



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**PROCESSI DI FRICTION STIR WELDING DI
PIASTRE IN MATERIALE POLIMERICO
REALIZZATE MEDIANTE TECNICHE DI
ADDITIVE MANUFACTURING**

**FRICTION STIR WELDING PROCESSES OF
PLATES IN POLYMERIC MATERIAL MADE
USING ADDITIVE MANUFACTURING
TECHNIQUES**

Relatore:
Prof. Ing. Archimede Forcellese

Tesi di laurea di:
Matteo Spegne Schiavoni

Correlatore:
Prof.ssa Ing. Michela Simoncini

A.A 2020/2021

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1 – I polimeri.....	3
1.1 Generalità.....	3
1.1.1 Proprietà dei polimeri.....	4
1.1.2 Polimeri termoplastici, termoindurenti ed elastomeri.....	5
1.2 L’ABS.....	7
1.2.1 Proprietà meccaniche ABS.....	8
Capitolo 2 – La stampa 3D (Additive Manufacturing).....	10
2.1 Generalità.....	10
2.2 Tecnica FDM.....	11
2.2.1 Principio di funzionamento.....	11
2.3 Stampa 3D – Polimeri.....	13
2.4 Stampa 3D – ABS.....	15
Capitolo 3 – Friction Stir Welding.....	17
3.1 Generalità.....	17
3.2 Gli utensili.....	20
3.3 Friction Stir Welding applicato alle materie plastiche.....	24
3.4 Studio del FSW su ABS.....	25

Capitolo 4 – Materiali e procedura sperimentale.....	29
4.1 Materiale.....	29
4.2 Stampante 3D.....	29
4.3 Procedura di FSW.....	30
4.4 Provini.....	33
4.5 Prove di trazione.....	34
4.6 Prove di piegatura.....	36
4.7 Stereomicroscopio.....	39
Capitolo 5 – Risultati.....	40
5.1 Risultati prove di trazione con utensile pin.....	40
5.2 Analisi allo stereomicroscopio delle prove di piegatura.....	42
5.3 Saldatura double side.....	44
5.4 Analisi della temperatura.....	46
Capitolo 6 – Conclusioni.....	53
Bibliografia.....	54
Sitografia.....	55

Introduzione

La parola d'ordine per il progresso scientifico e tecnologico è innovazione. Introdurre nuovi modi di agire, di produrre, di vivere: in una parola, innovare. Nell'industria manifatturiera l'innovazione è quell'arma in più che consente di vincere la concorrenza data dall'alta competitività presente in questo ambito. Negli ultimi anni più che mai l'innovazione tecnologica va di pari passo con il rispetto dell'ambiente: in un mondo in cui l'inquinamento atmosferico minaccia l'integrità ambientale, vi è la necessità di salvaguardare il pianeta, limitando emissioni nocive nonché consumi di energia e risorse.

Nelle attività di fabbricazione e costruzione, un elemento comune a tutte le imprese che operano in questi ambiti, è quello della saldatura. Il processo convenzionale di saldatura, però, può causare effetti nocivi alla salute degli operatori così come all'ambiente. Proprio per evitare queste rilevanti problematiche è stato inventato un processo ecologico presso il *The Welding Institute* nel Regno Unito, noto come *Friction Stir Welding* (FSW). La FSW è un processo automatizzabile di giunzione allo stato solido, in cui i materiali vengono uniti senza raggiungere la fusione, senza sviluppare alcun tipo di gas nocivo, poiché non è presente alcuna fonte di calore dall'esterno, il che rende questa tecnologia vantaggiosa anche dal punto di vista energetico. Queste caratteristiche di compatibilità ambientale ed automatizzabilità rendono la FSW un efficientissimo mezzo sostitutivo della classica e convenzionale saldatura. Questo processo viene utilizzato soprattutto in campo aerospaziale (per la saldatura del serbatoio esterno dello Space Shuttle), aeronautico (saldatura su leghe di alluminio), automobilistico (Mercedes, Tesla), navale e ferroviario. Nello studio effettuato l'attenzione si è focalizzata su materiali realizzati tramite stampa 3D, un processo manifatturiero anch'esso ampiamente utilizzato ed ecosostenibile. *L'additive manufacturing*, ovvero il processo di stampa 3D, rappresenta il presente ed il futuro dell'industria manifatturiera, poiché permette di realizzare parti in varie forme e dimensioni direttamente sul luogo di lavoro; inoltre, si evitano quegli scarti di materiale che si avrebbero invece nei processi di tipo sottrattivo. L'efficienza di questo processo è facilmente intuibile grazie all'ampissima gamma di prodotti che vengono realizzati con questa modalità: basti pensare che da poco è stata addirittura realizzata una casa utilizzando la stampa 3D. Tra le varie tecniche che consentono la realizzazione di parti tramite la produzione additiva, è stata scelta quella che prende il nome di FDM (Fused Deposition

Modeling); essa permette la realizzazione di geometrie particolarmente complesse andando a limitare la produzione di sfridi e scarti di materiale. Oltretutto, nello studio è stato utilizzato un materiale, l'ABS, che può essere riciclato e rilavorato, rendendo questo processo a bassissimo impatto ambientale.

