglio successivamente, perché di maggiore interesse nelle prove che andremo ad analizzare nel resto della tesi. Per completezza, però, è giusto descrivere brevemente anche altri materiali utilizzati, come viene riportato da A. Bathia et al. [8] nella sua review.

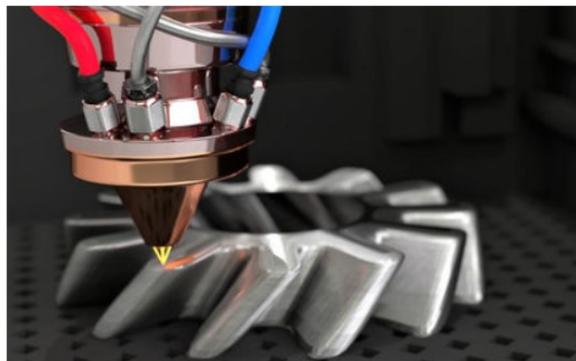


Figura 7 – Stampa 3D di un ingranaggio in materiale metallico [9]

È possibile utilizzare i metalli e le leghe metalliche per svolgere processi di additive manufacturing, anche se principalmente sono utilizzati per creare prototipi e per produzioni su piccola scala, come nell'industria aerospaziale, aeronautica, automobilistica e in campo biomedico. Rispetto alle lavorazioni convenzionali, l'additive manufacturing permette di ottenere oggetti in materiale metallico con geometrie molto più complesse, ma con proprietà meccaniche comunque molto elevate. I materiali maggiormente utilizzati sono il titanio e le sue leghe, le leghe del nichel, gli acciai inossidabili e quelli per utensili, le leghe d'alluminio, il rame, l'argento, l'oro, il platino, ecc. Il problema dei metalli usati nei processi di AM è che il costo dei processi è molto elevato e la produttività delle stampanti molto bassa.



*Figura 8 – Trachea artificiale ottenuta con stampa 3D [8]*

I biomateriali sono i più usati nel settore sanitario e la stampa 3D in questo campo sta assumendo un'importanza sempre maggiore, grazie all'incremento della precisione, della velocità di stampaggio, della capacità di stampare oggetti complessi e grazie alla riduzione dei costi e degli sprechi di materiale. Con le tecnologie attuali, come la risonanza magnetica per immagini (MRI), è possibile stampare parti di organi danneggiati per poterle sostituire, o anche parti di tessuti o della dentatura, come è possibile vedere in Figura 8, che mostra una trachea ottenuta tramite AM. I materiali maggiormente usati sono i materiali metallici biomedici (acciaio inossidabile per impianti dentali, leghe di titanio, leghe di tantalio, leghe di cobalto-cromo, ecc.), i materiali polimerici biomedici (PEEK, collagene, chitosano, ecc.) e i materiali ceramici biomedici (TCP, HA, ecc.). Tutti quelli citati sono materiali che hanno una buona biocompatibilità e che rispettano certi standard medici.

I materiali compositi sono la combinazione di due o più costituenti che hanno diverse proprietà fisiche e chimiche: sono materiali che permettono di ottenere migliori proprietà rispetto ai propri costituenti presi individualmente. Il loro utilizzo nel campo dell'AM sta aumentando molto grazie al loro basso costo, alla loro facile reperibilità, le elevate proprietà e l'alta precisione rispetto ai metodi tradizionali. I materiali compositi maggiormente presenti nel mercato sono: materiali compositi rinforzati con particelle, materiali compositi rinforzati con fibre naturali o con fibre sintetiche, compositi rinforzati con nanomateriali, compositi a base di grafene, ecc.

Nei processi di additive manufacturing sono anche utilizzati i materiali ceramici, che sono duri, fragili e resistenti al calore e alla corrosione. Questi materiali sono utilizzati nel settore aerospaziale, nell'industria automobilistica ma anche in ambito medico, per creare impianti dentali e ossa. I materiali più usati sono il carburo di silicio, i carburi silicio-silicio, i composti vetro-ceramici, ecc.



*Figura 9 – Ponte Castilla-La Mancha, Madrid, interamente stampato in 3D [10]*

Il calcestruzzo è il materiale più comunemente usato tra quelli da costruzione ed è usato per costruire case, ponti, uffici e molto altro. Lo stampaggio del calcestruzzo è un processo che si sta sviluppando molto velocemente perché permette di svolgere certi lavori con molto meno tempo, a prezzi molto più bassi, con minori sprechi di materiale e con l'utilizzo di molta meno manodopera. È molto interessante notare come questa tecnica potrebbe essere utilizzata in futuro per costruire strutture in altri pianeti al di fuori della Terra. In Figura 9, ad esempio, è possibile osservare un ponte a Madrid costruito interamente utilizzando tecniche di stampa 3D.

Un altro settore che potrebbe essere rivoluzionato dall'additive manufacturing è quello del cibo: lo stampaggio di cibo è molto veloce e permette al consumatore di personalizzare il proprio cibo individualmente e ciò porterà ad un'esplosione di questo mercato.

Infine, tra i materiali usati per lo stampaggio 3D troviamo anche gli smart materials, che sono materiali che hanno la capacità di cambiare forma, colore e dimensioni in base ai cambiamenti di luce, temperatura, tensione e rispetto al tempo. Inoltre, sono materiali che hanno anche proprietà come la shape-memory, self-sensing, self-evolving, decision making, self-adaptability, self-assembly, ecc.

### 1.3.1. Materiali polimerici

Dagli studi di A. Bathia et al. [8], J. M. Jafferson et al. [11] e T. D. Ngo et al. [12], emerge che i polimeri sono i materiali più comuni e più usati nell'additive manufacturing grazie alla loro facile reperibilità, al basso costo, alle buone proprietà meccaniche e alla facilità di essere utilizzati per diversi processi di stampa 3D e rappresentano circa il 14,7% dello stampaggio 3D. Tra i vari materiali polimerici è possibile fare una prima classificazione tra materiali amorfi e materiali semi-cristallini, per poi dividerli in: materiali per uso generale, materiali per l'ingegneria e materiali ultra-performanti (vedi Figura 10).

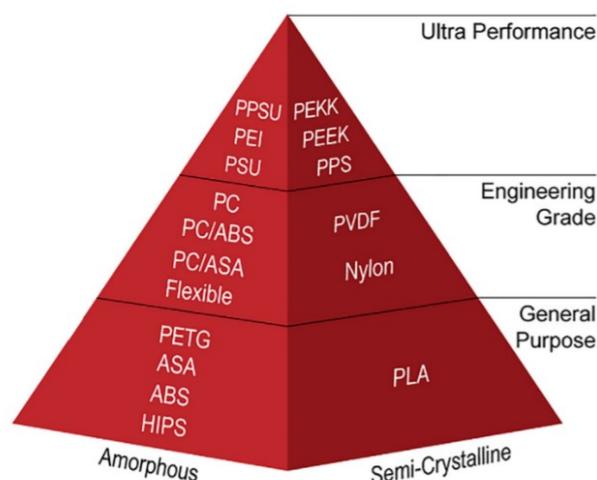


Figura 10 – Piramide rappresentante i vari tipi di materiali polimerici utilizzati nell'AM [12]

In generale, non è possibile confrontare, le proprietà meccaniche di tutti i materiali polimerici con quelle di altri materiali, come i metalli, poiché ogni polimero ha le proprie caratteristiche specifiche. Quello che si può tranquillamente affermare è che esistono alcuni polimeri che hanno resistenza allo snervamento e massima resistenza alla

trazione molto elevati, tanto da poter essere tranquillamente utilizzati in campo automobilistico. Per quanto riguarda la flessibilità, i polimeri possono essere allungati fino a dieci volte la loro lunghezza iniziale, molto di più rispetto a quello che avviene per metalli e materiali ceramici. Inoltre, i polimeri sono molto più resistenti alla corrosione ed hanno un peso specifico molto inferiore rispetto ai metalli. Uno dei lati negativi dei polimeri è la bassa temperatura di fusione, se paragonata a quella dei metalli, che limita il loro utilizzo in molti ambiti. I parametri che influenzano maggiormente le proprietà meccaniche degli oggetti che vengono creati sono lo spessore dei singoli livelli di materiale, la larghezza e l'orientamento dei filamenti e gli spazi vuoti (air gaps) tra un filamento e l'altro. Invece, è stato appurato che la causa più importante che porta a debolezze meccaniche è la distorsione tra i vari livelli.

I polimeri maggiormente utilizzati sono l'Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS), il Nylon, l'Acrilico Stirene Acrilonitrile (ASA), Polistirene Antiurto o Polistirene ad Alto Impatto (HIPS), l'Acido Polilattico (PLA), il Policarbonato (PC), il Poliestere Termoplastico (TPC), ecc. La maggior parte dei polimeri è utilizzata nel settore sanitario, nell'industria aeronautica, nell'industria automobilistica, nella fabbricazione di giocattoli, nell'industria elettronica, ecc. Tra tutti i polimeri i più utilizzati sono l'ABS e il PLA e, dato che le prove descritte nel seguito della tesi saranno eseguite su piastre di ABS, è opportuno svolgere un approfondimento a parte su quest'ultimo materiale, mentre il PLA verrà trattato più velocemente.

Il PLA è un poliestere alifatico termoplastico biodegradabile e bioattivo derivato da risorse rinnovabili e naturali come canna da zucchero, amido di mais o radici di tapioca. Il particolare, il PLA è la combinazione di due monomeri principali: il diestere ciclico ed il lattide acido, ed è ottenuto dalla fermentazione batterica delle materie prime precedentemente citate. Il materiale che si ottiene è un solido semicristallino ed amorfo, con buone proprietà meccaniche rispetto ai polimeri tradizionali e con temperatura di transizione vetrosa a 55°C e temperatura di fusione a 180°C. I metodi principalmente usati per l'additive manufacturing del PLA sono le tecniche FDM, la stereolitografia (SLA) e tecniche di laminazione (LOM).

### **1.3.1.1. Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS)**

Dagli studi di A. Bathia et al. [8] è possibile si ricava che l'ABS è un polimero termoplastico molto comune e la ragione principale della sua popolarità è da ritrovarsi

nella facilità con la quale può essere reperito e nelle sue buone proprietà meccaniche. La produzione di ABS è facile e conveniente: attualmente l'ABS è ottenuto dalla polimerizzazione di acrilonitrile e stirene in presenza di polibutiadene. Questi monomeri sono mixati chimicamente a diverse proporzioni: solitamente dal 15% al 35% di acrilonitrile, dal 40% al 60% di stirene e dal 5% al 30% di butiadene. L'ABS è più resistente del polistirene puro grazie alla presenza del gruppo nitrile, mentre lo stirene conferisce una superficie brillante all'ABS e il polibutiadene conferisce durezza al materiale anche a basse temperature. L'ABS è un solido amorfo che non ha un vero e proprio punto di fusione, mentre ha una temperatura di transizione vetrosa di 105°C: nella maggior parte dei casi è utilizzato a temperature tra -20°C e 80°C perché le proprietà meccaniche del materiale variano con la temperatura.



*Figura 11 – Esempio di piastrine di ABS [8]*

L'ABS è un materiale riciclabile: può essere ricavato dagli scarti di apparecchiature elettriche ed elettroniche. Però, durante il riciclaggio possono verificarsi difetti di vuoto dovuti principalmente alla presenza di sostanze che si volatilizzano durante il processo. La presenza di vuoti porta ad un incremento della resistenza a flessione, ma anche ad una diminuzione della duttilità e delle proprietà meccaniche.

Come affermato nel sito web A&C Plastics INC [13], gli usi dell'ABS spaziano in tantissimi campi. Innanzitutto, l'ABS è molto utilizzato nell'industria automobilistica, grazie alla leggerezza che lo contraddistingue dalle altre plastiche e che permette di diminuire il peso dei veicoli anche fino al 10%, rendendoli più efficienti e riducendone i consumi di carburante. Tipicamente è un materiale utilizzato per i cruscotti delle macchine, per i copricerchi e in generale per altre parti del telaio dell'automobile, grazie

alla sua resistenza meccanica, resistenza alle basse temperature e alla superficie ruvida che non si graffia facilmente. L'ABS è anche molto utilizzato come materiale da costruzione 3D, grazie al suo basso punto di fusione, che lo rende facile da lavorare, ma che è comunque superiore a quello di altri materiali come il PLA: tali caratteristiche lo rendono molto usato nel campo della prototipazione. Inoltre, è un materiale molto usato anche per costruire tubi e raccordi, grazie alla sua leggerezza e facilità di installazione, ma anche grazie al fatto che è un materiale molto duraturo nel tempo e resistente alle muffe e alla corrosione. Infine, l'ABS è molto usato anche nell'ambito della componentistica elettronica.

## **2. Friction Stir Welding (FSW)**

### **2.1. Generalità sul Friction Stir Welding**

Attualmente l'industria sta rivolgendo particolare attenzione ad un nuovo tipo di saldatura, detto Friction Stir Welding (FSW), caratterizzata dal fatto che il giunto saldato viene ottenuto allo stato solido per attrito tramite un utensile che porta ad un rimescolamento di materiale, senza che venga raggiunta la temperatura di fusione. I principali motivi dell'elevato interesse per questo tipo di saldatura sono da ritrovarsi nel fatto che permette di risparmiare molta energia, è un processo eco-friendly, molto versatile e permette anche di evitare l'apporto di nuovo materiale sugli oggetti saldati, caratteristica molto ricercata in campi come quello navale, aeronautico e dell'automotive. Inoltre, poiché la giunzione avviene per deformazione plastica, nella zona del giunto abbiamo un materiale caratterizzato da una microstruttura a grani fini che dà al giunto caratteristiche meccaniche molto elevate, a volte anche superiori a quelle del materiale base. In aggiunta, bisogna anche ricordare come il FSW permetta di eliminare alcuni difetti dei metodi convenzionali di saldatura: grandi distorsioni, cricche di solidificazione, strutture dendritiche grossolane, gas e porosità da ritiro, scolorimento o ossidazione, elevato aumento di temperatura nella zona di saldatura, inclusioni solide, formazione di giunti fragili tra materiali diversi, ecc.

Dagli articoli di M. El-Sayed et al. [14], K. Singh et al. [15] e C. Gambaro et al. [16] è possibile ricavare le informazioni generali sulla FSW, che è una tecnica di saldatura che fu sviluppata per la prima volta nel 1991 da Thomas, presso il TWI (The Welding

Institute) di Cambridge, nel Regno Unito: da quel momento in poi il processo di FSW è stato migliorato e sono state sviluppate molte altre tecniche di saldatura simili basate sullo stesso principio. Per definire il principio alla base del FSW è necessario descrivere lo strumento che viene utilizzato per effettuare la saldatura: questo è caratterizzato da un utensile rotante che può essere di diverse forme (molto spesso è cilindrico) e che solitamente è montato su una macchina CNC. La superficie dell'utensile a sezione maggiore e a contatto con il materiale da saldare è detta shoulder e su questa possiamo trovare una sporgenza detta pin: esistono utensili con il pin e utensili pin-less. L'attrito generato dalla rotazione e dall'avanzamento dell'utensile porta ad un aumento delle temperature nella zona di contatto e ad un ammorbidimento del materiale. La rotazione provoca il rimescolamento del materiale delle due piastre da saldare, come si può vedere in Figura 12, che dipende molto dai parametri di saldatura (forma dell'utensile, velocità di rotazione, velocità di saldatura, forza assiale, profondità di immersione del pin e angolo di inclinazione), e porta alla creazione del giunto saldato.

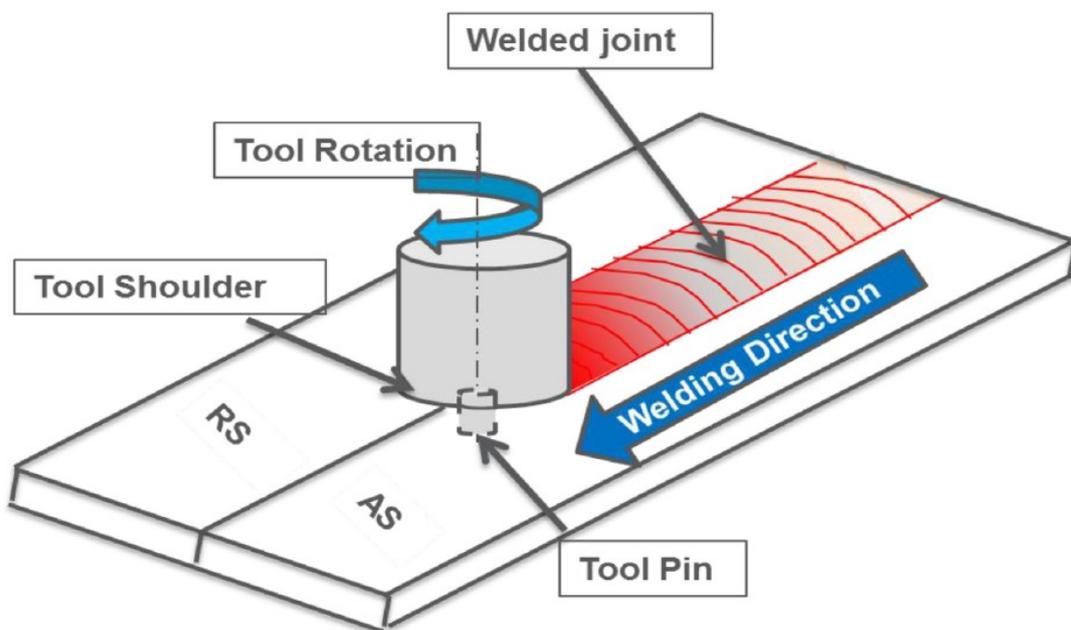
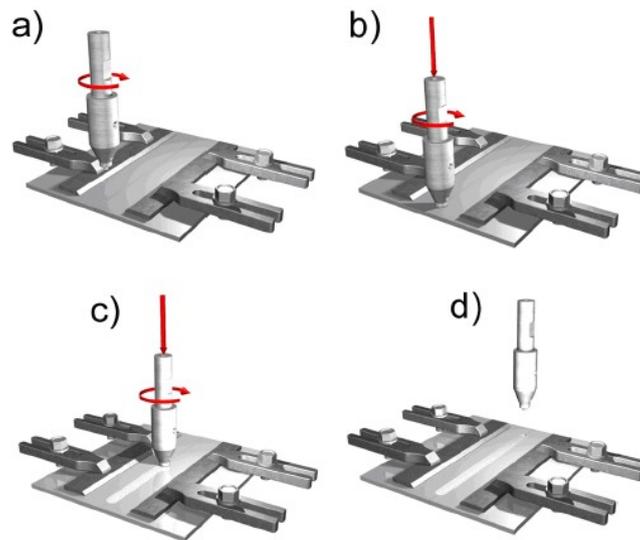


Figura 12 – Rappresentazione schematica di un processo di FSW [14]

Come si può vedere nuovamente dalla Figura 12, è possibile distinguere due lati della saldatura, che è asimmetrica, divisi dall'asse del giunto saldato: l'Advancing Side (AS), in cui la velocità periferica e quella di avanzamento dell'utensile sono concordi, anche detto lato caldo, e il Retreating Side (RS), in cui le due velocità sono discordi, e che viene anche denominato lato freddo.

In particolare, è interessante descrivere le varie fasi in cui si divide il processo di saldatura, che sono schematizzate in Figura 13.