Per quanto la stampa 3D presenti innumerevoli vantaggi, una limitazione è rappresentata dal limitato volume di stampa, ossia lo spazio che si sviluppa lungo gli assi X, Y e Z all'interno del quale il dispositivo è in grado di produrre parti. Questa problematica può essere bypassata andando a dividere il modello da realizzare in più parti, da stampare separatamente, ed unirle in un secondo momento proprio tramite la tecnica di saldatura allo stato solido, così da evitare l'utilizzo di incastri o particolari collanti.

Lo scopo dell'elaborato è quello di valutare la fattibilità della FSW su piastre in ABS stampate tramite la tecnica FDM. È stato svolto uno studio preliminare riguardante la tecnica di giunzione allo stato solido e successivamente sono state svolte delle prove di saldatura variando i tre parametri fondamentali del processo: velocità di rotazione, velocità di avanzamento e affondamento dell'utensile all'interno del materiale. La parte centrale dello studio consiste nel confronto dei risultati ottenuti dalle prove di trazione e di piegatura secondo le normative prestabilite, osservando sia i dati numerici che le analisi al microscopio stereoscopico, cercando di evidenziare le differenze date dalla variazione dei vari parametri, al fine di individuare quelli che ottimizzano le qualità del giunto saldato.

1. I Polimeri

1.1 Generalità

Con il termine polimeri (dal greco *polymerés*, letteralmente "che ha molte parti") ci si riferisce a macromolecole di elevato peso molecolare, formate da catene di molecole di grandi dimensioni, derivanti dall'unione, mediante legami chimici forti (di tipo covalente), di un elevato numero di piccole unità dette meri o unità ripetitive. La reazione che porta alla formazione dei polimeri prende il nome di polimerizzazione.

È possibile incontrare molte tipologie di polimeri: esistono polimeri naturali organici, ad esempio cellulosa e caucciù, polimeri artificiali, ossia ottenuti dalla modifica di polimeri naturali, come l'acetato di cellulosa, e polimeri sintetici, ossia polimerizzati artificialmente, ad esempio PVC e PET (il materiale in cui sono realizzate le classiche bottiglie di plastica).

Sono note varie modalità per classificare le diverse tipologie di polimeri:

- in base alla natura delle unità ripetitive possono essere distinti tra omopolimeri, quando esse sono tutte uguali, o copolimeri, quando le unità che li costituiscono sono di due o più specie chimiche differenti;
- in base alla loro struttura, possono essere classificati in polimeri lineari, ramificati o reticolati (come mostrato in figura 1.1);
- in base al tipo di processo di polimerizzazione da cui sono prodotti si distinguono in "polimeri di addizione" e "polimeri di condensazione";

- in base all'omogeneità del peso molecolare si possono distinguere i polimeri omogenei da quelli eterogenei o polidispersi, i quali sono caratterizzati da alta variabilità del peso molecolare medio;
- in base alle loro proprietà dal punto di vista della deformazione, si differenziano in termoplastici, termoindurenti ed elastomeri.

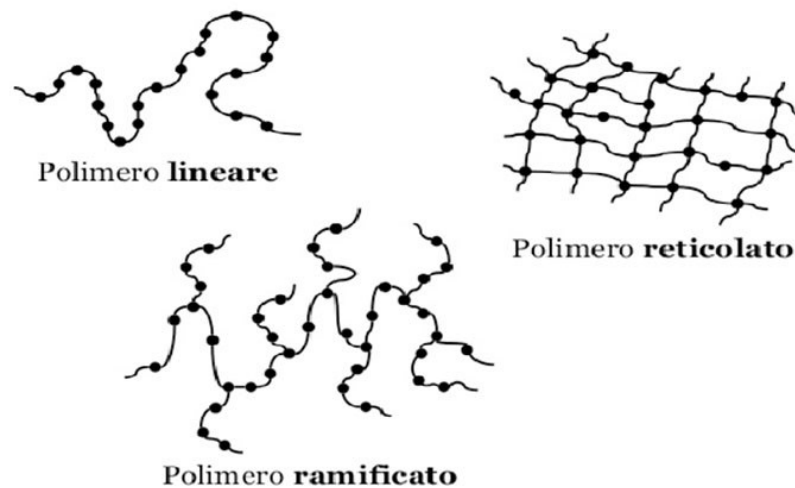


Figura 1.1- Classificazione dei polimeri in base alla struttura

1.1.1 Proprietà dei polimeri

Le proprietà dei polimeri variano a seconda della “scala considerata” e del fenomeno fisico cui fanno riferimento. In particolare, queste proprietà dipendono principalmente dai monomeri costituenti e dalla microstruttura del polimero stesso. Le caratteristiche strutturali di base sono

fondamentali per la determinazione delle proprietà fisiche di un polimero e quindi del suo comportamento macroscopico.

La microstruttura di un polimero fa riferimento alla disposizione nello spazio dei monomeri costituenti lungo la catena polimerica. La microstruttura influenza notevolmente le proprietà del polimero: resistenza meccanica, tenacità, durezza, duttilità, resistenza alla corrosione, comportamento a diverse temperature, resistenza a fatica,...

Ad esempio, la disposizione nello spazio delle unità ripetitive e la forma di un polimero, ossia la complessità e la ramificazione del polimero rispetto a una semplice catena lineare, possono influenzare la viscosità in soluzione, la viscosità di fusione, la solubilità in diversi solventi e la temperatura di transizione vetrosa. La lunghezza delle catene polimeriche (o in modo equivalente, il peso molecolare) ha un effetto sulle proprietà meccaniche del materiale: infatti maggiore la lunghezza delle catene, maggiore la viscosità, la resistenza meccanica, la durezza e la temperatura di transizione vetrosa. Questa influenza è dovuta all'aumento di interazioni tra le catene polimeriche, come forze di Van der Waals e nodi fisici.

1.1.2 Polimeri termoplastici, termoindurenti ed elastomeri

I polimeri termoplastici sono materiali che richiedono l'intervento del calore per essere plasmati e che, dopo il raffreddamento, mantengono la forma in cui sono stati modellati. Questo processo di riscaldamento e modellamento può essere ripetuto più volte senza avere grandi ripercussioni sulle proprietà, almeno per un certo numero contenuto di cicli, poiché se questa iterazione viene eseguita in maniera eccessiva il materiale tende a degradarsi. Possono essere dunque pensati come materiali riciclabili. Sono formati generalmente da catene principali molto lunghe,

formate a loro volta da atomi di carbonio legati tra loro con legami covalenti. Possono contenere anche atomi di azoto, ossigeno o zolfo (legati covalentemente agli atomi della catena principale). Le macromolecole sono legate le une alle altre con legami secondari deboli, ed è proprio per questo motivo che il calore riesce a sciogliere questi legami deboli e rendere il materiale viscoso e, di conseguenza, plasmabile.

I polimeri termoindurenti sono materiali che vengono modellati in forma permanente e reticolati (“induriti”) attraverso una reazione chimica. Non possono essere nuovamente rimodellati in un’altra forma con il calore, ma si degradano o decompongono dopo essere stati riscaldati ad una temperatura troppo elevata. Non possono pertanto essere riciclati. Il termine termoindurente implica che viene richiesto calore per dare la forma permanente alla materia plastica, tuttavia molti materiali termoindurenti induriscono anche attraverso reazioni chimiche a temperatura ambiente. La maggior parte dei materiali termoindurenti consiste di una rete di atomi di carbonio (e altri atomi) legati covalentemente (legame covalenti forti) tra di loro per formare un solido rigido; a volte anche azoto, ossigeno, zolfo o altri atomi sono legati covalentemente nel reticolo tridimensionale.

Gli elastomeri sono materiali polimerici le cui dimensioni possono variare enormemente sotto sforzo (fino al 1000%) e poi ritornare ai valori originali o quasi, quando lo sforzo viene rimosso; sono dunque in grado di subire elevate deformazioni di tipo elastico. Le catene polimeriche sono unite da legami intermolecolari relativamente deboli, che consentono ai polimeri di allungarsi in risposta a sollecitazioni macroscopiche. Gli elastomeri sono spesso soggetti ad un trattamento detto di vulcanizzazione (figura 1.2), un processo chimico tramite cui le macromolecole vengono unite da ponti di reticolazione di zolfo, ottenendo un miglioramento delle prerogative meccaniche del materiale.

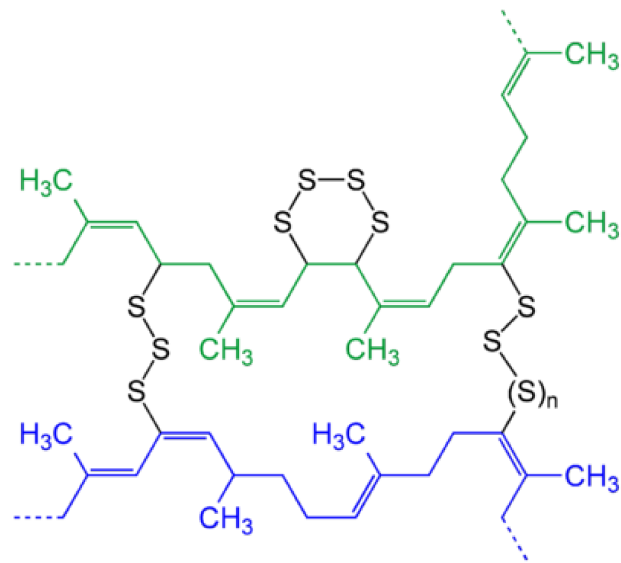


Figura 1.2 - Vulcanizzazione del poliisoprene

1.2 L'ABS

L'ABS (la cui formula chimica è $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$) è un copolimero termoplastico amorfo con densità di 1030-1050 kg/m³, ottenuto dalla polimerizzazione di acrilonitrile, butadiene, stirene. In figura 1.3 è illustrata la sua struttura molecolare. L'acronimo deriva proprio da questi tre monomeri utilizzati per produrlo. Viene chiamato terpolimero, ovvero copolimero a tre blocchi, perché è composto da 3 monomeri di natura differente: per il 45÷55% da stirene, per il 15÷30% da butadiene e per il 25÷35% da acrilonitrile. I blocchi di acrilonitrile forniscono rigidità, resistenza agli attacchi chimici, stabilità alle alte temperatura e durezza. I blocchi di butadiene, che è un elastomero, forniscono tenacità a qualsiasi temperatura. Il blocco di stirene fornisce resistenza meccanica e rigidità. Inoltre, la plastica ABS è un materiale biocompatibile e riciclabile, atossico e innoquo [6].