*Figura 13 – Fasi del processo di FSW [16]*

- a) L'utensile, messo in rotazione, si appoggia sul materiale da saldare in corrispondenza della linea di contatto dei due lembi.
- b) Grazie alla forza assiale esercitata dalla macchina, mantenendo l'utensile in rotazione, il pin penetra nella zona plasticizzata fino a che la shoulder tocca la superficie del materiale da saldare e rimane fermo nella stessa posizione per un certo periodo, in modo da aumentare la temperatura del materiale
- c) L'utensile, mantenendo il suo moto di rotazione, trasla lungo la linea di contatto dei lembi: è in questa fase che il materiale viene rimescolato da un lembo all'altro e viene trasferito dietro l'utensile, creando sulla superficie i caratteristici "anelli di cipolla" (onion rings)
- d) Alla fine del giunto l'utensile viene sollevato e lascia sul materiale un foro non passante della stessa dimensione del pin. È interessante notare che, grazie all'impronta lasciata sul materiale, è possibile determinare il verso con cui avviene la saldatura.

Definite le varie fasi del processo di FSW bisogna sottolineare che il flusso del materiale e l'energia consumata durante la saldatura dipendono dal design dell'utensile, mentre la velocità di rotazione e di saldatura influenzano il calore generato, così come la forza assiale. Inoltre, è possibile notare anche che la profondità di immersione del pin nel materiale e l'angolo di inclinazione dell'utensile influenzano molto la finitura superficiale del giunto e la sua efficienza.

Threadgill et al. hanno svolto uno studio nel 2009 nel quale hanno analizzato l'evoluzione della microstruttura di alcuni giunti in alluminio saldati tramite FSW e hanno riconosciuto la formazione di quattro diverse zone, come mostrato in Figura 14:

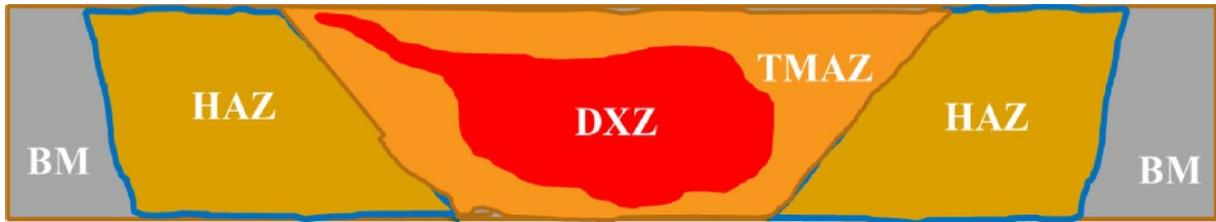


Figura 14 – Rappresentazione schematica della microstruttura di un giunto saldato tramite FSW [14]

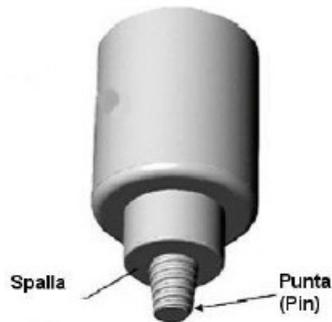
- Materiale Base (Base Material – BM): zona più lontana dal punto in cui avviene la saldatura, che non è caratterizzata da deformazione termica né plastica, in cui il materiale rimane allo stato vergine.
- Zona Termicamente Alterata (Heat Affected Zone – HAZ): zona soggetta ad un ciclo termico ma senza alcuna deformazione plastica, in cui il calore generato non ha alcun impatto sull'evoluzione della microstruttura del materiale.
- Zona Termo-Meccanicamente Alterata (Thermo-Mechanically Affected Zone – TMAZ): zona soggetta sia a deformazione termica che a deformazione plastica che modificano la microstruttura del materiale, ma senza che avvenga una ricristallizzazione a causa dell'insufficiente deformazione.
- Zona ricristallizzata dinamicamente (Dinamically Recrystallized Zone – DXZ): anche nota come “nugget zone”, è la zona in cui, grazie all'elevata deformazione plastica e alle elevate temperature, si innesca una ricristallizzazione dinamica dei grani. Questa regione è anche caratterizzata dalla presenza di strutture ad “anello di cipolla”, che si possono osservare in presenza di specifiche condizioni della saldatura.

### 2.1.1. L'utensile

L'utensile ha un ruolo fondamentale all'interno del processo di saldatura, poiché è l'elemento che genera il calore necessario a plasticizzare il materiale ed è, quindi, evidente la necessità di crearlo con un materiale che riesca a soddisfare certe caratteristiche. Generalmente, come affermato in molti articoli, tra cui quelli di V. P. Singh et al. [17], C. Gambaro et al. [16] e V. Califano et al. [18], il materiale dell'utensile viene scelto in base al materiale degli oggetti da saldare, in modo che l'utensile sia resistente alle sollecitazioni meccaniche, abbia elevata tenacità ed elevata durezza

alle alte temperature. Inoltre, deve essere estremamente resistente all'usura e deve avere un tasso di ossidazione trascurabile. Per saldature di metalli morbidi, come alluminio e magnesio, è possibile utilizzare l'acciaio per utensili, mentre per materiali più duri è necessario utilizzare materiali come il PCBN, un materiale ceramico. Naturalmente, i materiali vengono scelti anche in base al tipo di saldatura che viene effettuata, ma in ogni caso la durezza dell'utensile gioca un ruolo fondamentale nel definire la finitura superficiale del giunto.

Per quanto riguarda la geometria dell'utensile, possiamo dire che questo è costituito da due elementi fondamentali: il pin (la punta) e la shoulder (la spalla), come mostrato in Figura 15, che possono essere ricavati da un'unica o barra o essere realizzati separatamente, opzione giustificata dall'uso di materiali diversi per i due elementi, a causa delle differenti funzioni richieste.



*Figura 15 – Schema di un utensile per FSW [16]*

La punta è la parte dell'utensile che penetra nel materiale base ed opera l'azione di rimescolamento: è fondamentale che le caratteristiche meccaniche del pin siano superiori a quelle del materiale da giuntare e che si mantengano tali anche ad elevate temperature. La forma del pin può essere cilindrica, conica, o può avere altri profili particolari, come mostrato in Figura 16, che permettono di ottenere rimescolamenti diversi in base alle necessità, e spesso è presente una filettatura con senso dell'elica discorde rispetto al verso di rotazione dell'utensile in modo da migliorarne l'efficacia. La lunghezza del pin dipende dal tipo di saldatura che si esegue: solitamente è simile allo spessore dei lembi da saldare nel caso di saldatura testa a testa per materiali di spessore non troppo elevato, mentre è pari a circa la metà dello spessore nel caso di saldature di materiali di spessore più elevato o per saldature a doppia passata.

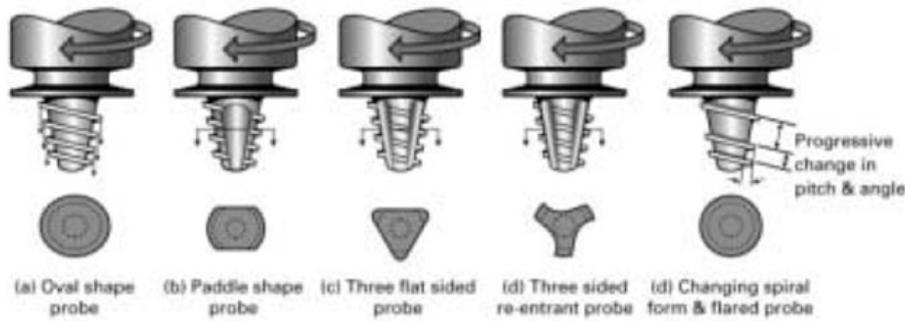


Figura 16 – Esempi di profili del pin [19]

La shoulder, invece, è la parte sovrastante il pin e solitamente è di forma cilindrica ed ha un diametro di alcune volte superiore rispetto a quello del pin: il suo compito è quello di produrre calore per attrito da trasmettere ai lembi da saldare e di mantenere il materiale plasticizzato nella zona della saldatura, evitandone la fuoriuscita, delimitando il cordone di saldatura. Inoltre, è stato dimostrato che il rapporto tra il diametro della shoulder e del pin è fondamentale e da questo dipende anche il calore generato e, quindi, le proprietà meccaniche del giunto. In particolare, uno studio svolto da S.M. Chowdhury et al. (2010) permette di definire queste equazioni:

$$Q_{shoulder} = \frac{2\pi}{3} \tau \omega (R_s^3 - R_p^3)$$

$$Q_{pinbase} = \frac{2\pi}{3} \tau \omega (R_{pinbase}^3)$$

$$HeatRatio = \frac{Q_{shoulder}}{Q_{pinbase}} = \frac{(R_s^3 - R_p^3)}{(R_{pinbase}^3)}$$

Inoltre, le dimensioni del pin e della shoulder determinano anche l'aspetto del cordone di saldatura, solitamente ad evoluzione circolare piatta e senza sovrametallo. A volte ai lati del cordone sono presenti anche delle piccole bave, determinate dalla fuoriuscita di materiale che si può verificare a causa di un'insufficiente azione di contenimento della spalla.

## 2.1.2. Parametri di saldatura

I parametri di saldatura sono fondamentali nei processi di FSW perché definiscono la qualità del giunto che si crea, le sue proprietà meccaniche e la presenza o meno di difetti. I parametri da tenere in considerazione e che verranno analizzati nello specifico

sono: velocità di rotazione dell'utensile, velocità di avanzamento dell'utensile, angolo di inclinazione dell'utensile (tilt angle), forza verticale esercitata dalla macchina e profondità di penetrazione dell'utensile. Naturalmente, sono parametri fondamentali da tenere in considerazione anche quelli già analizzati nel paragrafo precedente: il materiale dell'utensile e la sua geometria (diametro e forma della spalla, diametro, lunghezza e forma del pin). Le considerazioni fatte sui parametri studiati saranno sulla base degli articoli di V. P. Singh et al. [17] e C. Gambaro et al. [16].

### ***2.1.2.1. Velocità di rotazione dell'utensile***

Il parametro di saldatura più importante è la velocità di rotazione dell'utensile, sulla base del quale vengono scelti gli altri, perché da questa dipende la quantità di calore prodotta per attrito tra il materiale e l'utensile e anche il grado di rimescolamento del materiale, che dà luogo ai fenomeni di ricristallizzazione dinamica, che generano una struttura a grani molto fine. In particolare, all'aumentare della velocità di rotazione aumenta il calore generato, quindi la temperatura del materiale, che tende ad essere più fluido e a rimescolarsi più facilmente. Ad alte velocità di rotazione, infatti è favorito il passaggio del materiale dalla parte anteriore dell'utensile alla zona posteriore, effetto che determina la creazione del giunto. Inoltre, le elevate temperature, oltre a favorire il rimescolamento stimolano anche la ricristallizzazione dinamica dei grani: utilizzando tecniche di raffreddamento rapido è possibile ottenere grani molto fini che conferiscono elevate proprietà meccaniche al giunto. Nel caso di processi di FSW con raffreddamento si parla di Cooling assisted FSW (CFSW).

La velocità di rotazione utilizzata nei processi di saldatura, naturalmente, cambia in base al materiale da saldare e al suo variare cambiano le proprietà meccaniche dei giunti. In generale, le velocità si attestano in un range tra i 1000rpm e i 1600rpm.

### ***2.1.2.2. Velocità di avanzamento dell'utensile***

La velocità di avanzamento dell'utensile, o velocità di saldatura, è un altro parametro importante che determina la qualità dei giunti e la presenza o meno di difetti: è la velocità con la quale l'utensile si muove lungo la linea di saldatura. Tale parametro ha un'elevata influenza sulla resistenza meccanica e sulla microstruttura del giunto e da

questa dipende la generazione di calore nel processo, che è inversamente proporzionale alla velocità di avanzamento. Si possono creare due tipi di giunti:

- Giunti “freddi”: la velocità di saldatura è troppo elevata e non si riesce a generare una quantità di calore per attrito sufficiente a plasticizzare il materiale. In questo caso prevale l’azione di forgiatura e, visto il materiale relativamente freddo, l’utensile è sottoposto a sollecitazioni elevate.
- Giunti “caldi”: la velocità di saldatura è troppo bassa e l’apporto termico è molto elevato. Le elevate temperature provocano una variazione della microstruttura nella HAZ e un eventuale ingrossamento dei grani porta ad una significativa riduzione delle proprietà meccaniche del giunto, effetto molto pericoloso nel caso in cui non si possa rimediare tramite trattamenti termici eseguiti dopo la saldatura.

In generale, le velocità di avanzamento variano in un range che va dai 50 mm/min fino ai 200mm/min ed è importante che siano scelte correttamente per evitare difetti di saldatura, anche gravi.

### 2.1.2.3. Angolo di inclinazione dell’utensile

L’angolo di inclinazione dell’utensile è una variabile il cui effetto è poco intuitivo, ma, in realtà, ha effetti molto importanti sulla saldatura. Storicamente si è sempre pensato che bastasse semplicemente penetrare perpendicolarmente il materiale per ottenere una buona saldatura, però non è così, tanto che si possono riscontrare alcuni difetti importanti.

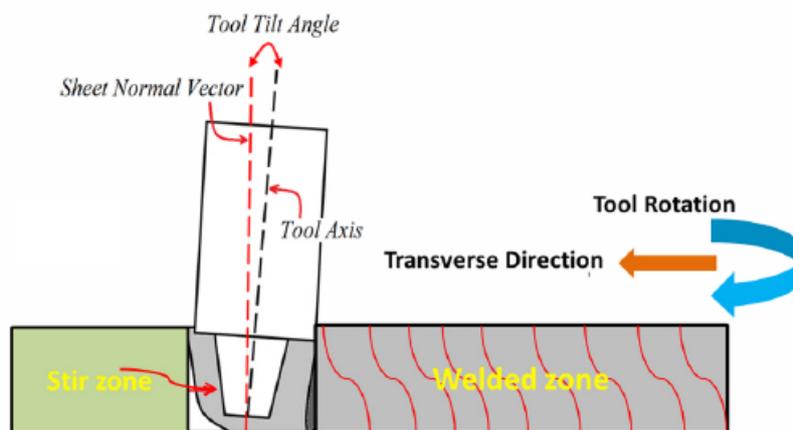


Figura 17 – Schema rappresentante l'angolo di inclinazione dell'utensile [17]

Il primo problema che si riscontra è l’elevato valore della forza con cui il materiale si oppone all’avanzamento dell’utensile, causato dall’accumulo di materiale plasticizzato

di fronte alla spalla, e in secondo luogo la fuoriuscita dal RS di una bava continua di materiale plasticizzato, a causa dell'elevata pressione esercitata dalla spalla dell'utensile. Per risolvere tali problemi si ricorre all'utilizzo di piccoli angoli di inclinazione ( $1,5^{\circ}$ - $3^{\circ}$ ) che permettono il passaggio del materiale sotto l'utensile, come è possibile osservare in Figura 17.

#### **2.1.2.4. Forza verticale assiale**

La forza verticale dipende dalla velocità di rotazione e da quella di avanzamento dell'utensile e da essa dipende l'entità del calore generato per attrito e, quindi, le proprietà meccaniche del giunto saldato. In particolare, è importante che questa forza abbia un valore appropriato in modo da mantenere adeguatamente in contatto la shoulder con la superficie del materiale da saldare ed evitare difetti di saldatura e la formazione di eccessiva bava.

#### **2.1.2.5. Penetrazione dell'utensile**

La giusta penetrazione dell'utensile e del pin all'interno del materiale da saldare è fondamentale per ottenere giunti senza difetti di saldatura. In particolare, all'aumentare della profondità aumenta la forza esercitata dalla shoulder sul materiale e, un'eccessiva forza potrebbe portare ad un'azione di forgiatura dell'utensile. Inoltre, un'eccessiva profondità può portare anche alla creazione di eccessiva bava, in quanto una maggiore quantità di materiale è spinta fuori dal cordone dalla shoulder. D'altra parte, se la profondità dell'utensile è troppo bassa, si possono avere problemi nel mantenere il giusto contatto con la superficie del materiale. La penetrazione dell'utensile nel materiale, naturalmente, dipende anche dalla lunghezza del pin e va valutata sulla base di questa variabile. Lunghezze eccessive del pin possono portare alla saldatura del pezzo con la tavola di sostegno, mentre lunghezze troppo corte possono portare alla presenza di un intaglio sul rovescio del giunto.



*Figura 18 – Due esempi di utensili con pin e pinless [20]*

Infine, per quanto riguarda la penetrazione dell'utensile, è importante ricordare che esistono due tipi di utensili: il primo tipo è quello con il pin, mentre il secondo è quello detto "pinless", cioè con la shoulder piatta e senza punta, entrambe osservabili in Figura 18. Come studiato da Forcellese et al. [20], le due configurazioni si differenziano per il rimescolamento che permettono di ottenere, anche se questo dipende molto dalla dimensione della shoulder. Infatti, nel caso di diametri della shoulder più piccoli (8mm) la configurazione con il pin permette di ottenere proprietà meccaniche del giunto maggiori, mentre per diametri più grandi (19mm) le proprietà meccaniche ottenute sono migliori con la configurazione pinless. La differenza è da ritrovarsi nel fatto che diametri più piccoli della shoulder permettono una minore generazione di calore per attrito, quindi, è necessaria la presenza del pin per permettere un buon rimescolamento. Nel caso di diametri della shoulder maggiori, invece, il calore generato per attrito è sufficientemente alto e la presenza del pin non è necessaria, ma potrebbe addirittura causare la formazione di difetti di saldatura come le cavità.

#### **2.1.2.6. Posizione del pezzo**

La posizione degli oggetti da saldare è fondamentale per ottenere una buona saldatura, in particolar modo nel caso in cui si saldino materiali differenti. Come già visto precedentemente, possiamo distinguere due lati, advancing side (AS) e retreating side (RS), e sappiamo che nel primo abbiamo velocità periferica e rotazionale concordi e da questo lato viene asportato materiale, mentre nel secondo le due velocità sono discordi, con conseguente apporto di materiale. A causa di questa asimmetria la posizione dei due materiali da saldare è importante ed influisce sulle proprietà meccaniche del giunto saldato.

Inoltre, è importante anche conoscere la configurazione delle piastre da saldare, come riportato da K. Singh et al. [15]: solitamente le giunzioni più adatte per la FSW sono i giunti di testa (butt joints), e i giunti sovrapposti (overlapped joints), dei quali si può vedere una schematizzazione in Figura 19. Nel caso dei giunti di testa le due lamine vengono semplicemente tenute in contatto faccia a faccia e devono avere lo stesso spessore, mentre nel caso del giunto sovrapposto si salda un foglio sopra l'altro e l'utensile attraversa tutto lo spessore del piatto superiore, fino ad arrivare all'interno di quello inferiore, in modo da assicurare riscaldamento e rimescolamento in entrambi. Naturalmente, una volta posizionati i fogli da saldare è necessario assicurarsi che

mantengano la posizione senza spostarsi durante la saldatura, a causa delle elevate forze che entrano in gioco, e bloccarli saldamente.