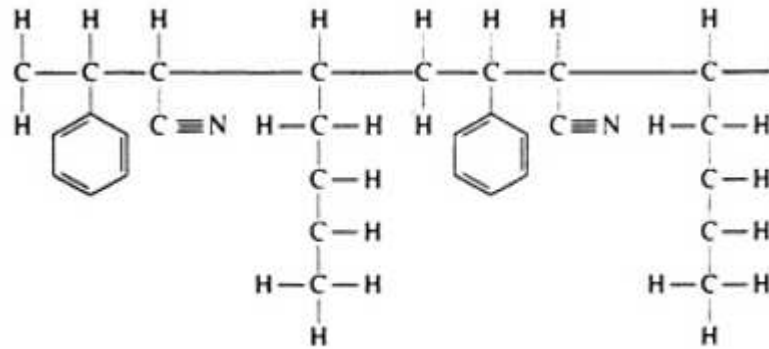


Figura 1.3 – Struttura molecolare dell’Acrilnitrile Butadiene Stirene

1.2.1 Proprietà meccaniche ABS

L'acrilnitrile-butadiene-stirene o l'ABS è un materiale termoplastico dotato di buona durezza, resistenza al calore e agli urti. La resistenza all'impatto della plastica ABS cresce con l'aumentare della percentuale del contenuto di butadiene, anche se calano la resistenza a trazione e la temperatura di deformazione termica.

La caratteristica più importante dell'ABS è la sua grande tenacità, anche a temperature proibitive (a -40 °C mantiene ancora la sua resistenza). Le proprietà termiche critiche per l'ABS sono distorsione termica, coefficiente di dilatazione termica lineare, resistenza termica, conducibilità termica e calore specifico.

Altre importanti proprietà da considerare sono:

- Elevata rigidezza
- Buone proprietà isolanti
- Buona saldabilità
- Buona resistenza all’abrasione e alla deformazione
- Elevata stabilità dimensionale (è meccanicamente stabile nel tempo)

Nella tabella 1.1 sono elencati alcuni importanti valori numerici relativi alle proprietà meccaniche dell'ABS.

Elongation at Break	10 - 50 %
Elongation at Yield	1.7 - 6 %
Flexibility (Flexural Modulus)	1.6 - 2.4 GPa
Hardness Shore D	100
Stiffness (Flexural Modulus)	1.6 - 2.4 GPa
Strength at Break (Tensile)	29.8 - 43 MPa
Strength at Yield (Tensile)	29.6 - 48 MPa
Toughness (Notched Izod Impact at Room Temperature)	200 - 215 J/m
Toughness at Low Temperature (Notched Izod Impact at Low Temperature)	20 - 160 J/m
Young Modulus	1.79 - 3.2 GPa

Tabella 1.1 – Tabella relativa alle proprietà meccaniche dell'ABS

2. La stampa 3D (Additive Manufacturing)

2.1 Generalità

La produzione additiva (AM – Additive Manufacturing), nota anche come stampa 3D, è una tecnica di produzione innovativa, che offre numerose opportunità per sviluppare nuovi materiali per nuove applicazioni. Una delle caratteristiche che rende la stampa 3D particolarmente interessante è la libertà geometrica, che la contraddistingue dalle altre lavorazioni di tipo sottrattivo, e consente di realizzare caratteristiche, forme e design completamente nuovi. Nella produzione additiva il materiale viene aggiunto dove è necessario, contrariamente alla rimozione del materiale da un blocco solido per raggiungere la forma finale. Questa aggiunta di materiale strato per strato lo rende un metodo di produzione altamente efficiente in termini di risorse, soprattutto per forme complesse e applicazioni personalizzate. Pertanto, l'uso di materie prime critiche è ridotto al minimo.

La stampa 3D prevede diverse tecnologie di produzione che costruiscono parti strato per strato. Le differenze tra le varie tecniche si basano sul modo in cui vengono realizzate le parti in plastica o metallo, e anche su altri fattori quali la selezione dei materiali, la finitura superficiale, la durata, la velocità e i costi di produzione.

Le tecnologie additive possono essere suddivise in tre macroaree, a seconda delle caratteristiche di consistenza della materia prima [4]:

- **POLVERI:** tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione delle polveri o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo
- **SOLIDI:** tecniche che prevedono l'incollaggio stratificato di fogli o l'estrusione di un materiale solido o semi solido
- **LIQUIDI:** tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto

Tra le numerose tecnologie di stampa additiva annoveriamo:

- Stereolitografia (SLA)
- Selective Laser Sintering (SLS)

- Fused Deposition Modeling (FDM)
- Fused Filament Fabrication (FFF)
- Digital Light Process (DLP)
- Multi Jet Fusion (MJF)
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Electron Beam Melting (EBM)