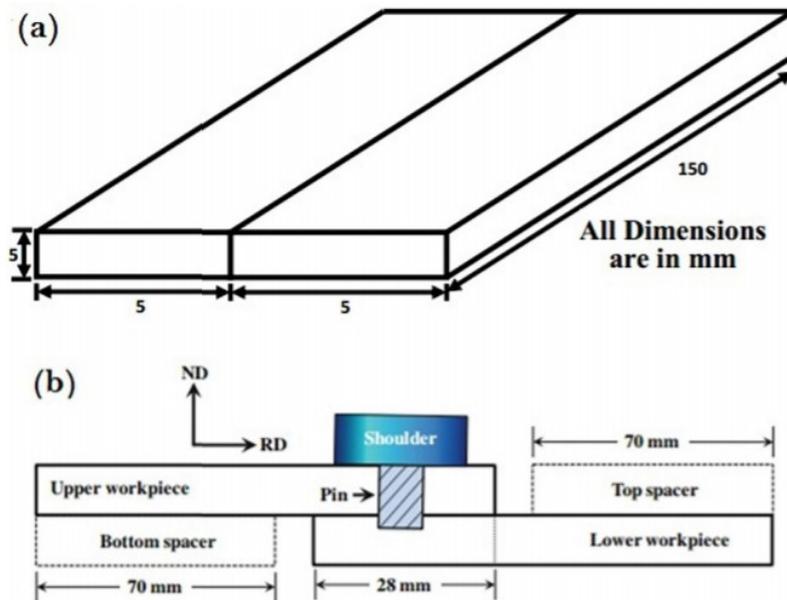


Figura 19 – Schematizzazione di (a) un giunto di testa e (b) un giunto sovrapposto [15]

### 2.1.3. Difetti di saldatura

Come avviene per altre tecniche di saldatura, anche i processi di FSW hanno i propri difetti, che possono causare la rottura o il danneggiamento dei giunti saldati. I vari difetti sono influenzati dalla temperatura a cui avviene il processo e dal flusso di materiale, che possono essere controllati tramite i parametri di processo descritti nei precedenti paragrafi. Difetti di saldatura possono essere causati anche da vari disturbi che interessano il materiale prima che la saldatura inizi e che possono essere classificati in tre tipi: disomogeneità del materiale, manipolazione e bloccaggio improprio. In particolare, la maggior causa di difetti di saldatura è la presenza di un gap tra il materiale da saldare e l'utensile. I principali difetti che si possono creare sono: tunnel defects, void/worm hole defects, kissing bond/zig-zag defects, mancanza di penetrazione, bava e scanalature. Nei seguenti paragrafi verranno descritti i vari difetti di saldatura seguendo quanto studiato ed analizzato da M. El-Sayed [14] e V. P. Singh et al. [17] nei loro articoli.

### 2.1.3.1. Tunnel defects

I difetti di tunnel, che si possono osservare in Figura 20, sono difetti molto comuni nei processi di FSW, che impattano in maniera importante sulle proprietà meccaniche dei giunti saldati, anche fino all'80%. Come gli altri difetti di saldatura, anche i tunnel si creano a causa della scelta sbagliata dei parametri di saldatura, che portano ad un flusso insufficiente di materiale e ad un riscaldamento non adeguato. Questo difetto può essere eliminato con un'appropriata generazione e distribuzione di calore in entrambi i lati della saldatura e con il corretto consolidamento del materiale dietro all'utensile.

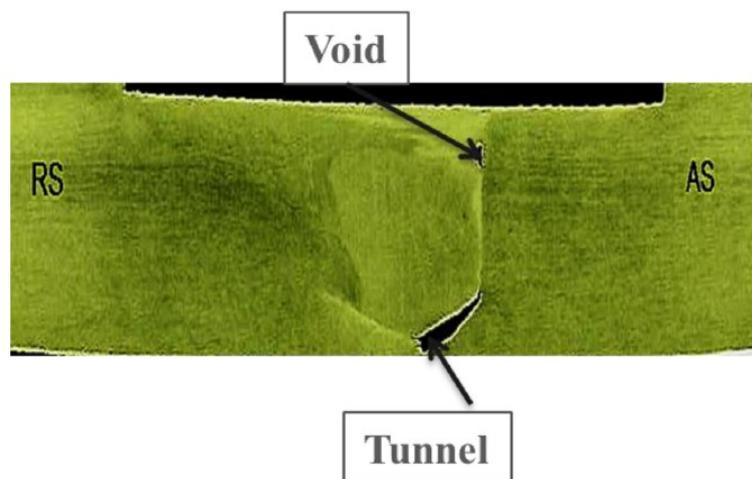


Figura 20 – Macrostruttura della sezione di un giunto saldato [14]

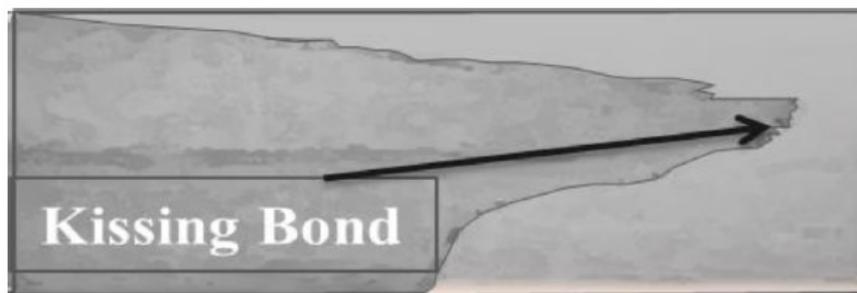
### 2.1.3.2. Voids

Questo tipo di difetti si crea sul bordo della nugget zone dell'advancing side o sotto la superficie della saldatura, come si vede in Figura 20, e si crea poiché la pressione generata dall'utensile è troppo bassa, a causa di una velocità di avanzamento troppo elevata o a causa di una velocità di rotazione troppo bassa. Queste condizioni portano ad una generazione di calore inappropriata, quindi il materiale non è in grado di riempire correttamente tutto lo spazio attorno all'utensile. La presenza di vuoti riduce di molto la duttilità del giunto e in parte anche la sua resistenza meccanica.

### 2.1.3.3. Kissing bonds

I kissing bonds, un cui esempio è osservabile nella Figura 21, sono difetti che si creano alla radice della saldatura a causa di una deformazione insufficiente del materiale, a

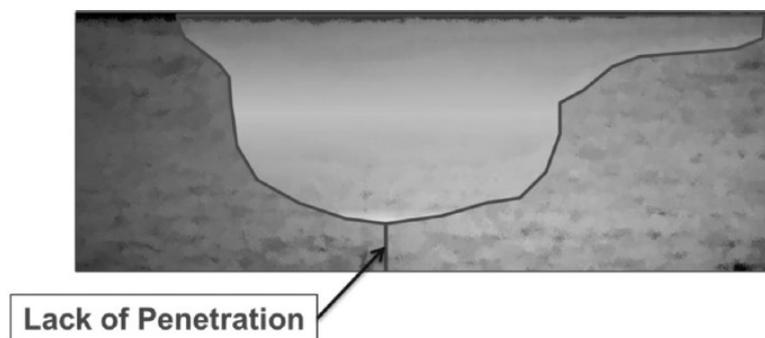
causa di basse pressioni e rimescolamento. Se queste condizioni prevalgono, lo strato di ossido presente sul materiale base, se non propriamente rimosso prima della saldatura, porterà alla creazione di una discontinuità nel giunto, sull'interfaccia tra i due lembi saldati. La presenza di kissing bonds ostacola la creazione di forti legami di giunzione tra le superfici del materiale base, in modo da ottenere basse proprietà meccaniche. Per evitare la formazione di questi difetti è necessario aumentare il rimescolamento del materiale attorno al pin, in modo da rompere lo strato di ossido che crea il difetto.



*Figura 21 – Esempio di kissing bond [14]*

#### **2.1.3.4. Mancanza di penetrazione**

La mancanza di penetrazione è un difetto che porta le due facce dei materiali a non essere completamente saldati, come si può vedere in Figura 22, a causa della mancanza di deformazione in quella zona e, quindi, il giunto non è completamente formato. La formazione di questi difetti può essere attribuita alla variazione dello spessore dei fogli da saldare, alla lunghezza troppo corta del pin, ad una penetrazione non abbastanza profonda o ad un movimento dei pezzi durante il processo di saldatura.



*Figura 22 – Mancanza di penetrazione nel giunto saldato [14]*

### **2.1.3.5. Bava**

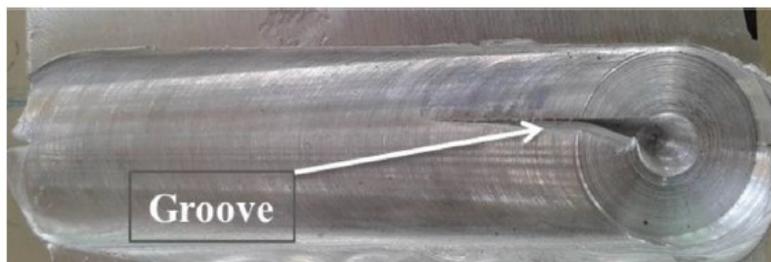
Durante la saldatura è possibile che si crei una bava (flash), cioè che una grande quantità di materiale fuoriesca dalla shoulder rimanendo ai lati del giunto, in particolare nel retreating side, a causa di un eccesso di calore. Questo materiale crea una superficie ondulata e corrugata, come mostrato in Figura 23, che deve essere eliminata tramite lavorazioni superficiali successive.



*Figura 23 – Bava formata ai lati del cordone di saldatura [14]*

### **2.1.3.6. Scanalature**

Come si può vedere in Figura 24, è possibile che si creino delle scanalature sulla superficie superiore del cordone di saldatura, causate dall'angolo di inclinazione dell'utensile troppo grande o troppo piccolo che può causare una scarsa forgiatura verso il basso del materiale plastificato.



*Figura 24 – Scanalature sulla superficie del cordone di saldatura [14]*

## 2.2. Tecniche di FSW

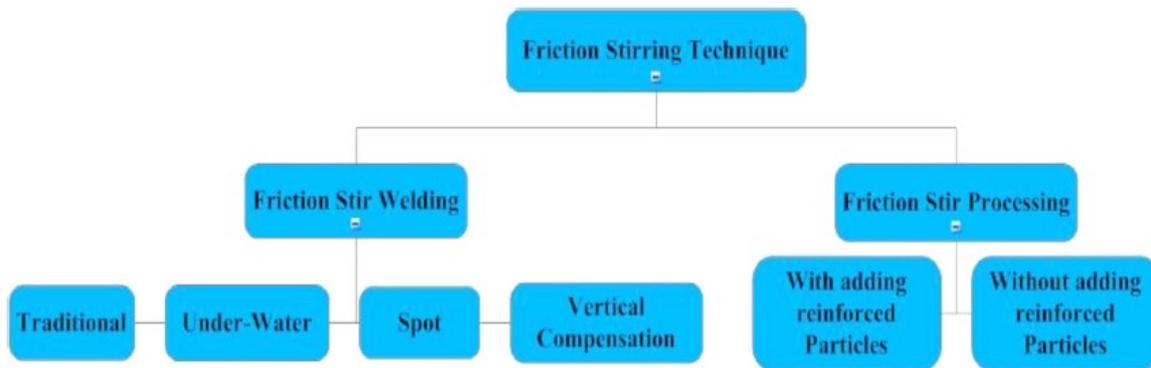


Figura 25 – Classificazione delle tecniche di FSW [14]

Come è possibile osservare nello schema di Figura 25 e come descritto nell'articolo di M. El-Sayed et al. [14], le tecniche di FSW fanno parte di una famiglia di processi più grande, quella delle tecniche di rimescolamento per attrito, insieme al Friction Stir Processing (FSP), una tecnica sviluppata da Mishra et al. nel 2000, che si basa sugli stessi principi del FSW. Nel FSP c'è un utensile rotante che è immerso nel materiale da lavorare, un pezzo monolitico, e che trasla linearmente seguendo un percorso specifico per generare una deformazione plastica nei grani del BM, che subiscono una ricristallizzazione dinamica ed aumentano le loro proprietà meccaniche. Il FSP può avvenire sia con aggiunta che senza aggiunta di particelle di rinforzo all'interno del materiale.

Tornando all'argomento principale, possiamo dividere i vari tipi di saldatura per deformazione per attrito in: FSW tradizionale (FSW), saldatura sott'acqua (UFSW), saldatura per punti (FSSW) e per compensazione verticale (VCFSW).

### 2.2.1. Traditional Friction Stir Welding

Quanto visto fino ad ora può essere fatto rientrare all'interno della tecnica di FSW tradizionale, che avviene tramite un utensile che avanza e che, grazie all'attrito provocato dalla rotazione attorno al proprio asse, crea un cordone di saldatura. In particolare, la FSW avviene all'aria aperta, in maniera continua, spesso utilizzando una macchina CNC e senza particolari sistemi di raffreddamento. Nei paragrafi precedenti sono stati analizzati il principio di funzionamento alla base del FSW, la formazione delle varie zone di materiale attorno al cordone e il flusso di materiale, i parametri di processo, al variare dei quali cambiano le proprietà meccaniche dei giunti saldati e i

difetti della FSW tradizionale. Tra le cose rimaste da analizzare, però, è interessante studiare la double-sided FSW, cioè una saldatura per attrito tradizionale su entrambi i lati del giunto. Solitamente, infatti, si salda solamente un lato del giunto, ma è anche possibile svolgere la saldatura su entrambi i lati: il processo rimane abbastanza facile da svolgere, anche se in alcuni casi è impossibile a causa della geometria degli oggetti da saldare. Come affermato da uno studio di [21], la saldatura su entrambi i lati mostra dei miglioramenti sulla resistenza del giunto e sulla percentuale di allungamento rispetto ai giunti formati con un'unica passata. Inoltre, la saldatura double-sided porta anche all'eliminazione di molti difetti di saldatura.

Infine, è importante ricordare che è possibile saldare tutti i metalli tramite la FSW tradizionale, anche leghe che possono portare a problemi nella saldatura convenzionale: questo discorso vale in particolar modo per le leghe di alluminio, magnesio e tutte le leghe metalliche leggere.

### 2.2.2. Under Water Friction Stir Welding

Come analizzato nell'articolo di M. El-Sayed et al. [14], la FSW sott'acqua è una tecnica di saldatura che viene usata per evitare che le temperature del materiale da saldare raggiungano picchi troppo elevati, in particolare nel caso di leghe metalliche con maggiore conduttività. Infatti, maggiore è la temperatura alla quale avviene la saldatura e più diventano grandi i grani della microstruttura del giunto e ciò porta a diminuzioni delle proprietà meccaniche. La saldatura può avvenire all'interno di un contenitore con acqua statica oppure può esserci un flusso o un ricircolo d'acqua, come mostrato nello schema in Figura 26.

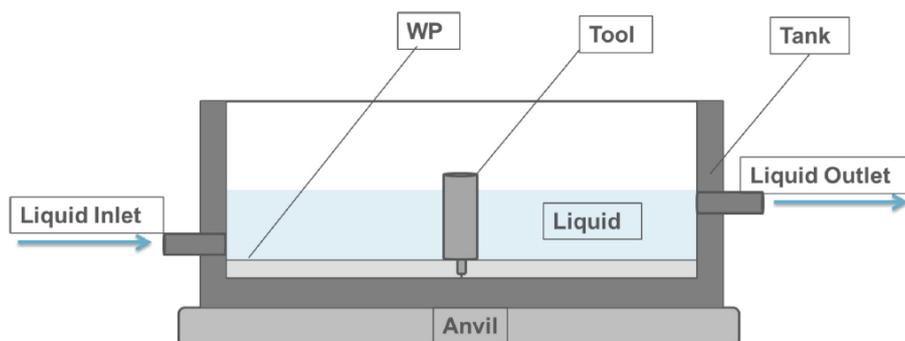


Figura 26 – Schema di un processo di UFSW [14]

L'utilizzo di acqua come mezzo di raffreddamento, oltre che a mantenere basse le temperature massime serve anche per aumentare la velocità di raffreddamento e a

diminuire la dissoluzione di precipitati, che aumentano le proprietà meccaniche e microstrutturali dei giunti saldati. Quindi, generalmente, questa tecnica porta a proprietà meccaniche superiori a quelle della FSW tradizionale.

### 2.2.3. Friction Spot Stir Welding

La Friction Spot Stir Welding, come affermato da M. El-Sayed et al. [14], è una tecnica di saldatura sviluppata dall'azienda produttrice di automobili Mazda nel 2003, che è stata utilizzata inizialmente per saldare il portellone posteriore e il cofano delle auto sportive. L'utilizzo di questa nuova tecnica fu di grande successo poiché la Mazda riportò grandi riduzioni nel consumo di energia e negli investimenti per le attrezzature, rispetto all'uso della saldatura tradizionale. Come mostrato in Figura 27, la FSSW si divide in tre passaggi:

- Fase di immersione (the plunging phase): l'utensile cilindrico entra gradualmente all'interno del materiale da saldare mantenendo la rotazione e generando calore.
- Fase di sosta (the dwell phase): l'utensile si ferma in posizione per un certo periodo di tempo per permettere il giusto rimescolamento di materiale ed ottenere una saldatura solida e resistente
- Fase di estrazione (the drawing out): l'utensile è estratto dal materiale e la saldatura è completata

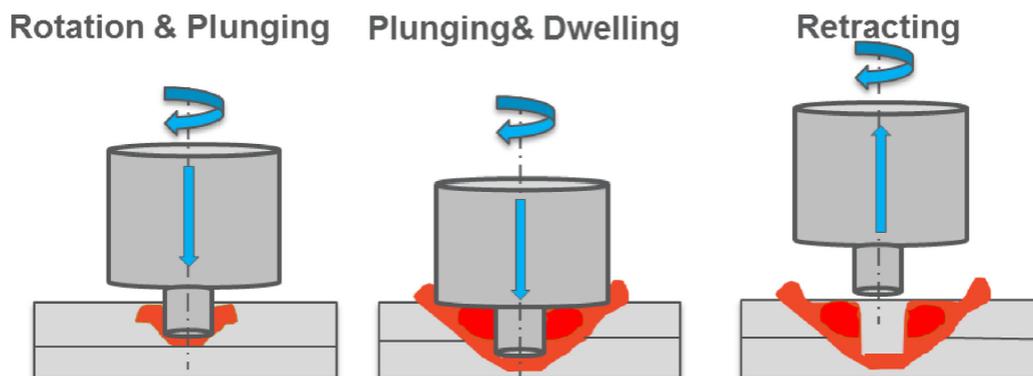


Figura 27 – Fasi del processo di FSSW [14]

Dalla descrizione delle fasi del processo è facile intuire che la differenza di questa tecnica di saldatura rispetto a quella tradizionale sta nel fatto che non si crea un cordone di saldatura tramite l'avanzamento dell'utensile, ma la saldatura avviene solamente in alcuni punti. Inoltre, la saldatura è possibile solamente se i due materiali da giuntare sono sovrapposti.

Esistono diversi tipi di FSSW: quella classica ad immersione, descritta in Figura 27, e quella senza il pin, che ha gli stessi principi di base ma grazie all'assenza della punta non si produce il classico incavo lasciato dal pin. Possiamo trovare anche il refill FSSW, un processo sviluppato da Iwashita (2003) per saldare due o più materiali insieme sfruttando movimenti relativi tra il pin e la shoulder, come mostrato in Figura 28: ci sono tre fasi che sono quella di rotazione iniziale (rotating), in cui sia pin che shoulder toccano la superficie del materiale generando calore per attrito. Successivamente viene immersa la shoulder nel materiale mentre il pin viene ritratto indietro (plunging) ed infine la shoulder viene fatta uscire nuovamente dalla superficie del materiale ed il pin spinge il materiale deformato nel vuoto generato precedentemente dalla shoulder (retracting). Allen e Arbegast (2005) svilupparono una versione modificata ed invertita del refill FSSW, in cui il pin si immerge nel materiale, mentre la shoulder si ritrae.

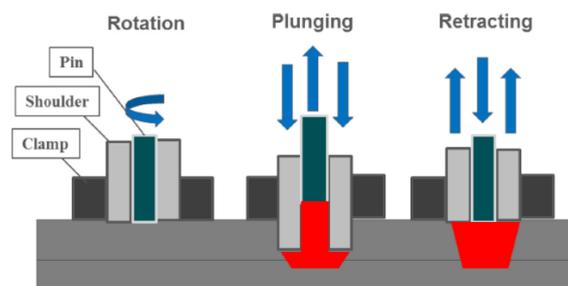


Figura 28 – Refill Friction Spot Stir Welding [14]

La stitch FSSW, invece è una variante in cui l'utensile dopo essere stato immerso all'interno del materiale viene spostato di una piccola distanza, in modo da creare un piccolo cordone di saldatura e un'area di giunzione maggiore, come in Figura 29.

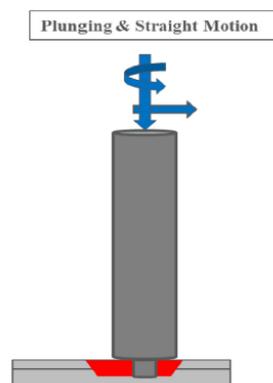


Figura 29 – Sticht Friction Spot Stir Welding [14]

In Figura 30, invece, è possibile osservare uno schema di Swing Friction Spot Stir Welding, una variante di FSSW sviluppata da Okamoto et al. (2005), in cui l'utensile, una volta immerso nel materiale, viene fatto oscillare di un piccolo angolo: l'oscillazione schiaccia maggiormente il materiale sul bordo della saldatura, aumenta l'area e la resistenza meccanica del giunto, ma non elimina l'incavo nel materiale.

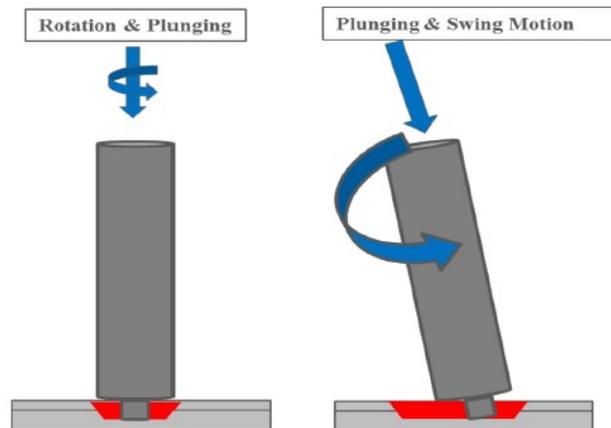


Figura 30 – Swing Friction Spot Stir Welding [14]

Come affermato da [14] nel suo articolo, il tempo in cui il pin rimane immerso all'interno del materiale influenza moltissimo la resistenza al taglio del giunto saldato e la sua resistenza meccanica, oltre ai soliti parametri, tra cui la velocità di rotazione. Ciò che, invece, determina i maggiori difetti strutturali è la presenza di cricche nel giunto saldato, che possono far precipitare le proprietà meccaniche.

#### 2.2.4. Vertical Compensation Friction Stir Welding

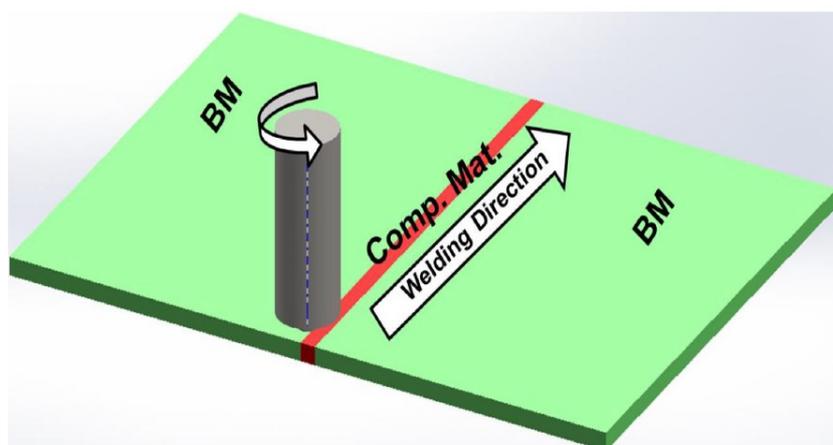


Figura 31 – Rappresentazione schematica di un processo di VCFSW [14]

Come affermato nell'articolo di M. El-Sayed et al. [14], la VCFSW, schematizzata in Figura 31, è una tecnica di saldatura sviluppata per risolvere il problema della presenza di grandi mancanze di materiale sull'interfaccia dei pezzi da saldare e, quindi, della presenza di molti difetti nel giunto che ne condizionerebbero le proprietà meccaniche. In particolare, questa tecnica è utilizzata nel caso in cui la dimensione della fessura tra i due fogli da saldare sia, come affermato nell'articolo di S. Ji et al. [22], superiore del 10% dello spessore del materiale. In queste condizioni la VCFSW permette di ottenere un buon risultato: viene aggiunto del materiale extra all'interno della fessura che è utilizzato per compensare il vuoto tra i due fogli, ma il materiale aggiunto non deve essere eccessivo per evitare la formazione di bava. La presenza di questo materiale di aggiunta porta anche ad avere maggior concentrazione di materiale nel RS rispetto che nell'AS e, infatti, nel primo lato statisticamente si ha la presenza di un minor numero di difetti. Infine, è doveroso dire che le proprietà meccaniche dei giunti ottenuti con questa tecnica, soprattutto la resistenza meccanica, sono inferiori rispetto a quelle del BM, ma in molti casi è una tecnica necessaria da utilizzare.

### **2.3. Materiali usati nella FSW**

Come è possibile dedurre dall'articolo scritto da R. S. Mishra et al. [23], il materiale saldato tramite FSW subisce profondi cambiamenti a livello microstrutturale, grazie al riscaldamento e al rimescolamento ottenuto per attrito, come l'aumento delle dimensioni dei grani, l'unione dei confini di grano, la dissoluzione e l'ingrossamento dei precipitati, la rottura e ridistribuzione dei dispersoidi, e il cambiamento della struttura.

Per studiare al meglio i cambiamenti microstrutturali si parte dal flusso del materiale durante la saldatura, che è molto complesso, dipende dalla geometria dell'utensile, dai parametri di processo e dal materiale da saldare. È molto difficile studiare il flusso di materiale, per questo motivo si cerca di capire che cosa avviene utilizzando diverse tecniche, che ricorrono all'utilizzo di marker e di prove sperimentali o tecniche che utilizzano modelli matematici. Nell'articolo di R. Nandan et al. [24] viene affermato che esistono tre tipi di flusso che influenzano il trasporto di materiale plasticizzato durante la FSW. Innanzitutto, nella zona centrale, una parte di materiale plasticizzato ruota attorno all'utensile: questo movimento è guidato dalla rotazione dell'utensile e il conseguente attrito tra l'utensile e il pezzo da lavorare. Un secondo movimento

rotazionale è generato dal perno: il materiale più vicino al perno tende ad essere spinto verso il basso, mentre quello più lontano è spinto verso l'alto. Infine, c'è anche un movimento relativo tra l'utensile e il pezzo da lavorare. Il flusso complessivo del materiale durante la saldatura è dato dalla somma di questi tre moti.

Il calore generato dall'attrito porta ad un aumento della temperatura del materiale, che raggiunge al massimo un valore pari a circa il 60% della temperatura di fusione del materiale nella nugget zone, che va poi a diminuire fino al materiale base, dove si ha una temperatura molto vicina a quella ambiente. Naturalmente, le temperature raggiunte nelle varie zone dipendono molto dal materiale e dalla sua conduttività, ma rimangono sempre al di sotto della temperatura di fusione.

Per quanto riguarda i materiali che è possibile saldare tramite il FSW, il sito ufficiale del TWI, l'istituto che per primo brevettò questa tecnologia, afferma che "inizialmente il FSW era limitato a materiali relativamente morbidi come piombo, zinco, magnesio e una gamma di leghe di alluminio. Più recentemente sono stati saldati rame, titanio, acciai ferritici a basso tenore di carbonio, acciai legati, acciai inossidabili e leghe di nichel. In linea di principio, qualsiasi materiale che può essere lavorato a caldo dovrebbe essere saldabile con questo processo. Tuttavia, il materiale dell'utensile è spesso il fattore limitante, piuttosto che il materiale da saldare". [25] In particolare, si preferisce utilizzare la FSW per la saldatura di materiali che creano difficoltà con la saldatura convenzionale: il rame è un materiale ad altissima conduttività, tra dieci e cento volte superiore a quella degli acciai, che porta alla necessità di un calore altissimo per raggiungere la temperatura di fusione e che rende molto difficile la saldatura per fusione: il rame, quindi, è un materiale molto adatto ai processi di FSW. Per quanto riguarda la saldatura degli acciai, tramite la FSW si raggiungono temperature inferiori rispetto alla saldatura per fusione: ciò produce minori cambiamenti metallurgici e minimizza la distorsione e le tensioni residue nel giunto, fattori fondamentali nella saldatura di componenti con spessori molto elevati, come nell'industria navale e nell'industria pesante. Inoltre, tramite la FSW è possibile evitare anche problemi di ossidazione, che porta alla formazione di cricche, e la formazione di fumi tossici. Infine, è molto interessante anche la possibilità di saldare insieme materiali diversi. Grazie a questa serie di vantaggi negli ultimi anni la FSW di materiali metallici sta diventando sempre di maggiore interesse per l'industria. Per quanto riguarda le leghe di magnesio, solitamente vengono lavorate con processi di fonderia poiché la saldatura per fusione genera elevata porosità e, quindi, difetti di saldatura: la

saldatura allo stato solido potrebbe essere un ottimo metodo per eliminare questi problemi. Come già visto per gli acciai, è possibile saldare insieme tramite FSW anche leghe totalmente diverse, come leghe di rame ed alluminio, seguendo i parametri di saldatura adeguati.

Una volta fatta una breve parentesi sulle leghe metalliche che possono essere utilizzate nei processi di FSW e dato che nella tesi saranno trattate saldature di materiali polimerici, nel prossimo paragrafo si approfondirà questo aspetto, ancora poco studiato rispetto alle saldature di per attrito di materiali metallici.

### **2.3.1. FSW di materiali polimerici**

La FSW dei materiali polimerici e termoplastici è un concetto molto simile a quello della FSW per materiali metallici, come affermato da N. Sadeghian et al. [26], ma le termoplastiche hanno coefficienti di dissipazione del calore molto bassi, se comparati ai metalli, e le loro temperature di fusione sono molto più basse. Inoltre, i legami intermolecolari sono più deboli nei materiali plastici rispetto che in quelli metallici. Nonostante queste caratteristiche, però, la FSW di polimeri è un processo molto interessante per via delle caratteristiche che conferisce alle saldature, come descritto da N. Mendes et al. [27] nel suo articolo. Infatti, con questo processo sono raggiunte le caratteristiche meccaniche migliori, permette di creare saldature efficienti con bassi consumi di energia e con bassi costi, anche per via della possibilità di saldare senza materiale aggiuntivo. Infine, è un processo molto semplice da realizzare che non richiede per forza utilizzo di personale altamente qualificato e si adatta molto bene ad essere automatizzato.

In realtà, la FSW di materiali termoplastici può essere difficoltosa a causa dell'insufficiente calore generato per attrito che non permette di ottenere un'adeguata deformazione plastica per creare il giunto saldato. Inoltre, il materiale non totalmente plasticizzato può uscire dalla zona di saldatura creando della bava e diminuzione delle proprietà meccaniche del giunto. Inoltre, è stato dimostrato da S. Strand et al. [28] che il materiale negli strati più esterni raffredda più velocemente rispetto a quello negli strati interni e questo può portare alla formazione di un guscio duro e di vuoti. La generazione di calore può essere migliorata aumentando la velocità di rotazione dell'utensile, il diametro della shoulder e del pin, diminuendo la velocità di avanzamento e utilizzando un elemento particolare nell'utensile, chiamato hot shoe. A

questo punto è interessante analizzare i vari parametri dai quali dipende la saldatura dei materiali polimerici.

La geometria del pin è un fattore molto significativo e che influenza molto le proprietà meccaniche dei giunti saldati. Lo studio delle saldature e dei test svolti e analizzati nell'articolo di N. Sadeghian et al. [26] ha dimostrato che le saldature effettuate con pin di forma conica crea giunti con proprietà meccaniche superiori rispetto a quelli fatti con pin cilindrici.

L'aumento dell'area di contatto tra l'utensile e il materiale da saldare causa un aumento del calore generato, quindi per valori maggiori del rapporto  $D/d$  ci si aspetta maggior calore generato per attrito.

Per la generazione delle condizioni necessarie per far ammorbidire il materiale è necessario uno spazio abbastanza chiuso nella zona della saldatura. Per aumentare il calore generato si aumenta la forza di compressione che la spalla esercita sul materiale ma un ruolo molto importante lo svolge anche l'angolo di inclinazione dell'utensile. Aumentando l'angolo di inclinazione aumenta la generazione di calore, ma questo può anche causare instabilità nella saldatura: il materiale si gonfia, diventa eccessivamente fluido e può avvenire una dispersione eccessiva del materiale. L'angolo di inclinazione, quindi, gioca un ruolo molto importante nell'aumentare la resistenza meccanica della saldatura e solitamente è mantenuto attorno ad  $1^\circ$ .

All'aumentare della velocità di rotazione dell'utensile diminuiscono il numero e la dimensione dei difetti nel cordone di saldatura, in modo da aumentare la resistenza a trazione e la deformazione a rottura. Tutto questo perché all'aumentare della velocità di rotazione aumenta il calore generato per attrito ed il materiale si ammorbidisce maggiormente.

Un'elevata velocità di saldatura, invece, non permette di generare sufficiente calore per sciogliere la materia perché l'utensile rimane troppo poco tempo nella stessa posizione e non permette di rimescolare il materiale a sufficienza, creando giunti con basse proprietà meccaniche. Allo stesso tempo, però, la velocità di avanzamento non deve essere troppo bassa, altrimenti si rischiano fenomeni di surriscaldamento o addirittura si creano delle bruciature sul materiale.

### 2.3.1.1. Hot shoe

Precedentemente è stato sottolineato il fatto che uno dei problemi della FSW di materiali polimerici è il riscaldamento del materiale da saldare: come afferma N. Sadeghian et al. [26] nel suo articolo, Sorensen e i suoi collaboratori svilupparono un utensile specifico per la saldatura di polimeri, chiamato “hot shoe”, che è un piatto usato per migliorare la qualità della saldatura, come si può vedere in Figura 32. L’hot shoe, come viene descritto da P. N. Banjare et al. [29], è un piatto metallico stazionario, che agisce come una shoulder non rotante e che aiuta a mantenere il materiale nella nugget zone. All’interno di questo componente è presente anche un riscaldatore (heating element) che fornisce calore extra durante il processo, che molto spesso riscalda grazie alla presenza di una resistenza elettrica.

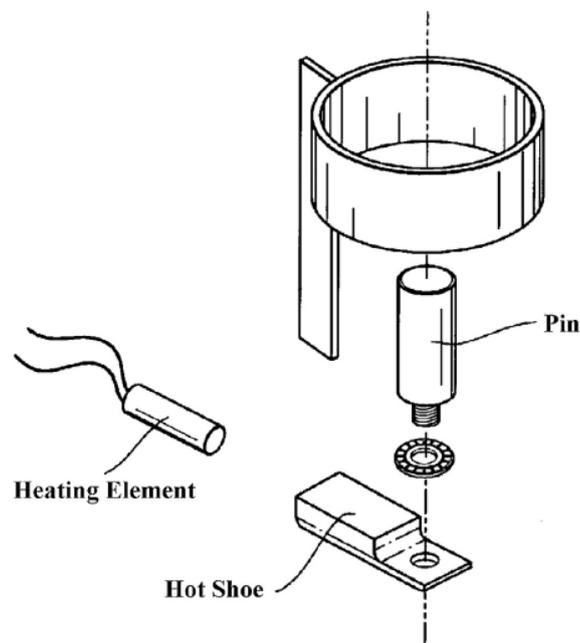


Figura 32 – Rappresentazione schematica dell’hot shoe [26]

Lo scopo principale dell’hot shoe è quello di mantenere il materiale deformato vicino al pin per applicarci una certa forza assiale mentre il materiale si raffredda; invece, l’elemento che riscalda fornisce il calore mancante che non viene ricavato per attrito e permette di mantenere costante il riscaldamento e il raffreddamento lungo tutto il cordone di saldatura.

L’utilizzo dell’hot shoe permette di migliorare la resistenza meccanica della saldatura, anche se per poterlo utilizzare bisogna predisporre di utensili particolari che permettano di montare questo componente, che, tra le altre cose, occupa spazio aggiuntivo vicino alla saldatura: se lo spazio a disposizione è ristretto il suo utilizzo è

complicato. Con l'utilizzo dell'hot shoe è anche possibile che il giunto saldato riesca a raggiungere percentuali di allungamento anche doppie rispetto ai giunti ottenuti tramite la FSW classica. Inoltre, l'utilizzo di questo utensile permette di ottenere una migliore finitura superficiale del giunto, che evita lavorazioni superficiali successive di rifinitura e diminuisce la formazione di bava, grazie alle temperature raggiunte superiori. Nei prossimi capitoli, come più volte anticipato precedentemente, verranno studiate nello specifico le proprietà meccaniche di giunti saldati tramite FSW tra due piastre di ABS e verranno analizzati nello specifico i dati ottenuti tramite prove di trazione e di flessione sui provini creati in laboratorio.

### 3. Materiali e procedure sperimentali

#### 3.1. Materiale

Il materiale utilizzato per svolgere le prove è l'ABS plus P430, stampato con una stampante 3D della Stratasys. Il P430 è un materiale termoplastico molto resistente che è in grado di funzionare come le parti di produzione, come si può ritrovare nella scheda tecnica fornita da Stratasys [30]. In particolare, se ne consiglia l'utilizzo con stampanti 3D FDM, come quella utilizzata nel nostro laboratorio, per la creazione di modelli 3D e prototipi in un ambiente d'ufficio. Nella Tabella 1 è possibile osservare le proprietà meccaniche di trazione del materiale, mentre nella Tabella 2 quelle di flessione.

MECHANICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
		XZ Axis	XZ Axis
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,700 psi	33 MPa
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	31 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	2,200 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%	6%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	2%
IZOD Impact, notched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

Tabella 1 – Proprietà meccaniche a trazione dell'ABS Plus P430 [30]

MECHANICAL PROPERTIES	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,450 psi	5,050 psi	58 MPa	35 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	240,000 psi	2,100 MPa	1,650 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	4%	2%	2%

Tabella 2 – Proprietà meccaniche a flessione dell'ABS Plus P430 [30]

## 3.2. Stampante 3D

Le piastre in ABS Plus 430 sono state realizzate tramite la stampa 3D, usando la tecnica FDM, di cui si è ampiamente discusso in precedenza. In particolare, la stampante utilizzata è la Fortus 250mc di Stratasys, che si può vedere in Figura 33. Come è possibile ricavare dalla scheda tecnica fornita dalla Stratasys [31], la stampante lavora su una piattaforma fornita dal produttore che consente uno spazio di lavoro di 254x254x305 mm e consente di utilizzare strati di materiale (solitamente ABS Plus 430) con spessori di 0.007, 0.010 e 0.013 mm e di diversi colori.