2.2 Tecnica FDM

Nella ricerca contemporanea, la modellazione a deposizione fusa (FDM) è l'approccio alla stampa 3D più ampiamente adottato. Questo modello offre una elevata flessibilità di forma, eliminando perciò la necessità di acquistare utensili con particolari caratteristiche morfologiche. Il processo FDM ha riscontrato notevole utilizzo in vari campi. In particolare, ne hanno beneficiato particolarmente il settore biomedico, realizzando progressi nell'ingegneria tissutale e delle protesi, quello della plastica, quello automobilistico e quello elettronico. Con lo sviluppo di nuovi materiali per filamenti, l'orizzonte di applicazione dell'FDM si sta ancora estendendo ai dispositivi di somministrazione di farmaci e alla produzione aerospaziale. Inoltre, la ricerca è focalizzata anche sull'utilizzo di nuovi processi e materiali per raggiungere l'obiettivo della sostenibilità ambientale, andando a ottimizzare il consumo di energia e l'efficienza nella gestione del tempo, due pilastri della produzione sostenibile.

2.2.1 Principio di funzionamento

Le stampanti FDM utilizzano due tipi di materiali: uno di modellazione, che costituirà l'oggetto finito, e uno di supporto, che funge da impalcatura per supportare l'oggetto durante la stampa. Prima di iniziare la stampa va effettuata l'importazione di un file di un modello nel software di preelaborazione, il quale divide il modello 3D in strati sottili. Per prima cosa una bobina di filamento termoplastico viene caricata nella stampante, e quando l'ugello raggiunge la temperatura desiderata, il filamento viene alimentato alla testa di estrusione e nell'ugello dove viene riscaldato a uno stato semiliquido. L'ugello e la base sono controllati da un computer che traduce le dimensioni di un oggetto in coordinate X, Y e Z e che permette lo spostamento di esse nelle tre direzioni dello spazio. Dopodiché il materiale fuso viene estruso in fili sottili e

viene depositato strato per strato in posizioni determinate, dove si raffredda e solidifica; talvolta la testa di estrusione può essere dotata di ventole di raffreddamento che ne accelerano la solidificazione. Quanto la realizzazione di uno strato è finita, la piattaforma di supporto si sposta verso il basso (oppure è la testa di estrusione a spostarsi verso l'alto a seconda della configurazione della macchina) e viene depositato un nuovo strato [7]. Questo processo viene ripetuto fino al completamento della parte. La figura 2.1 rappresenta lo schema FDM.

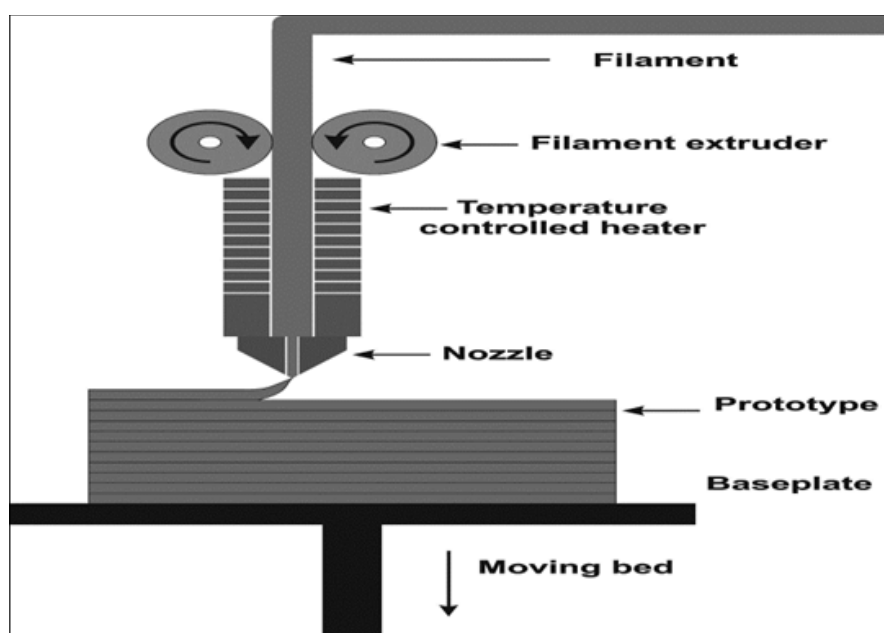


Figura 2.1 – Illustrazione del processo di stampa FDM

Il tempo di stampa dipende dalle dimensioni dell'oggetto da produrre: gli oggetti piccoli (delle dimensioni di qualche pollice cubo) e quelli alti e sottili vengono stampati rapidamente, mentre gli oggetti grandi e geometricamente complessi richiedono più tempo.

Nella stampa FDM è importante la regolazione di alcuni parametri di processo, come la temperatura dell'ugello e della piattaforma di supporto, la velocità di costruzione, l'altezza degli strati, la velocità della ventola di raffreddamento o la direzione di stampa. In riferimento all'altezza degli strati (che variano solitamente tra 50 e 400 micron) si osserva che un'altezza inferiore produce parti più lisce e realizza le geometrie curve in maniera più accurata, mentre

un'altezza maggiore consente la produzione di parti più velocemente e a costo inferiore, a discapito della precisione.

Dal momento che la tecnologia di stampa additiva FDM non è in grado di garantire una buona precisione dimensionale, possono essere previsti dei trattamenti di rifinitura “post-processing”, che permettono di migliorare la finitura superficiale: levigatura e lucidatura, saldatura a freddo, rivestimento epossidico, placcatura in metallo o levigatura a vapore.