*Figura 33 – Stampante Fortus 250mc*

Le piastre stampate hanno dimensioni 150x85x3 [mm] e sono state stampate verticalmente, in modo tale che la direzione lungo la quale viene depositato il filo sia la stessa lungo la quale vengono eseguite le prove di trazione e di flessione.

È possibile utilizzare la stampante tramite Insight, che è un software di elaborazione e gestione del lavoro, accessibile ad utenti poco esperti ma allo stesso tempo in grado di soddisfare anche le caratteristiche di utenti più esperti, grazie alla possibilità editare tutti i parametri di stampa a proprio piacimento e di realizzare parti abbastanza complesse. Il software appena descritto è di tipo CAM, cioè un software che permette “di generare le istruzioni necessarie ad una macchina utensile per realizzare un determinato manufatto partendo da un progetto a CAD” [32]: nel nostro caso specifico traduce la geometria dell’oggetto da realizzare in movimenti dell’ugello e della piattaforma di supporto lungo le tre direzioni dello spazio. Prima di questa operazione

il software svolge anche un altro processo, detto “slicing”, che consiste nell’analizzare il progetto CAD e tradurlo in una serie di layer (strati) che saranno realizzati uno sopra l’altro dall’estrusore e portano alla formazione della parte.

### 3.3. CNC

Le macchine CNC (Computer Numerical Control) sono “macchine utensili che si avvalgono dell’utilizzo di un dispositivo elettronico inserito all’interno della macchina (controllo numerico) per la gestione dei suoi movimenti. Le funzioni e i movimenti di una macchina CNC sono predefiniti, ossia sono preimpostati mediante l’impiego di specifici software.” [33].



*Figura 34 – Macchina CNC utilizzata in laboratorio*

In particolare, la realizzazione del processo di Friction Stir Welding nel nostro caso è avvenuta grazie all’utilizzo della macchina mostrata in Figura 34: centro di lavoro della Comec, modello m50, e CNC della Siemens, modello 810M GA2.

Per effettuare la lavorazione la macchina utilizza il G-code, che permette di gestire il posizionamento, quindi il movimento traslazionale e la rotazione dell’utensile tramite opportuni codici. La macchina ha bisogno di conoscere i vari parametri di processo (velocità di rotazione, di avanzamento e l’affondamento) e le posizioni x,y,z di inizio e fine lavorazione, così da poter svolgere un’interpolazione lineare e costruire il giunto di saldatura, che nel nostro caso risulta lineare.

### 3.4. Parametri FSW

Il processo di saldatura viene svolto su delle piastrine in ABS, di dimensioni 150x85x3 mm, che vengono bloccate tramite dei serraggi sul centro di lavoro verticale e subiscono la lavorazione, come mostrato in Figura 35. In particolare, ogni piastrino viene ricavato tramite stampa 3D ed è stampato verticalmente in modo che la direzione lungo la quale avviene la stampa sia concorde alla direzione lungo la quale vengono svolte le prove di trazione. In questo modo le prove che vengono svolte permetteranno di ottenere risultati più veritieri e all'interno dei piastrini si possono lasciare dei piccoli canali che arrivano in prossimità della zona da saldare attraverso i quali si fanno passare delle termocoppie, ben visibili in Figura 35.



*Figura 35 – Operazione di FSW dei piastrini in ABS. Si possono osservare i serraggi dei piastrini e le termocoppie (fili verdi) usate per determinare la temperatura raggiunta in prossimità del cordone di saldatura*

Nel corso degli studi sono state svolte varie saldature con parametri diversi, in modo da ottenere cordoni aventi finiture superficiali e proprietà meccaniche differenti. In particolare, nella Tabella 3 vengono elencate tutte le saldature eseguite. In generale, tutte le prove sono state svolte tramite utensile di diametro 15 mm e pinless, poiché le piastre saldate hanno uno spessore basso e il calore generato senza pin è sufficiente ad ottenere una buona saldatura. La presenza del pin avrebbe portato a problemi nel cordone di saldatura, la formazione di maggiore bava e maggiore usura dell'utensile. Naturalmente, nel caso in cui il materiale da saldare dovesse avere uno spessore maggiore si può considerare l'idea di utilizzare un utensile munito di pin. Inoltre, per permettere un migliore riscontro a livello visivo, la maggior parte delle prove sono state

effettuate su piastrine di due diversi colori (bianco e blu) in modo da poter osservare più facilmente il rimescolamento del materiale. Nella Tabella 3 è possibile osservare i parametri delle varie saldature svolte: i parametri principali che sono stati tenuti in considerazione sono la velocità di rotazione [rpm], la velocità di avanzamento dell'utensile [mm/min] e l'affondamento dell'utensile nella piastra [mm]. È importante osservare che sono state svolte sia saldature one side, cioè solo su una faccia delle piastre, e saldature double side, cioè prima lungo una faccia e poi lungo l'altra. Solitamente le saldature double side permettono di "chiudere" la saldatura e di eliminare eventuali difetti: è interessante studiare se le due diverse tecniche permettono di ottenere proprietà meccaniche del giunto saldato diverse.

Saldature double side			Saldature one side		
Velocità di rotazione	Velocità di avanzamento	Affondamento	Velocità di rotazione	Velocità di avanzamento	Affondamento
1250	20	0.4	1250	20	0.4
1650	20	0.4	1650	20	0.4
1650	20	0.3			
1650	40	0.4			

Tabella 3 – Saldature svolte tramite FSW

### 3.5. Provini

I provini vengono ricavati dalle piastre successivamente alla saldatura grazie ad una macchina che esegue tagli a getto d'acqua seguendo le norme ISO 527-1 (o ASTM D638) e ISO 178 (o ASTM D790). Per ogni coppia di piastre saldate si possono distinguere indicativamente due zone: la prima e la seconda metà del cordone di saldatura e da ognuna delle due zone vengono ricavati due provini, uno per le prove di trazione ed uno per le prove di piegatura. I provini sono stati rinominati: T1 e T2, in base alla zona delle piastre a cui appartengono, per le prove di trazione, e P1 e P2 per le prove di piegatura, come mostrato in Figura 36. Le caratteristiche delle due zone, naturalmente, sono molto simili e non ci sarà una grande differenza tra le proprietà meccaniche dei provini dell'una o dell'altra zona.

Tutti i provini per le prove di trazione presentano una sezione rettangolare nella zona centrale mentre alle estremità vengono ricavate delle sezioni utili per effettuare il

serraggio sulla macchina. Questa tipologia di provini è detta “a doppio T” o “a osso di cane”. I provini per le prove di piegatura, invece, presentano una forma rettangolare.

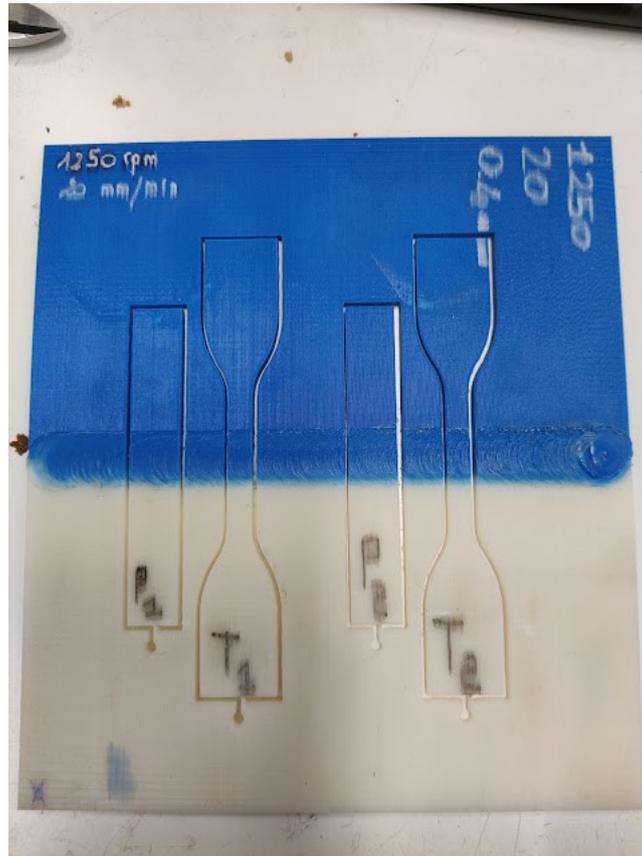


Figura 36 – Provini ricavati dalle piastre saldate

### 3.6. Prova di trazione

La prova di trazione, come è possibile ricavare dalla relazione di Forcellese [34], è la più importante tra le prove distruttive e fornisce, oltre alle proprietà meccaniche, anche una descrizione quantitativa del comportamento alla deformazione plastica di un materiale. La macchina, che nel caso delle nostre prove è una macchina di prova universale MTS 810, mostrata in Figura 37, misura istantaneamente la forza applicata ( $P$ ) e l'allungamento del provino ( $\Delta L=L-L_0$ ), che verranno rispettivamente trasformati in tensione nominale ( $s=P/A_0$ ) e deformazione nominale ( $e= \Delta L/ L_0$ ).



Figura 37 – Macchina universale MTS 810 configurata per la prova di trazione

Ricavata la curva nominale  $s$ - $e$ , mostrata in Figura 38 a, posso ottenere la curva reale tensione-deformazione  $\sigma$ - $\epsilon$ , mostrata in Figura 38 b, dove le grandezze si riferiscono sempre alla sezione istantanea del provino e non a quella iniziale.

Passo dai valori della tensione e deformazione nominali a quelli reali tramite due relazioni:

$$\sigma = s (1 + e) , \quad \epsilon = \ln (1 + e)$$

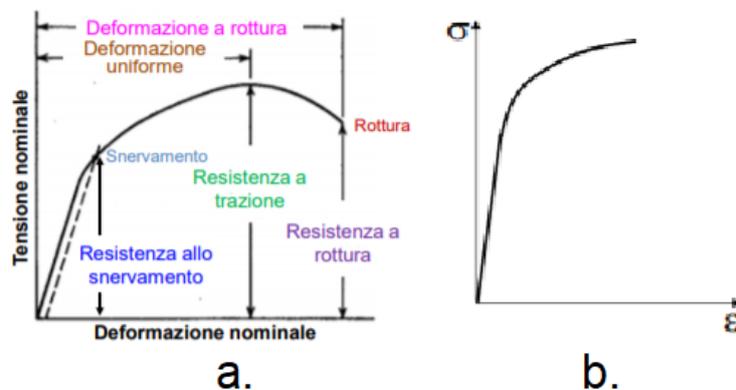


Figura 38 – Curva nominale (a) e curva reale (b) della prova di trazione [34]

Nella curva tensione-deformazione è possibile distinguere due zone: una regione elastica, definita dalla retta lineare, ed una regione plastica, dove ogni deformazione rimane anche togliendo la tensione a cui è soggetto il provino e dove la sezione del provino inizia a diminuire. Inoltre, si possono ricavare molte altre informazioni, tra cui:

- Resistenza allo snervamento: la tensione alla quale inizia la deformazione plastica, definita come la deformazione corrispondente ad una deformazione dello 0,02% del provino
- Resistenza a trazione: valore massimo della tensione, ottenuta in corrispondenza dell'inizio della strizione

- Modulo di Young: grandezza che esprime il rapporto tra deformazione e tensione, e corrisponde all'inclinazione della retta costituente la regione elastica
- Duttilità: capacità di un materiale di deformarsi prima di arrivare a rottura
- Resilienza: capacità del materiale di immagazzinare energia in campo elastico
- Tenacità: capacità del materiale di immagazzinare energia in campo plastico

Per la realizzazione della prova di trazione con la macchina MTS 810 in laboratorio si è presa come riferimento la norma ISO 527-1 (o ASTM D638). La prova è stata svolta fissando il provino, in posizione verticale, alle due estremità tramite due afferraggi della macchina: questa ha applicato una forza di trazione sul provino fino ad arrivare alla rottura. I dati sono stati acquisiti da un computer tramite una scheda di acquisizione ed un software, mettendo in relazione la forza applicata dalla macchina con lo spostamento da essa effettuato. I dati acquisiti sono stati inseriti automaticamente in un file Excel, elaborati ed hanno permesso la realizzazione dei grafici tensione-deformazione simili a quelli visti precedentemente, utili per determinare le caratteristiche del materiale.

Le prove di trazione svolte sulle piastre saldate tramite FSW hanno l'obiettivo di analizzare come, al variare dei diversi parametri di saldatura (velocità di rotazione, velocità di avanzamento, affondamento, ecc.), variano anche le proprietà meccaniche del provino.

In particolare, le prove sono state svolte sulle saldature mostrate in Tabella 4 e, per ogni tipo di saldatura, sono stati provati due provini, come spiegato precedentemente:

Saldature double side			Saldature one side		
Velocità di rotazione	Velocità di avanzamento	Affondamento	Velocità di rotazione	Velocità di avanzamento	Affondamento
1250	20	0.4	1250	20	0.4
1650	20	0.4	1650	20	0.4

*Tabella 4 – Saldature su cui sono state svolte prove di trazione*

Quando verranno descritte le varie saldature svolte la notazione D è usata per indicare le saldature double side, la sua mancanza indica le saldature one side.

### 3.7. Prova di flessione

Come descritto nella relazione di Petrucci [35], la prova di flessione, o prova di piegatura, permette di determinare il modulo di Young e stimare la tensione di rottura,

principalmente di materiali fragili, anche detta tensione di rottura a flessione  $\sigma_f$ . Questo tipo di prova solitamente non è molto utilizzata poiché si preferisce quella di trazione, in quanto fornisce molti più dati sulle proprietà meccaniche del materiale. È possibile svolgere prove a tre punti (i provini vengono vincolati con due appoggi alle estremità e caricati con una forza al centro) o prove a quattro punti (in questo caso i cunei con cui è applicata la forza al centro del provino sono due e sono disposti simmetricamente rispetto alla sua mezzeria). La prova consiste nel piegare il materiale di spessore  $a$ , gradualmente e lentamente, in modo che venga sottoposto ad una sollecitazione meccanica applicata mediante un cilindro di diametro  $D$ , come mostrato in Figura 39, che origina deformazioni permanenti. La prova può essere eseguita fino a che sia raggiunto un determinato valore dell'angolo  $\alpha$ , oppure fino a che si manifestino le prime screpolature in corrispondenza della superficie esterna del materiale piegato.

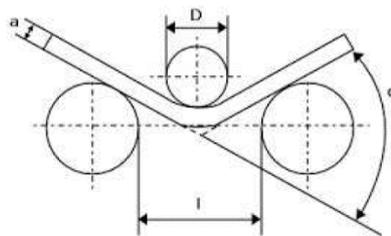


Figura 39 – Schema di una prova di flessione

Il provino utilizzato per queste prove, generalmente, presenta una sezione rettangolare e la tensione subita varia linearmente lungo lo spessore: lo snervamento inizialmente è raggiunto solo in un sottile strato superficiale, non in tutta la sezione, quindi, questa prova non è utile a determinare l'inizio dello snervamento ma è utile a determinare l'attitudine del materiale a lasciarsi deformare.

Le prove di flessione in laboratorio sono state svolte seguendo la normativa ISO 178 (o ASTM D790), che definiscono i metodi di prova per determinare le proprietà relative alla flessione delle plastiche non rinforzate e rinforzate, utilizzando un sistema di carico a tre punti applicato al provino. I provini devono essere solidi, uniformemente rettangolari e a sezione rettangolare. Per svolgere correttamente la prova è importante che il punzone centrale, che applica il carico direttamente sulla saldatura, abbia un'elevata velocità di acquisizione, cioè di almeno 100 Hz. Anche per queste prove è stata utilizzata la macchina universale MTS 810, mostrata in Figura 40, con una configurazione adatta alle prove di flessione. I dati ottenuti da queste prove sono stati acquisiti in maniera analoga a quanto fatto per le prove di trazione.

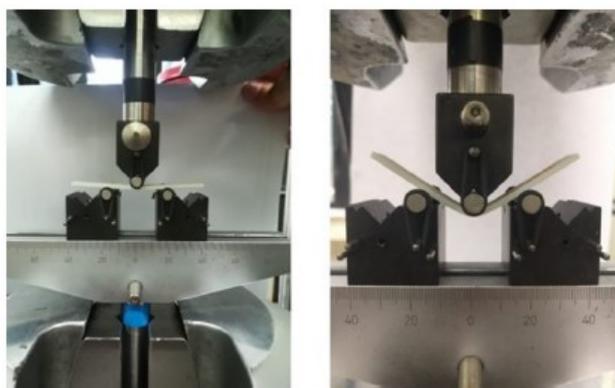


Figura 40 – Macchina universale MTS 810 configurata per la prova di flessione

Le saldature su cui sono state eseguite le prove di trazione sono quelle elencate nella Tabella 5. Come spiegato precedentemente, da ogni tipo di saldatura sono stati ricavati due provini su cui svolgere la prova di piegatura e poi sono stati scelti quelli con i dati più significativi.

Saldature double side			Saldature one side		
Velocità di rotazione	Velocità di avanzamento	Affondamento	Velocità di rotazione	Velocità di avanzamento	Affondamento
1250	20	0.4	1250	20	0.4
1650	20	0.4	1650	20	0.4

Tabella 5 – Saldature su cui sono state svolte prove di piegatura

Nel caso delle saldature one side i provini saldati sono stati posizionati in modo tale che la gobba tipica della curva di flessione si creasse nel lato in cui è stata svolta la saldatura, cioè in modo che sia il lato saldato quello sottoposto a tensioni maggiori. Come nel caso delle prove di trazione, quando verranno descritte le varie saldature svolte la notazione D è usata per indicare le saldature double side, la sua mancanza indica le saldature one side.

### 3.8 Stereomicroscopio

I cordoni di saldatura e i provini testati con prove di trazione e di flessione sono osservati tramite uno stereomicroscopio, con lo scopo di analizzare dettagliatamente le caratteristiche strutturali e superficiali delle parti osservate. Lo stereomicroscopio utilizzato è il modello Leica EZ4 D, mostrato in Figura 41 che offre uno zoom 4,4:1 di alta qualità e un'illuminazione ad elevato contrasto fornita da 7 LED, che garantiscono luce incidente ed obliqua. Nello stereomicroscopio è integrata una fotocamera digitale che

consente la visione rapida ed in tempo reale su uno schermo di computer dell'immagine, grazie al trasferimento da stereo a microscopio USB.



*Figura 41 – Stereomicroscopio Leica EZ4 D*

Le immagini sono state acquisite grazie ad un software apposito, Leica LAS EZ, che permette di regolare qualità e caratteristiche (come luminosità e formato) delle immagini da acquisire.

## **4. Risultati e discussione**

### **4.1. Analisi delle prove di trazione**

Dopo aver eseguito le saldature tramite FSW sulle coppie di piastrine in ABS citate precedentemente sono state svolte prove di trazione sui provini ricavati tramite taglio ad acqua da queste ultime. In particolare, le prove svolte hanno portato all'acquisizione di dati sulla forza applicata dalla macchina e il conseguente spostamento dei provini. Queste due grandezze sono state utilizzate per ottenere tensione e deformazione corrispondenti, come prescritto dalla norma ISO 527-1 (o ASTM D638).

A questo punto sono stati ricavati i grafici tensione-deformazione di tutti i provini e sono stati messi a confronto, come è possibile osservare in Figura 42: è possibile notare che le proprietà meccaniche dei cordoni di saldatura sono diverse rispetto a quelle del materiale non saldato. In particolare, la curva nel grafico in Figura 42 è stata ottenuta svolgendo una prova di trazione in laboratorio su un provino non saldato e da quest'ultima si ricava che questo ABS ha una tensione massima a trazione di 27,57078 Mpa ad una deformazione a trazione di 0,032527, superiore rispetto a quelle dei provini saldati.