Un'importante considerazione va fatta in merito ai parametri che influenzano le proprietà meccaniche delle parti stampate. Le principali sono la direzione di stampa, l'orientazione del filamento, lo spessore dello strato, il numero di ugelli utilizzati e le fibre di rinforzo (nel caso di materiali compositi) [9].

2.3 Stampa 3D - Polimeri

Un tema molto importante e delicato riguarda la scelta dei materiali da utilizzare nell'ambito dell'AM. Esiste infatti una vastissima gamma di materiali adatti a questo processo. Tra i metalli, quelli più utilizzati per la stampa 3D sono derivati di alluminio e cobalto, o acciaio inossidabile in polvere, lavorabile con processi di sinterizzazione o EBM. Ci sono poi materiali che sono di grande utilità per il settore biomedico, e che permettono di realizzare tessuti e protesi. Si stanno inoltre studiando metodi innovativi per realizzare la carta e per insediare la produzione additiva anche nell'industria alimentare. Oltre a quelli appena elencati, è noto che la classe di materiali più utilizzati per realizzare parti tramite additive manufacturing è quella dei polimeri. Nella tecnica FDM, nello specifico, vengono impiegati in larga scala PLA (acido polilattico), ABS, PET (polietilentereftalato), TPU (poliuretano termoplastico), Nylon e PC (policarbonato).

Nella scelta dei materiali sono molti i parametri da valutare per ottenere prestazioni ottimali:

- Facilità di stampa: quanto è agevole stampare un materiale. In particolare, si pone l'attenzione ad adesione del letto, velocità massima di stampa, frequenza di stampe non riuscite, precisione del flusso e altre ancora;
- Qualità visiva: come la parte finita risulta essere dal punto di vista visivo;

- Sollecitazione massima: massima sollecitazione che può subire il pezzo prima di giungere a rottura;
- Allungamento a rottura: lunghezza massima che raggiunge il pezzo prima di arrivare a rottura;
- Resistenza agli urti: energia necessaria per rompere la parte con un impatto istantaneo
- Adesione strato: quanto è buona l'adesione tra strati di materiale; legato all'isotropia (capacità del materiale di mantenere le stesse caratteristiche in tutte le direzioni). Infatti, migliore è l'adesione dello strato, più l'oggetto risulterà isotropo;
- Resistenza al calore: temperatura massima che l'oggetto può sostenere prima di deformarsi.

La tabella 2.1 mostra come si comportano i vari polimeri in relazione alle caratteristiche sopra elencate.

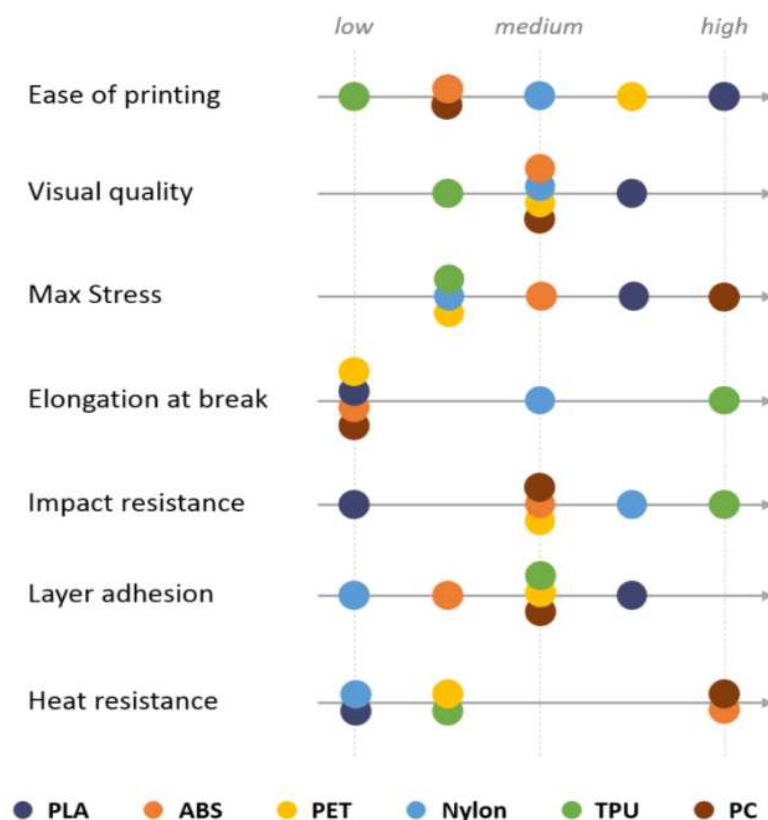


Tabella 2.1 – Tabella che illustra le caratteristiche dei polimeri in relazione a vari parametri

2.4 Stampa 3D - ABS

L'ABS è uno dei materiali più versatili oggi disponibili per la stampa 3D, in particolare tramite il processo Fused Deposition Modeling. L'ABS si presenta sotto forma di un lungo filamento avvolto attorno ad una bobina. È un ottimo materiale per la prototipazione e può essere facilmente lavorato, incollato, levigato e incollato.