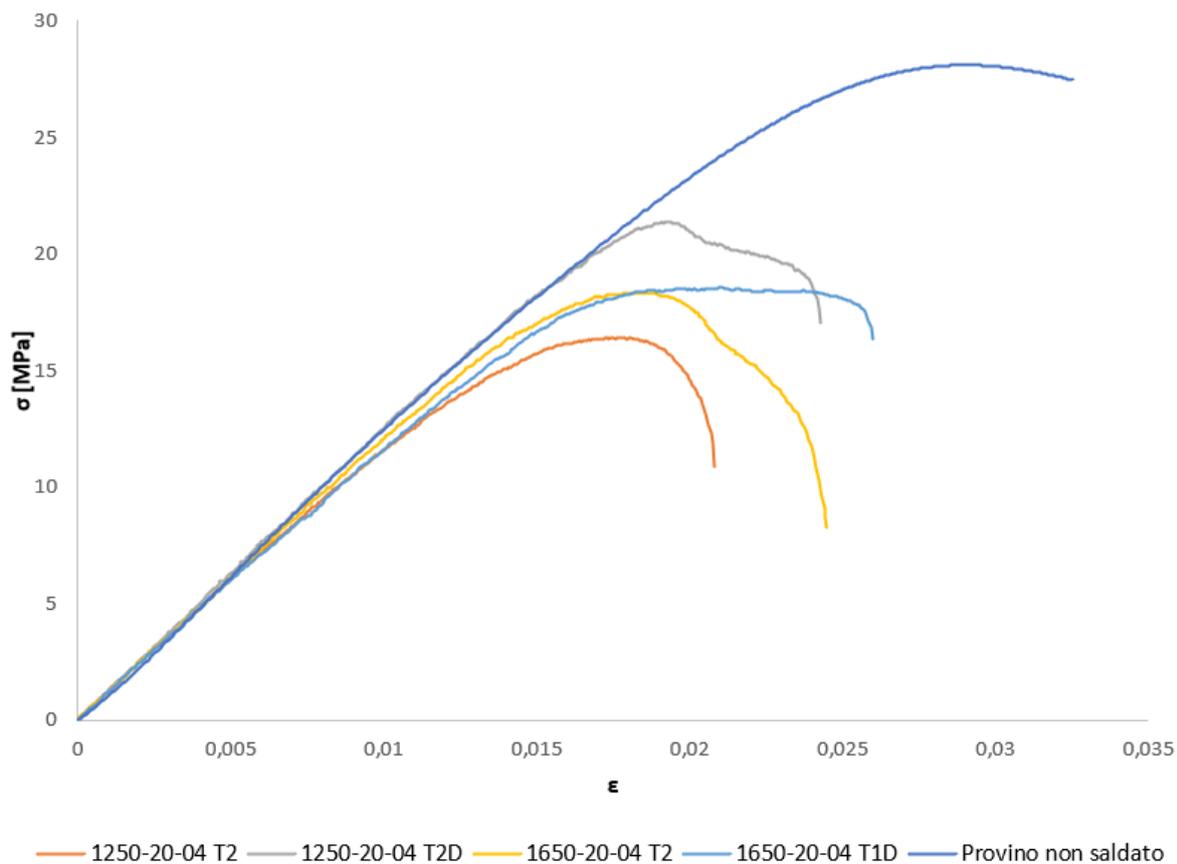


Figura 42 – Grafico di confronto delle prove di trazione

Oltre ai grafici dei provini saldati e di quello non saldato, è stato possibile anche ricavare la tensione massima ( $\sigma_{max}$ ) e di rottura ( $\sigma_{rot}$ ) dei provini e le corrispondenti deformazioni ( $\epsilon$  e  $\epsilon_{rot}$ ), come mostrato in Tabella 6.

Saldatura	Tensione massima $\sigma_{max}$ [Mpa]	Deformazione massima $\epsilon_{max}$	Tensione di rottura $\sigma_{rot}$ [Mpa]	Deformazione di rottura $\epsilon_{rot}$
1250-20-04 T2	13,82643	0,015837	8,011289	0,020548
1250-20-04 T2D	21,383711	0,019332	17,051526	0,024287
1650-20-04 T2	18,354389	0,018668	8,300507	0,024487
1650-20-04 T1D	18,56013	0,02103	16,35498	0,025993
Provino non saldato	28,52566	0,027872	27,57078	0,032527

Tabella 6 – Proprietà meccaniche ottenute dalle prove di trazione

#### **4.1.1. Confronto one side – double side**

Le prime differenze che si notano nella Tabella 6 sono quelle tra le saldature effettuate con stessi parametri (velocità di rotazione, velocità di avanzamento e affondamento) ma con una o due passate. Nel caso delle saldature con velocità di rotazione 1250 rpm si nota che la doppia passata porta ad un importante aumento della tensione massima a trazione da 13.826 a 21.384 Mpa e della deformazione massima a trazione da 0.016 a 0.019. Allo stesso tempo aumentano anche la tensione e la deformazione di rottura.

Per quanto riguarda i provini con velocità di rotazione di 1650 rpm si nota un leggero aumento della tensione massima da 18.354 a 18.560 MPa ed un aumento più accentuato della deformazione massima da 0.019 a 0.021. Tensione e deformazione di rottura subiscono un ampio aumento.

Si può dedurre che, come già anticipato nello stato dell'arte, l'utilizzo di saldature a doppia passata aumenta le proprietà meccaniche a trazione dei cordoni di saldatura, probabilmente perché vengono eliminati difetti di saldatura che rimangono per saldature ad una sola passata.

#### **4.1.2. Confronto tra velocità di rotazione diverse e parametri costanti**

A questo punto è possibile confrontare anche le proprietà meccaniche dei cordoni di saldatura ottenuti mantenendo costante velocità di avanzamento ed affondamento, riferendosi sempre alla Tabella 6.

Nel caso dei cordoni saldati one side si nota che all'aumentare della velocità di rotazione aumenta la tensione massima e la deformazione massima. Si può ipotizzare che questo aumento sia dovuto ad un maggior aumento delle temperature durante la saldatura e di conseguenza ad un maggior rimescolamento del materiale che genera un giunto più resistente a trazione. Tale aumento è visibile anche nel caso delle tensioni e delle deformazioni di rottura.

Nel caso delle saldature double side, invece, all'aumentare della velocità di rotazione dell'utensile diminuiscono sia la tensione massima sia la tensione di rottura. Si può ipotizzare che tale diminuzione sia dovuta al fatto che la seconda passata di saldatura porta ad un ulteriore aumento della temperatura, che per velocità di rotazione troppo elevate risulta eccessivo e porta ad una diminuzione delle proprietà meccaniche.

Si può affermare senza dubbi che, tra le saldature prese in considerazione per le prove, quella con migliori proprietà meccaniche è la 1250-20-04 T2D.

## 4.2. Analisi delle prove di flessione

Le prove di flessione svolte sui provini saldati e sui provini del materiale base hanno permesso di ottenere dei dati e dei grafici, come quello in Figura 43, in cui vengono messi a confronto i risultati delle prove di flessione, che vengono riassunte anche nella Tabella 7. Nel grafico di confronto si trova anche la curva tensione-deformazione ricavata dalla prova a flessione di un provino non saldato: in particolare questo è caratterizzato da tensione massima a flessione di 57.03697 Mpa e da deformazione massima a flessione di 0.04779.

In particolare, per ottenere le curve del grafico sono state utilizzate delle curve di tendenza: polinomi del sesto grado che approssimano le curve spezzate che si otterrebbero utilizzando tensione e deformazione ottenute durante la prova.

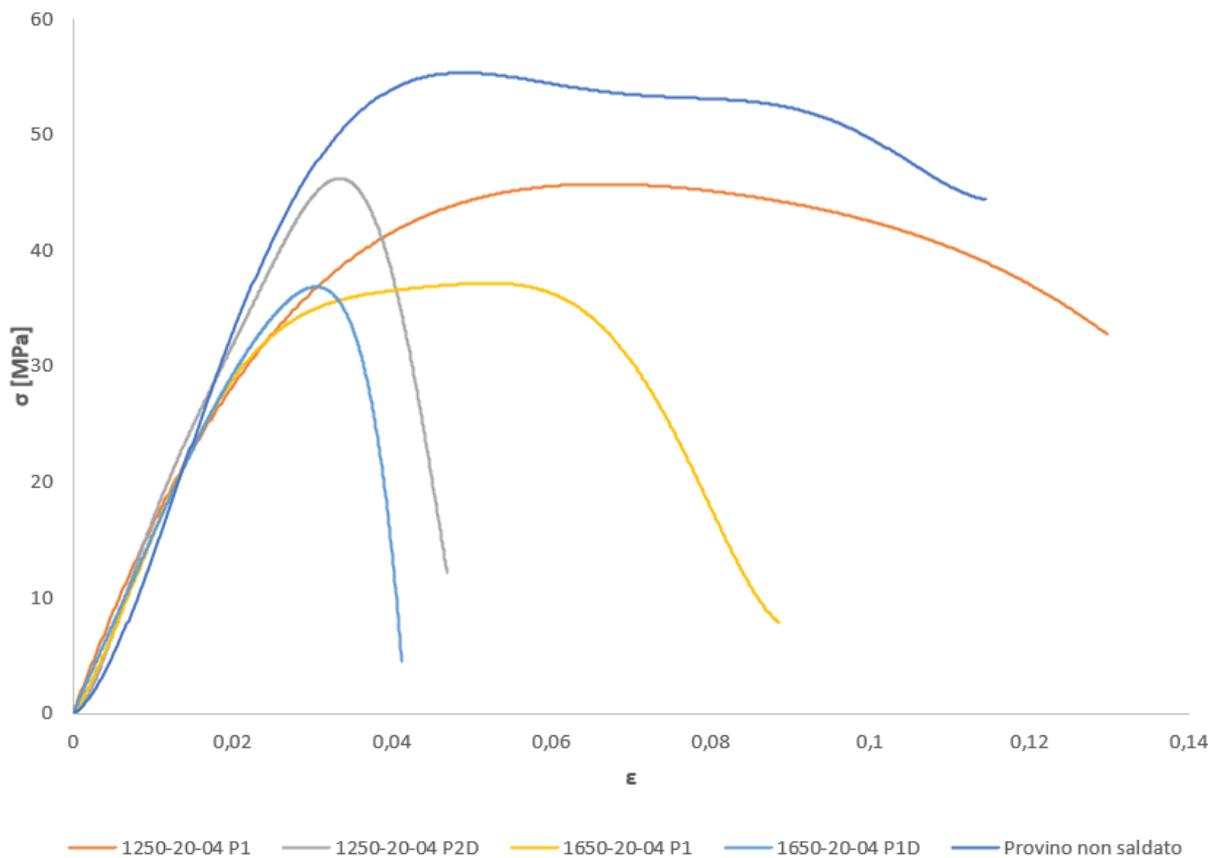


Figura 43 – Grafico di confronto delle prove di flessione

Nel caso delle prove di flessione le caratteristiche meccaniche che vengono calcolate sono la tensione massima e la deformazione massima a flessione e il modulo di elasticità, che viene calcolato come coefficiente angolare della linea di tendenza lineare della curva tensione-deformazione per una deformazione compresa tra 0 e 0,01. In particolare, si può notare sin da subito che i moduli di elasticità delle saldature in tabella sono inferiori rispetto a quello del materiale non saldato, che è di 1691 Mpa, come mostrato in Tabella 1.

<b>Saldatura</b>	<b>Tensione massima</b> $\sigma_{\max}$ [Mpa]	<b>Deformazione massima</b> $\epsilon_{\max}$	<b>Modulo di elasticità</b> <b>E [Mpa]</b>
1250-20-04 P1	47,54656	0,072632	1390
1250-20-04 P2D	46,66757	0,035861	1641
1650-20-04 P1	38,78769	0,039566	1597
1650-20-04 P1D	37,88234	0,029329	1459,8
Provino non saldato	57,03697	0,04779	1691

*Tabella 7 – Proprietà meccaniche ottenute dalle prove di flessione*

#### **4.2.1. Confronto one side – double side**

La prima osservazione che è possibile fare guardando il grafico in Figura 43 è che c'è una piccola differenza tra la tensione massima a flessione tra le saldature one side e double side, in cui vengono mantenuti costanti gli altri parametri. Infatti, in entrambi i casi le saldature one side hanno una tensione massima leggermente minore: per velocità di rotazione di 1250 rpm la tensione massima passa da 47.457 a 46.668 Mpa, mentre per velocità di rotazione di 1650 rpm passa da 38.788 a 37.882 Mpa.

La maggiore differenza, però, si nota sulla deformazione massima a flessione raggiunta: nel caso di velocità di rotazione di 1250 rpm si passa da una deformazione di 0.073 per la one side a 0.036 per la double side e nel caso di velocità di rotazione di 1650 rpm si passa da 0.040 a 0.029. In entrambi i casi si ha una netta diminuzione della deformazione massima nel caso delle saldature double side: è possibile ipotizzare che, essendo la double side una saldatura “chiusa”, la tensione necessaria a deformare la saldatura sia maggiore a parità di deformazione raggiunta rispetto alla

saldatura one side. Infatti, è possibile vedere la saldatura one side come una saldatura “aperta”: come si vede anche nelle foto allo stereomicroscopio proposte successivamente, c’è un lato in cui il giunto è aperto e permette una maggiore flessibilità del cordone di saldatura. Si può affermare che il giunto creato con saldatura double side sia più rigido di quello creato con saldatura one side: si può intuire che la cricca si creerà per tensioni simili ma con deformazioni molto diverse.

Per quanto riguarda, invece, il modulo di elasticità sembra non esserci una correlazione fissa tra saldature one side e double side.

#### **4.2.2. Confronto tra velocità di rotazione diverse e parametri costanti**

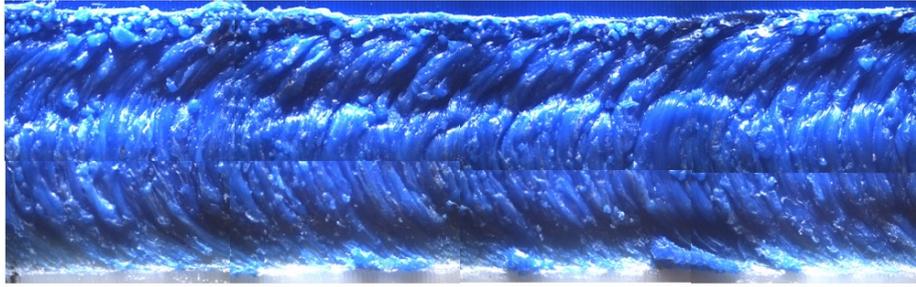
Analizzando le proprietà meccaniche delle saldature one side e double side a due a due si nota che aumentando la velocità di rotazione dell’utensile diminuisce bruscamente la tensione massima a flessione raggiunta: una velocità di rotazione maggiore comporta un maggior rimescolamento di materiale, quindi un giunto più rigido, come ipotizzato anche nel paragrafo precedente, che porta ad una rottura anticipata del cordone se sottoposto a flessione.

All’aumentare della velocità di rotazione diminuisce anche la deformazione massima a cui può essere sottoposto il giunto saldato, per lo stesso motivo descritto precedentemente.

Anche in questo caso non ci sono correlazioni fisse tra la variazione della velocità di rotazione e il modulo di elasticità.

### **4.3. Analisi allo stereomicroscopio delle saldature con minore qualità superficiale**

Per diversi motivi si è deciso di svolgere solamente un’analisi visiva sulle piastrine in cui la saldatura ha generato cordoni di qualità inferiore, con interruzioni o con eccessiva asportazione di materiale. Infatti, giunti saldati di questo genere hanno proprietà meccaniche inferiori rispetto a cordoni che già alla vista si presentano migliori. In particolare, sono state svolte delle analisi allo stereomicroscopio e si sono ottenute foto in alta qualità delle saldature double side con parametri 1650-20-03, mostrate in Figura 44 e in Figura 45, e 1650-40-04, mostrate in Figura 46 e in Figura 47.



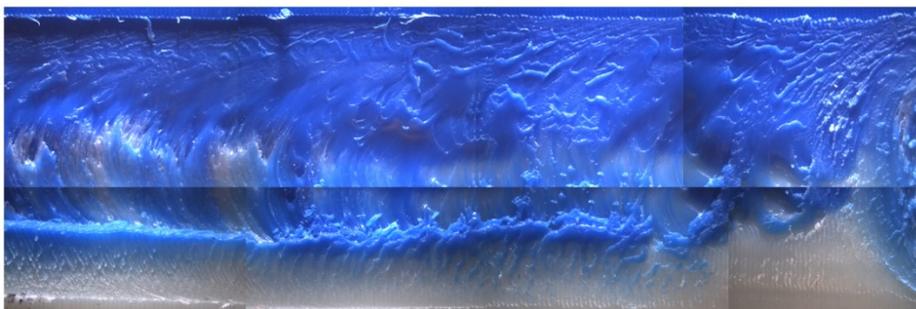
*Figura 44 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-20-03 - prima passata*



*Figura 45 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-20-03 - seconda passata*



*Figura 46 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-40-04 - prima passata*



*Figura 47 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-40-04 - seconda passata*

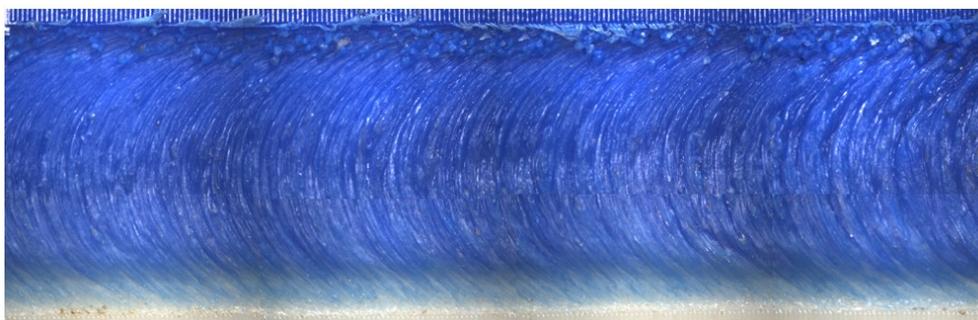
Dai precedenti ingrandimenti è possibile notare i difetti che caratterizzano le saldature con questi parametri: il primo difetto riguarda il pessimo rimescolamento del materiale, che, non essendo omogeneo, non garantisce al giunto buone proprietà meccaniche. In particolare, in Figura 47 è possibile notare che il materiale è rimasto completamente separato: nella parte inferiore del cordone c'è solo il materiale bianco mentre in quella superiore solo quello blu.

Da tali ingrandimenti è possibile notare anche la differenza tra la prima e la seconda passata della saldatura: nella prima passata si nota un rigonfiamento al centro del giunto, dato dalla seconda passata dell'utensile dalla parte opposta. Grazie a questo particolare si può affermare che, nonostante la saldatura non sia perfettamente riuscita, l'utensile è penetrato abbastanza e ha permesso il rimescolamento di materiale nel punto di contatto tra le due piastre, anche se non ottimale.