È noto che nella realizzazione di parti tramite il processo di stampa 3D ci sono vari parametri che ne influenzano le proprietà meccaniche. Per questo motivo non si è in grado di conoscere in modo univoco proprietà importanti come la resistenza a trazione o il modulo di Young poiché esse variano col variare della direzione di stampa, dello spessore dello strato e degli altri parametri di stampa. È possibile, comunque, elencare alcune delle caratteristiche fondamentali dell'ABS. La figura 2.2 mostra le qualità dell'ABS in relazione alle caratteristiche elencate al paragrafo precedente.

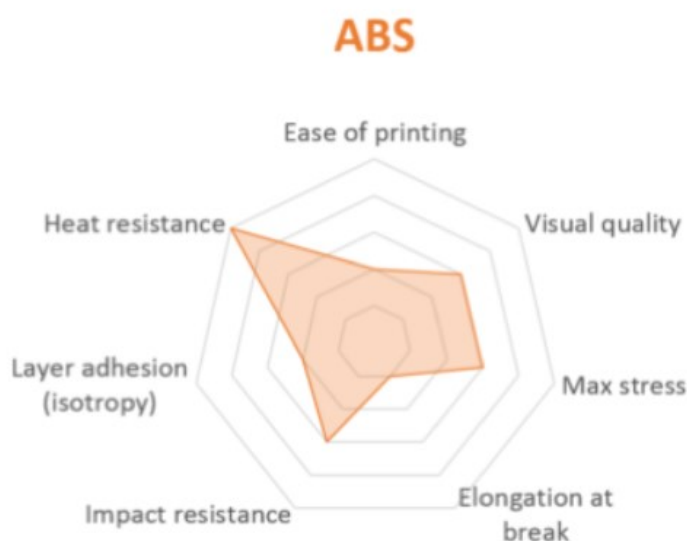


Figura 2.2 – Caratteristiche dell'ABS in merito all'AM

L'ABS è un materiale piuttosto economico ed essendo molto resistente consente il suo impiego per la realizzazione di prototipi che devono garantire durabilità nel tempo e rigidità. Rispetto ad altri polimeri è poco sgretolabile, può essere sottoposto a temperature elevate e possiede un coefficiente di attrito inferiore, motivo per cui risulta essere facilmente estrudibile.

Tra le numerose applicazioni dell'ABS è possibile annoverare i famosi mattoncini Lego (figura 2.3), caschi protettivi, cruscotti delle automobili, pannelli di comando di elettrodomestici, strumenti musicali come i flauti e scatole per componenti elettrici [8].



Figura 2.3 - I famosi mattoncini realizzati in ABS

3. Friction Stir Welding

3.1 Generalità

La Friction Stir Welding (FSW), introdotta da Wayne Thomas presso il TWI (The Welding Institute, nel Regno Unito) nel 1991, è una tecnica di giunzione allo stato solido che consente di unire saldamente due parti senza raggiungere la fusione del materiale di base. Thomas e i suoi colleghi K.I. Johnson e C.S. Wiesner hanno pubblicato un articolo intitolato “Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies” nel quale hanno spiegato il principio di base del FSW come uno strumento rotante a spalla non consumabile, con una sonda immersa nelle facce adiacenti degli oggetti da saldare. Il calore generato per attrito all’interfaccia utensile-pezzo in lavorazione fa sì che si generi una zona di materiale “ammorbidito”, e grazie al movimento traslatorio lungo la linea di saldatura dell’utensile viene prodotto un giunto continuo, all’interno del quale si ha un mescolamento meccanico delle particelle; la regione calda e ammorbidita viene quindi deformata plasticamente. È interessante notare che si possono identificare due lati di saldatura differenti: l’advancing side (AS) e il retreating side (RS). La differenza sta nel fatto che in un lato della saldatura la componente tangenziale della velocità di rotazione è concorde con la velocità di avanzamento (AS), mentre sul lato opposto le due risultano essere discordi (RS). Inoltre, nel retreating side si svilupperanno forze di attrito minori rispetto all’advancing side, con conseguenti temperature minori rispetto a quest’ultimo. Il processo è illustrato in figura 3.1.