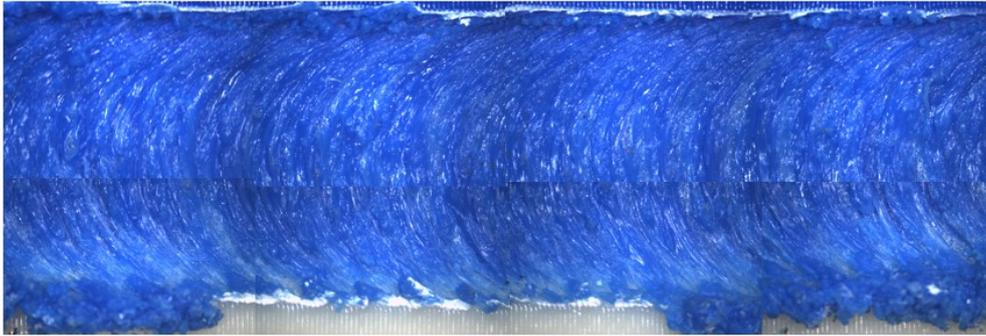
Un altro difetto che caratterizza le due saldature mostrate in Figura 44 e in Figura 45 è la presenza di eccessiva bava ai lati del cordone di saldatura: tale difetto è dato da un eccessivo spostamento di materiale all'esterno, che porta anche ad un minore rimescolamento. È necessario modificare i parametri di saldatura in modo da ridurre il più possibile la bava: un possibile modo è quello di diminuire l'affondamento o diminuire la velocità di rotazione dell'utensile, ma il problema è che in entrambi i casi si rischia anche di diminuire il rimescolamento del materiale e, quindi, bisogna essere molto attenti nel modificare i parametri.

#### **4.4. Analisi allo stereomicroscopio delle saldature con maggiore qualità superficiale**

Sono state svolte delle analisi allo stereomicroscopio anche dei cordoni di saldatura di maggiore qualità superficiale, cioè quelli ottenuti con parametri 1250-20-04, mostrato in Figura 48, e con 1650-20-04, mostrato in Figura 49. In questi due ultimi casi, a differenza di quanto visto con le precedenti saldature, il rimescolamento a livello superficiale è quasi perfetto, come si può notare dalla classica forma ad "onion rings" che viene presa dal materiale. La bava ai lati del cordone è molto limitata e vengono rispettati tutti i presupposti per avere dei giunti saldati con buone caratteristiche meccaniche.



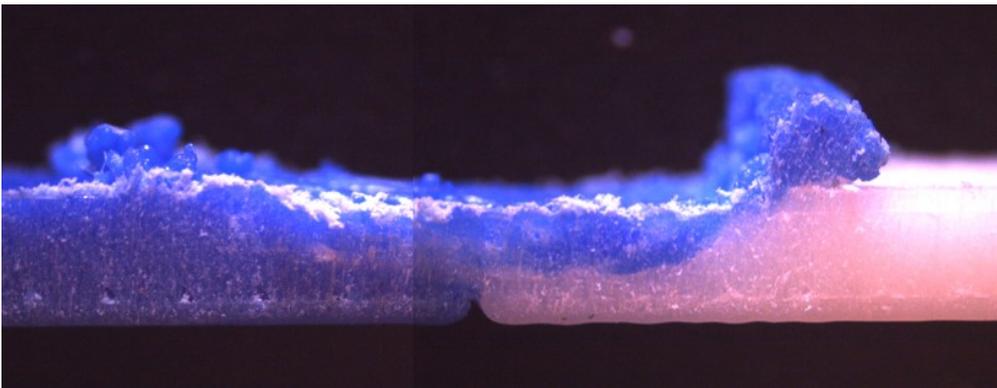
*Figura 48 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1250-20-0.4*



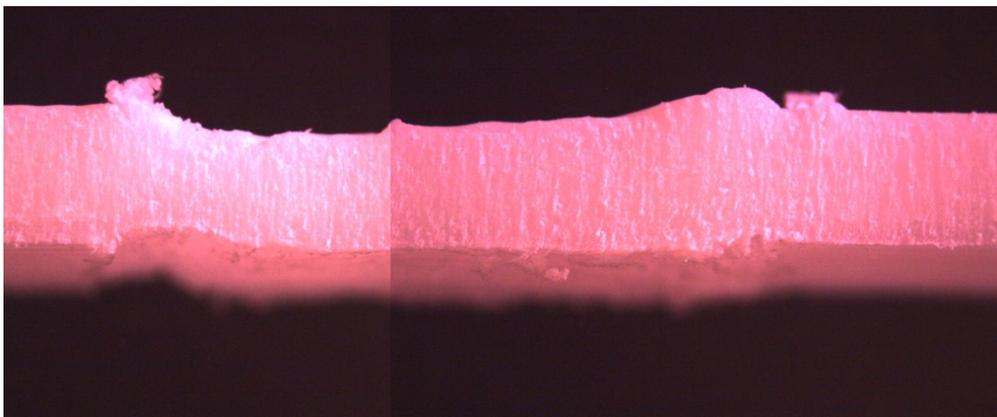
*Figura 49 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-20-0.4*

È importante notare come, nonostante le prove con i parametri 1250-20-04 e 1650-20-04 siano state effettuate sia one side che double side, in questo caso sono state fotografate solo le saldature one side in rappresentanza anche delle altre.

Dopo aver effettuato le prove di trazione e di flessione si è svolta anche l'analisi allo stereomicroscopio delle sezioni interne dei provini. In particolare, per prime vengono riportate le foto della sezione interna dei giunti di saldatura, che si può vedere dopo aver tagliato con getto d'acqua i provini.



*Figura 50 – Sezione della saldatura 1650-20-04*



*Figura 51 – Sezione della saldatura 1650-20-04 D*

In Figura 50 e in Figura 51 è possibile vedere le sezioni dei giunti saldati con parametri 1650-20-04, ma nel primo caso con saldatura one side e nel secondo double side. Per

prima cosa è possibile notare che nel caso one side la saldatura non è penetrata completamente nello spessore del provino, ma si ferma circa a metà, mentre nel caso double side la saldatura, quindi il materiale deformato, interessa l'intero spessore del provino: è questa la differenza che si intende tra saldatura "aperta" e saldatura "chiusa" nel caso delle saldature per attrito. In particolare, in Figura 50, grazie alle piastre di due colori diversi, si vede nettamente la differenza tra le zone in cui il materiale subisce il rimescolamento e quelle in cui ciò non avviene.

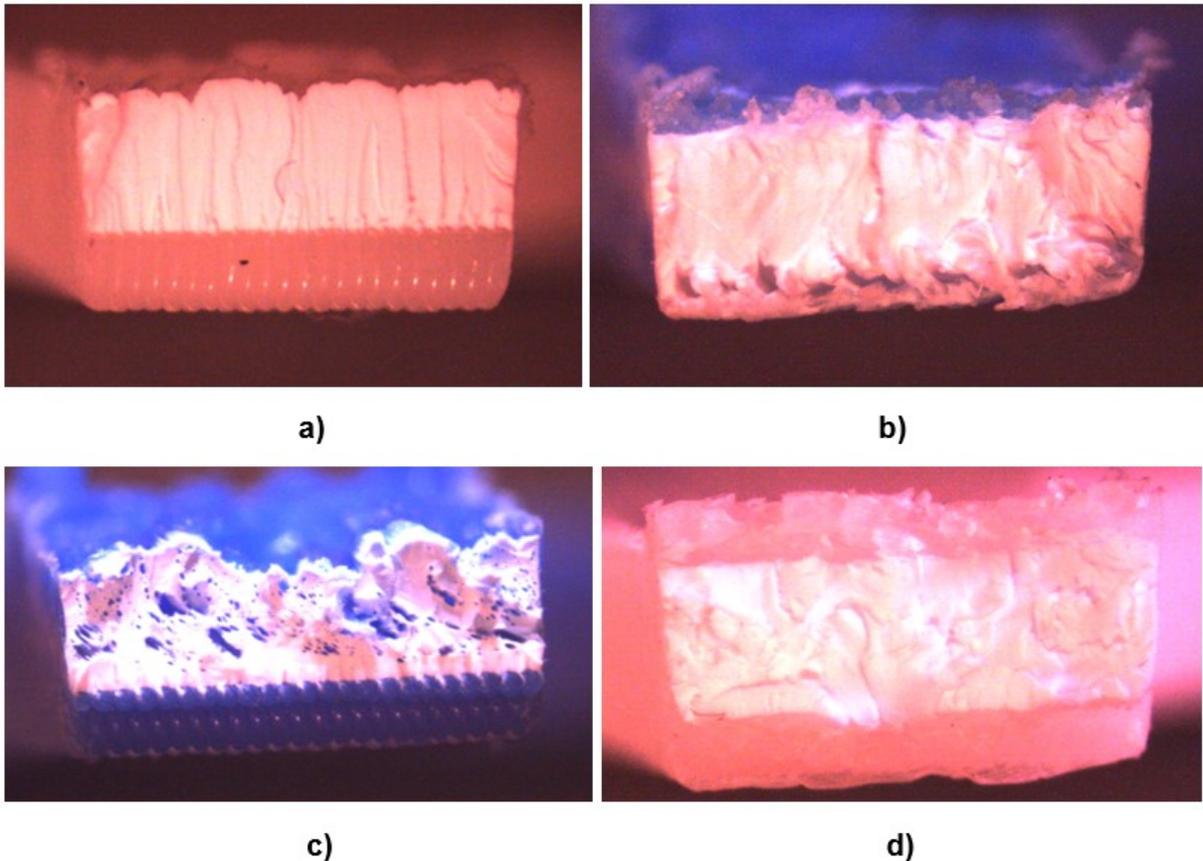
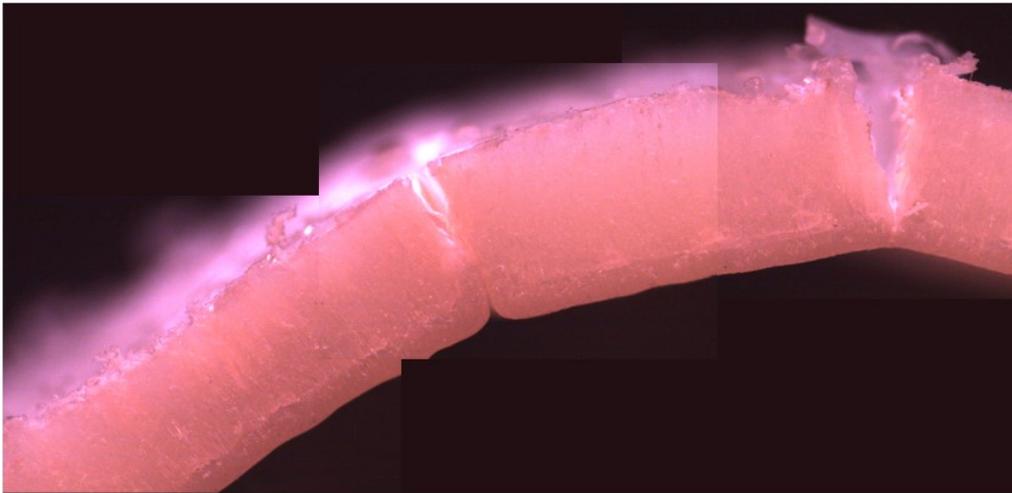


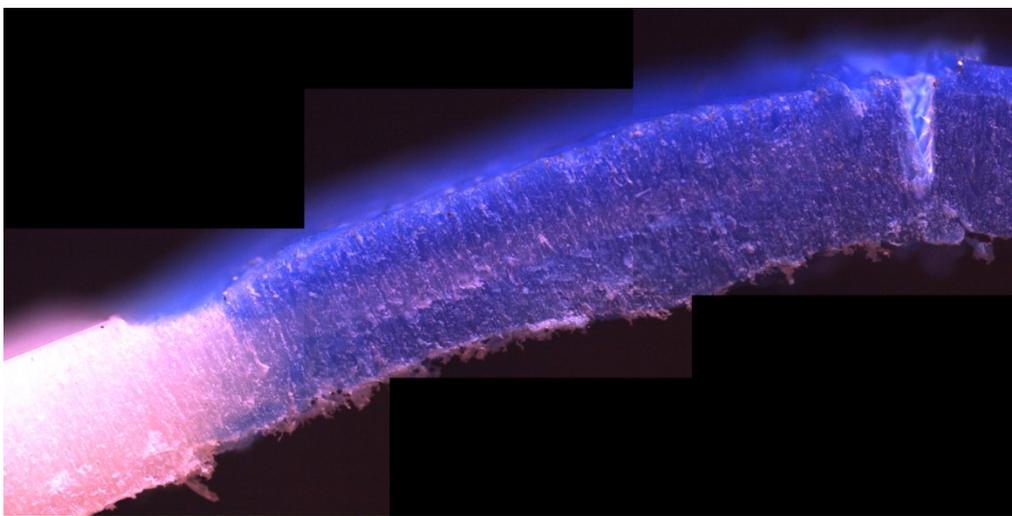
Figura 52 – Sezioni di rottura dei provini generate dalla prova di trazione. Provini con parametri: a) 1250-20-04, b) 1250-20-04 D, c) 1650-20-04, d) 1650-20-04 D

In Figura 52 è possibile osservare le sezioni di rottura dei provini sottoposti a prove di trazione. La prima caratteristica che si nota su tutte è il tipico colore bianco che ottiene la plastica quando è sottoposta ad una forte deformazione: le zone di colore bianco acceso sono quelle in cui il materiale ha subito il rimescolamento e ha creato il giunto che, sottoposto ad una trazione elevata, si è rotto. Dalle foto, ottenute allo stereomicroscopio, è possibile notare la differenza all'interno del giunto saldato che c'è tra le saldature one side e double side: in Figura 52 a) e in Figura 52 c) si vede molto bene fino a che profondità arriva la saldatura e che la zona che non ha subito rimescolamento di materiale non è interessata a deformazione plastica e a rottura.

Tale zona è quella inferiore, che rimane di colore bianco nel primo caso ed ha uno spessore di circa 1mm, mentre rimane blu nel secondo caso ed ha uno spessore di circa 0.8mm. Nelle saldature double side, invece, si nota, soprattutto in Figura 52 d), che la zona maggiormente sottoposta al rimescolamento di materiale è quella centrale. Infine, viene svolta anche un'analisi allo stereomicroscopio dei punti di rottura dei provini durante le prove di flessione. In particolare, in Figura 53 e in Figura 54 vengono mostrate le sezioni di rottura dei provini saldati con parametri 1250-20-04, nel primo caso one side e nel secondo double side.



*Figura 53 – Sezione di rottura a flessione del provino 1250-20-04*



*Figura 54 – Sezione di rottura a flessione del provino 1250-20-04 D*

Si nota in entrambe le foto che la cricca si è formata a sinistra del cordone saldato, non lungo il giunto di saldatura: nel caso della saldatura double side il giunto saldato ha retto alla prova di flessione ma si è creata una cricca nella sezione tra il giunto e la zona non saldata. Nel caso one side, invece, si sono create due cricche: quella principale, come nel caso double side, in corrispondenza della sezione che divide il

materiale deformato da quello non deformato, mentre un'altra più piccola si è formata in corrispondenza del giunto testa a testa delle due piastre. Inoltre, come facilmente prevedibile, la cricca si è creata nel lato delle piastre opposto al punzone che fornisce la forza per eseguire la prova, cioè nel lato che subisce una maggiore deformazione.

## 4.5. Analisi delle temperature

Sono stati ottenuti risultati molto interessanti misurando la temperatura del giunto saldato durante il processo, utilizzando delle termocoppie. Le termocoppie sono state inserite all'interno delle piastre utilizzando dei fori ciechi stampati appositamente, come schematizzato in Figura 55: i fori arrivano a 2 mm dal bordo di saldatura, quindi, non si misura la temperatura nel punto preciso di saldatura. Per questo motivo, a causa della bassa conduzione termica dell'ABS, le temperature registrate sono molto più basse rispetto a quelle che ci si aspetterebbe.

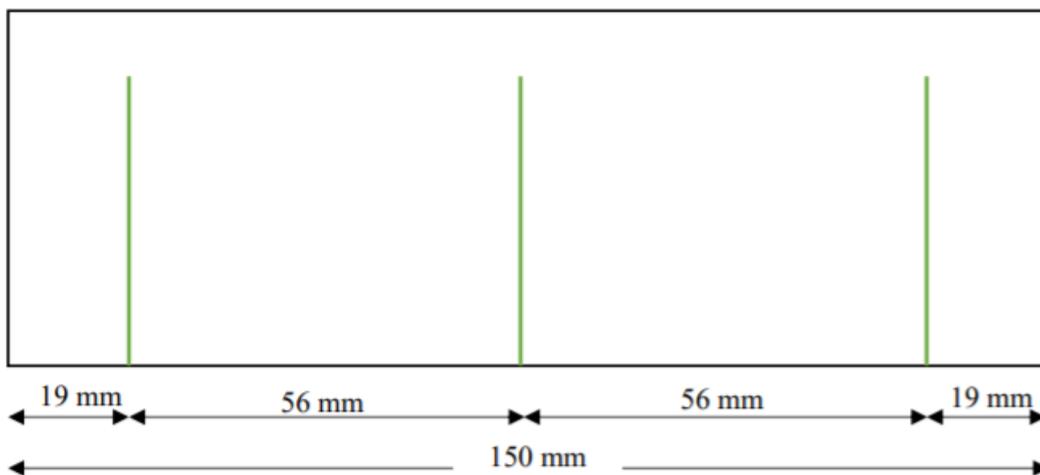


Figura 55 – Schema rappresentante la posizione delle termocoppie all'interno delle piastre in ABS

Le termocoppie sono state inserite all'interno delle piastre ad un estremo e dall'altro lato sono state collegate ad un sensore di temperatura, che rileva la temperatura e le sue variazioni in tempo reale, come mostrato in Figura 56.



Figura 56 – Sensori di temperatura collegati alla piastra durante la saldatura

Le misurazioni delle temperature e le conseguenti acquisizioni dei dati sono state svolte durante le saldature con parametri 1250-20-04 e 1650-20-04. Tramite queste misurazioni è stato possibile creare dei grafici in cui si può vedere l'andamento delle temperature durante la saldatura. Come accennato precedentemente, le temperature rilevate sono molto più basse rispetto a quelle effettive nel cordone di saldatura: tramite precedenti studi, utilizzando una termocoppia libera, si è appurato che la temperatura raggiunta verso la fine della saldatura sul cordone si aggira attorno ai 120 °C. Nonostante questo, è interessante esaminare i grafici realizzati, che descrivono molto bene l'andamento delle temperature, come si può vedere in Figura 57 e in Figura 58.

In entrambi i grafici è possibile notare che la temperatura di ogni termocoppia aumenta fino ad un massimo, quando l'utensile si avvicina a quest'ultima, per poi diminuire man a mano che l'utensile si allontana. La temperatura massima è mantenuta solamente per i pochi istanti in cui l'utensile è molto vicino alla termocoppia e questo è giustificato dal fatto che l'ABS è un materiale a bassa conduzione termica e gran parte del calore che si genera viene accumulato nell'utensile, che è in materiale metallico, ad alta conduzione termica.

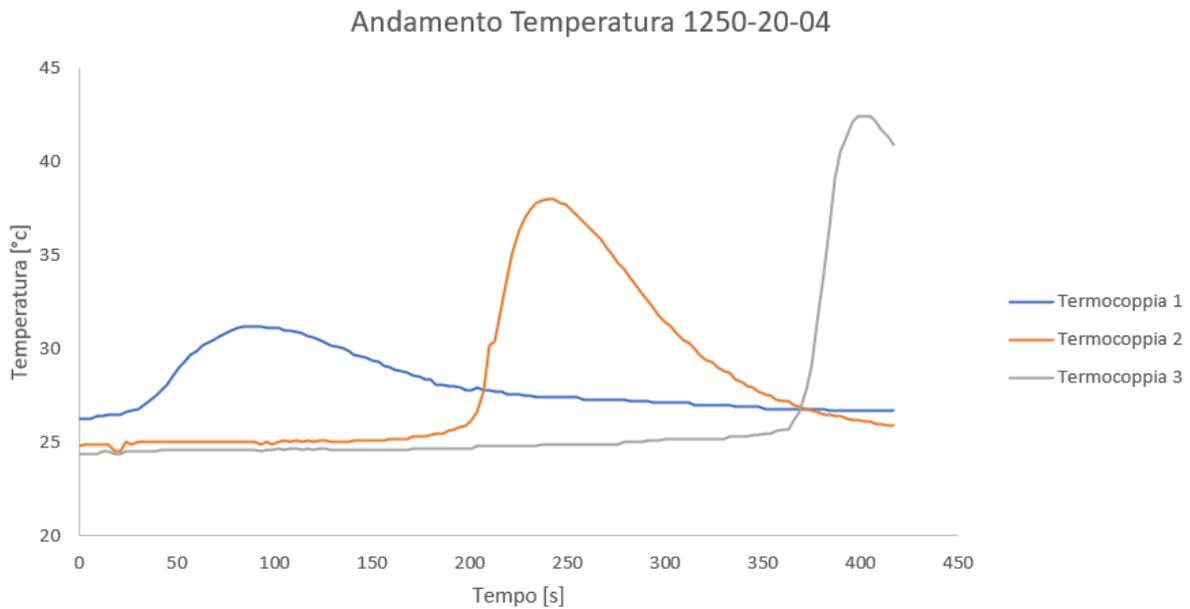


Figura 57 – Grafico andamento temperatura della saldatura con parametri 1250-20-04

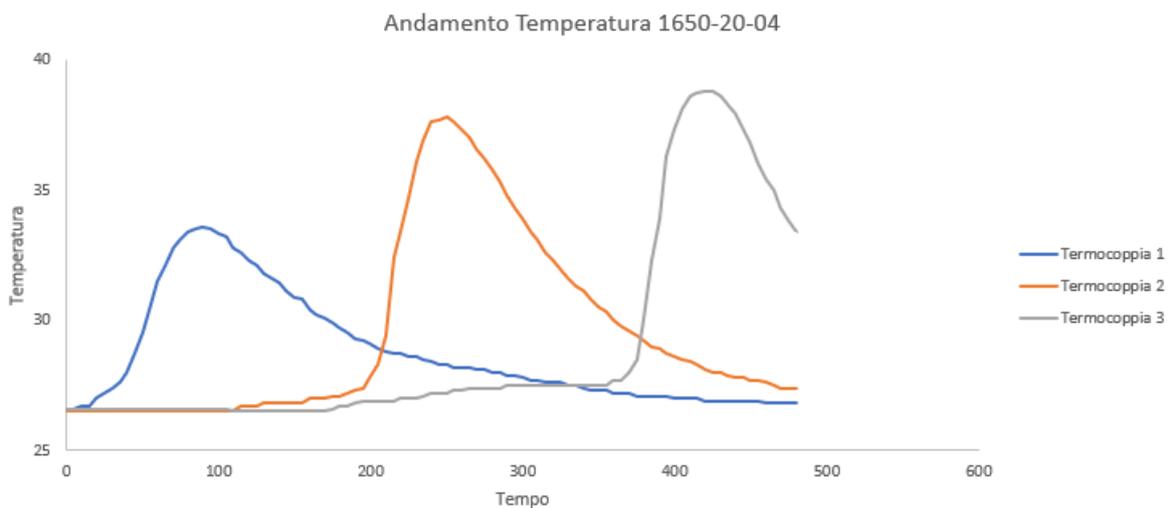


Figura 58 – Grafico andamento della temperatura della saldatura con parametri 1650-20-04

Conoscendo la velocità di avanzamento dell'utensile, che è di 20 mm/min in entrambi i casi, è possibile determinare la posizione in cui si raggiungono i massimi della temperatura: viene tutto schematizzato nella Tabella 8 e nella Tabella 9.

<b>Saldatura 1250-20-04</b>				
<b>Termocoppia</b>	<b>Temperatura max [°C]</b>	<b>Tempo della temperatura max [s]</b>	<b>Posizione della temperatura max [mm]</b>	<b>Posizione della termocoppia [mm]</b>
<b>1</b>	31.2	84	28	19
<b>2</b>	38	240	80	75
<b>3</b>	42.4	399	133	131

*Tabella 8 – Condizioni particolari della saldatura con parametri 1250-20-0.4*

<b>Saldatura 1650-20-04</b>				
<b>Termocoppia</b>	<b>Temperatura max [°C]</b>	<b>Tempo della temperatura max [s]</b>	<b>Posizione della temperatura max [mm]</b>	<b>Posizione della termocoppia [mm]</b>
<b>1</b>	34.1	90	30	19
<b>2</b>	38.3	250	83	75
<b>3</b>	39.3	420	140	131

*Tabella 9 – Condizioni particolari della saldatura con parametri 1650-20-0.4*

La prima cosa che è possibile osservare è il fatto che i valori nelle due tabelle sono molto simili e concordi tra loro, in quanto tra i due processi messi a confronto cambia solamente un parametro, la velocità di rotazione dell'utensile. Inoltre, come facilmente prevedibile, le temperature mediamente maggiori vengono raggiunte nel caso in cui la velocità di rotazione sia maggiore, anche se, come precedentemente accennato, le temperature effettivamente misurate sono molto inferiori rispetto a quelle reali.

Un altro aspetto interessante da approfondire è l'andamento delle temperature, già visibile ad occhio in Figura 57 e in Figura 58: i picchi raggiunti dalle termocoppie hanno un andamento crescente. Tale fenomeno può essere spiegato perché, essendo la piastra di supporto, quella su cui sono appoggiate le piastrine, in acciaio, il calore generato viene catturato quasi tutto da quest'ultima che si riscalda, inducendo, di conseguenza, la seconda e la terza termocoppia a registrare valori più alti rispetto alla temperatura ambiente, pur essendo l'utensile ancora lontano. Inoltre, anche il calore accumulato nell'utensile porta ad un maggiore aumento delle temperature alla fine del processo.

Un altro aspetto che risulta interessante da evidenziare riguarda la posizione dell'utensile quando la termocoppia ha raggiunto la massima temperatura registrata: in tutti i casi l'utensile aveva superato la termocoppia di qualche millimetro, rispettivamente di 9 mm, 5 mm, 2 mm, 11 mm, 8 mm e 9 mm. In questo caso la

spiegazione fornita è che questo fatto si deve ad un'inerzia termica, che fa sì che il rimescolamento del materiale che avviene sul giunto appena saldato provochi una temperatura maggiore rispetto al rimescolamento che avviene davanti all'utensile.

## 5. Conclusioni

Dai risultati a cui si è giunti grazie all'analisi dei dati ottenuti delle prove meccaniche svolte in laboratorio e dall'analisi delle immagini ottenute allo stereomicroscopio si è osservato che:

- i giunti saldati hanno proprietà meccaniche inferiori rispetto al materiale non saldato, sia se sottoposti a trazione che a flessione
- la saldatura double side permette di "chiudere" il giunto saldato ed eliminare problemi di mancanza di penetrazione della saldatura
- la saldatura double side migliora le prestazioni meccaniche a trazione dei giunti saldati, mentre peggiora le prestazioni meccaniche a flessione
- l'aumento della velocità di rotazione dell'utensile durante la saldatura, a parità degli altri parametri, migliora le proprietà meccaniche a trazione, mentre peggiora le proprietà meccaniche a flessione

In accordo con gli studi precedentemente svolti, invece si osserva che:

- l'incremento della velocità di rotazione causa un aumento della temperatura perché si genera maggior calore per attrito
- l'incremento dell'affondamento causa un aumento della temperatura poiché viene rimescolato un maggior volume di materiale e, di conseguenza, si genera maggior calore per attrito
- la velocità di avanzamento non ha particolari ripercussioni sulla temperatura raggiunta e sulle proprietà meccaniche

Per avere una visione più ampia e completa del processo di saldatura per attrito sulle piastrine di ABS, e in generale su materiali polimerici, e della sua fattibilità è necessario svolgere ulteriori studi investigando altri parametri, altre condizioni di processo, altri spessori di materiale. In particolare, sarebbe interessante studiare con più precisione le temperature raggiunte dal materiale durante il processo mediante l'utilizzo di un termometro laser. Oppure, sarebbe interessante studiare delle saldature a giunto sovrapposto, che permetteranno di ottenere proprietà diverse e di saldare anche oggetti più complessi di interessante uso industriale.

Infine, sarebbe interessante studiare anche altri tipi di saldature per attrito e le caratteristiche dei loro giunti saldati. Ad esempio, saldature per Friction Spot Stir Welding, che potrebbero aumentare di molto la velocità di saldatura, quindi la produttività del processo ed essere impiegate maggiormente anche a livello industriale, portando vantaggi sia economici che ecologici.

# Bibliografia

- [1] V. Treccani, Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani.
- [2] e. a. A. Nurhudan, «Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review,» *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 228-237, 2021.
- [3] *Norma ISO-ASTM F2792-10*.
- [4] Dartec, [Online]. Available: <https://www.dartec.com.sa/knowledge-center/>.
- [5] D. d. M. Polimi, «Le tecnologie additive,» [Online]. Available: <http://www.addmelab.polimi.it/>.
- [6] e. a. S. Yuan, «Additive manufacturing of polymeric composites from material processing,» *Composites Part B*, 2021.
- [7] E. Mariani, *Tesi di Laurea Magistrale*, Politecnico di Torino, 2018.
- [8] e. a. A. Bathia, «Additive manufacturing materials, methods and applications: A review,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [9] Nippon Gases, «Nippon Gases,» [Online]. Available: <https://www.invisibilemavero.it/additive-manufacturing/migliora-il-tuo-processo-metal-additive-manufacturing-con-le-tecnologie-nippon-gases/>.
- [10] All3DP, «World's First 3D Printed Pedestrian Bridge Completed in Madrid,» [Online]. Available: <https://all3dp.com/3d-printed-pedestrian-bridge/>.
- [11] e. a. J. M. Jafferson, «A review on polymeric materials in additive manufacturing,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 1349-1365, 2021.
- [12] e. a. T. D. Ngo, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,» *Composites Part B*, pp. 172-196, 2018.
- [13] A&C Plastics INC, «Applications Best Suited for ABS Plastic Sheet,» 2021. [Online]. Available: <https://www.acplasticsinc.com/informationcenter/r/using-abs-plastic-sheeting-compared-to-other-materials>.
- [14] e. a. M. El-Sayed, «Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review,» *Journal of Advanced Joining Processes*, 2021.
- [15] e. a. K. Singh, «Review on friction stir welding of magnesium alloys,» *Journal of Magnesium and Alloys*, pp. 399-416, 2018.
- [16] E. L. C. M. C. Gambaro, «Friction Stir Welding: definizione di condizioni standard di prova su impianti "on site" per il rilievo dell'efficienza di saldatura e dell'efficacia di processo per le leghe di alluminio,» Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti dell'Università di Genova, 2016.
- [17] e. a. V. P. Singh, «Mechanical and microstructural properties evolutions of various alloys welded through cooling assisted friction-stir welding: A review,» *Intermetallics*, 2021.
- [18] S. D. N. V. Califano, «La Tecnologia della Friction Stir Welding,» Università degli studi di Napoli "Federico II" - DPA, Napoli.
- [19] L. Adams, «Welding Productivity,» [Online]. Available: <https://weldingproductivity.com/article/welding-with-friction/>.
- [20] e. a. A. Forcelllese, «Mechanical properties and microstructure of joints in AZ31 thin sheets obtained by friction stir welding using "pin" and "pinless" tool configurations,» *Materials and design*, pp. 219-229, 2012.
- [21] e. a. N.A.A. Sathari, «INVESTIGATION OF SINGLE-PASS/DOUBLE-PASS TECHNIQUES ON,» *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND SCIENCES*, pp. 1053-1061, 2014.
- [22] e. a. S. Ji, «Vertical compensation friction stir welding assisted by external stationary shoulder,» *Materials and Design*, pp. 72-79, 2015.
- [23] e. a. R.S. Mishra, «Friction stir welding and processing,» *Material Science and Engineering: Reports*, pp. 1-78, 2005.
- [24] e. a. R. Nandan, «Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties,» *Progress in Material Science*, pp. 980-1023, 2008.
- [25] TWI, «The Welding Institute,» [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-materials-can-i-join-with-friction-stir-welding>.

- [26] e. a. N. Sadeghian, «Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets,» *Materials and Design*, pp. 145-153, 2015.
- [27] e. a. N. Mendes, «Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding,» *Materials and Design*, pp. 81-90, 2014.
- [28] e. a. S. Strand, «Effects of friction stir welding on polymer microstructure,» 2004.
- [29] e. a. P. N. Banjare, «An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 83-91, 2017.
- [30] Stratasys, «ABSPlus P430 - EN Data Sheet FDM Material,» 25 dicembre 2017. [Online]. Available: <https://support.stratasys.com/it/materials/fdm-materials/absplus-p430>.
- [31] Stratasys, «Spec Sheet - Fortus250mc EN,» 26 marzo 2015. [Online]. Available: <https://support.stratasys.com/it/products/fdm-platforms/fortus-250mc>.
- [32] D. Camerani, «Cos'è il CAM? Cosa significa lavorare con un software CAD/CAM?,» 2 maggio 2018. [Online]. Available: <https://making.oneteam.it/2018/05/02/cose-il-cam-cosa-significa-lavorare-con-un-software-cad-cam/>.
- [33] M. Palmieri, «Macchina CNC: le lavorazioni a controllo numerico,» 2021. [Online]. Available: <https://www.mauriziopalmieri.it/macchina-cnc-le-lavorazioni-a-controllo-numerico/>.
- [34] A. Forcellese, «Comportamento alla deformazione plastica dei materiali metallici,» Università Politecnica delle Marche, 2020.
- [35] G. Petrucci, «Lezioni di costruzioni di macchine,» Università degli studi di Palermo.

# Indice delle figure

Figura 1 – Esempio di Additive Manufacturing di un oggetto metallico [4]	8
Figura 2 – Schema di AM per estrusione a siringa o a stantuffo [2]	12
Figura 3 – Schema di AM per estrusione a filamento [2]	13
Figura 4 – Schema di AM per estrusione a vite [2]	14
Figura 5 – Schema di DIW a filamento continuo (a) e a getto di gocce (b) [6]	14
Figura 6 – Schema di AM tramite Selective Laser Sintering [6]	15
Figura 7 – Stampa 3D di un ingranaggio in materiale metallico [9]	16
Figura 8 – Trachea artificiale ottenuta con stampa 3D [8]	17
Figura 9 – Ponte Castilla-La Mancha, Madrid, interamente stampato in 3D [10]	18
Figura 10 – Piramide rappresentante i vari tipi di materiali polimerici utilizzati nell'AM [12]	19
Figura 11 – Esempio di piastrine di ABS [8]	21
Figura 12 – Rappresentazione schematica di un processo di FSW [14]	23
Figura 13 – Fasi del processo di FSW [16]	24
Figura 14 – Rappresentazione schematica della microstruttura di un giunto saldato tramite FSW [14]	25
Figura 15 – Schema di un utensile per FSW [16]	26
Figura 16 – Esempi di profili del pin [19]	27
Figura 17 – Schema rappresentante l'angolo di inclinazione dell'utensile [17]	29
Figura 18 – Due esempi di utensili con pin e pinless [20]	30
Figura 19 – Schematizzazione di (a) un giunto di testa e (b) un giunto sovrapposto [15]	32
Figura 20 – Macrostruttura della sezione di un giunto saldato [14]	33
Figura 21 – Esempio di kissing bond [14]	34
Figura 22 – Mancanza di penetrazione nel giunto saldato [14]	34
Figura 23 – Bava formatasi ai lati del cordone di saldatura [14]	35
Figura 24 – Scanalature sulla superficie del cordone di saldatura [14]	35
Figura 25 – Classificazione delle tecniche di FSW [14]	36
Figura 26 – Schema di un processo di UFSW [14]	37
Figura 27 – Fasi del processo di FSSW [14]	38
Figura 28 – Refill Friction Spot Stir Welding [14]	39
Figura 29 – Sticht Friction Spot Stir Welding [14]	39
Figura 30 – Swing Friction Spot Stir Welding [14]	40
Figura 31 – Rappresentazione schematica di un processo di VCFSW [14]	40
Figura 32 – Rappresentazione schematica dell'hot shoe [26]	45
Figura 33 – Stampante Fortus 250mc	47
Figura 34 – Macchina CNC utilizzata in laboratorio	48
Figura 35 – Operazione di FSW dei piastrini in ABS. Si possono osservare i serraggi dei piastrini e le termocoppie (fili verdi) usate per determinare la temperatura raggiunta in prossimità del cordone di saldatura	49
Figura 36 – Provini ricavati dalle piastre saldate	51
Figura 37 – Macchina universale MTS 810 configurata per la prova di trazione	52
Figura 38 – Curva nominale (a) e curva reale (b) della prova di trazione [34]	52
Figura 39 – Schema di una prova di flessione	54
Figura 40 – Macchina universale MTS 810 configurata per la prova di flessione	55
Figura 41 – Stereomicroscopio Leica EZ4 D	56
Figura 42 – Grafico di confronto delle prove di trazione	57
Figura 43 – Grafico di confronto delle prove di flessione	59
Figura 44 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-20-03 - prima passata	62
Figura 45 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-20-03 - seconda passata	62
Figura 46 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-40-04 - prima passata	62
Figura 47 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-40-04 - seconda passata	62
Figura 48 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1250-20-0.4	63
Figura 49 – Fotografia allo stereomicroscopio della saldatura con parametri 1650-20-0.4	64
Figura 50 – Sezione della saldatura 1650-20-04	64
Figura 51 – Sezione della saldatura 1650-20-04 D	64
Figura 52 – Sezioni di rottura dei provini generate dalla prova di trazione. Provini con parametri: a) 1250-20-04, b) 1250-20-04 D, c) 1650-20-04, d) 1650-20-04 D	65
Figura 53 – Sezione di rottura a flessione del provino 1250-20-04	66
Figura 54 – Sezione di rottura a flessione del provino 1250-20-04 D	66

Figura 55 – Schema rappresentante la posizione delle termocoppie all'interno delle piastre in ABS	67
Figura 56 – Sensori di temperatura collegati alla piastra durante la saldatura	68
Figura 57 – Grafico andamento temperatura della saldatura con parametri 1250-20-04	69
Figura 58 – Grafico andamento della temperatura della saldatura con parametri 1650-20-04	69

## Indice delle tabelle

Tabella 1 – Proprietà meccaniche a trazione dell'ABS Plus P430 [30]	46
Tabella 2 – Proprietà meccaniche a flessione dell'ABS Plus P430 [30]	46
Tabella 3 – Saldature svolte tramite FSW	50
Tabella 4 – Saldature su cui sono state svolte prove di trazione	53
Tabella 5 – Saldature su cui sono state svolte prove di piegatura	55
Tabella 6 – Proprietà meccaniche ottenute dalle prove di trazione	57
Tabella 7 – Proprietà meccaniche ottenute dalle prove di flessione	60
Tabella 8 – Condizioni particolari della saldatura con parametri 1250-20-0.4	70
Tabella 9 – Condizioni particolari della saldatura con parametri 1650-20-0.4	70