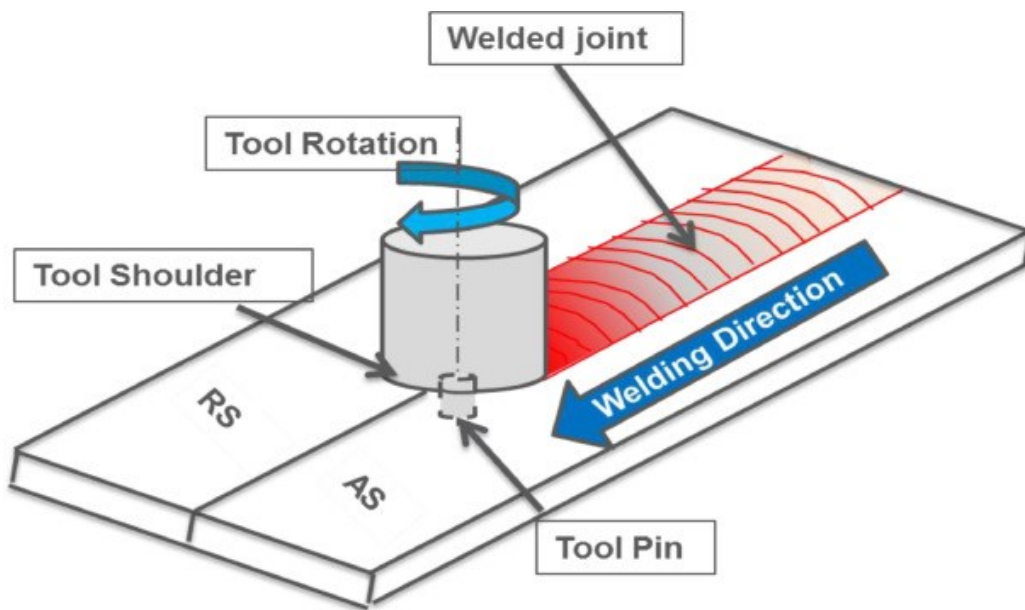


Figura 3.1 – Schema Friction Stir Welding

Questa tecnica può essere applicata per unire vari tipi di materiali simili, che possono essere materiali puri, leghe o compositi, ma anche materiali dissimili possono facilmente essere saldati. Nel corso degli anni la tecnica FSW è stata ampiamente utilizzata per realizzare parti per il settore aerospaziale, navale, ferroviario e automobilistico.

La FSW è considerata lo sviluppo più significativo nell'ambito delle giunzioni dell'ultimo decennio, ed è una tecnologia "verde" grazie alla sua efficienza energetica e versatilità. I vantaggi che offre la saldatura per attrito rispetto ai tradizionali metodi di saldatura sono: il minor consumo di energia, maggiore produttività, possibilità di saldare quasi tutti i materiali termoplastici, realizzare saldature senza apporto di calore dall'esterno, ed essendo un processo automatizzato, garantisce un'ottima qualità e una riduzione dei difetti di saldatura.

Le caratteristiche e le proprietà meccaniche del giunto saldato sono influenzate da vari fattori: la forma dell'utensile, la velocità di rotazione, la velocità lineare, la forza assiale, la profondità di immersione o affondamento e l'angolo di inclinazione dell'utensile. I due parametri più importanti sono la velocità di rotazione dell'utensile ω , definita in giri al minuto (rpm) e applicata in senso orario o antiorario, e la velocità di traslazione dell'utensile v definita in millimetri al minuto (mm/min). La rotazione dell'utensile è responsabile della generazione di

calore e della miscelazione di materiale attorno al perno rotante, mentre la traslazione di esso sposta il materiale riscaldato dalla parte anteriore alla parte posteriore del perno. Un incremento di ω genera una temperatura più elevata a causa del maggiore riscaldamento per attrito e provoca un mescolamento più consistente del materiale. L'angolo di inclinazione dell'utensile rispetto alla superficie del pezzo assicura lo spostamento efficiente di materiale dalla parte anteriore a quella posteriore del perno. L'affondamento, ovvero la profondità di inserimento del perno, è importante per realizzare saldature senza difetti; infatti, se l'affondamento non è sufficiente, allora la spalla non è in grado di spostare il materiale riscaldato dalla parte anteriore a quella posteriore del perno, generando saldature con un canale interno. Se, al contrario, l'affondamento è eccessivo, la spalla dell'utensile si immerge nel pezzo creando un eccesso di bava, con un assottigliamento locale delle piastre saldate. Il design dell'utensile, invece, influenza il flusso di materiale e la potenza consumata durante la saldatura.

P.L. Threadgill, A.J. Leonard, H.R. Shercliff e P.J. Withers, nel loro articolo scientifico intitolato "Friction stir welding of aluminium alloys" hanno analizzato l'evoluzione della microstruttura del giunto in alluminio saldato per attrito e lo hanno classificato in quattro zone, come mostrato in figura 3.2.



Figura 3.2 – Le diverse zone relative alla microstruttura

Questa classificazione dipende fondamentalmente dall'impatto del calore e della deformazione plastica sviluppata durante il processo. Le zone sono le seguenti:

- Materiale di base (BM, Base material): la zona nella quale né il riscaldamento né la deformazione plastica influiscono sulla caratterizzazione del materiale;

- Zona termicamente alterata (HAZ, Heat affected zone): questa zona è sottoposta ad un ciclo termico, senza alcuna deformazione plastica; ciò significa che il calore ivi generato non ha alcun impatto sull'evoluzione della microstruttura (almeno per temperatura inferiori a 250 ° C, oltre la quale si è riscontrato un ingrossamento dei grani nella struttura dell'alluminio)
- Zona termo-meccanicamente interessata (TMAZ, Thermo-mechanically affected zone): questa zona è soggetta a deformazione sia termica che plastica, le quali provocano un effetto sulla caratterizzazione della microstruttura, ma senza ricristallizzazione dei grani per insufficiente deformazione.
- Zona ricristallizzata dinamicamente (DXZ, Dynamically recrystallized zone): è la zona in cui sia l'alta deformazione plastica che l'alta temperatura causano la ricristallizzazione dinamica dei grani

3.2 Gli utensili

La geometria dell'utensile è molto importante poiché influenza le qualità del giunto saldato. Gli utensili utilizzati per il processo FSW sono costituiti da una spalla (shoulder), per riscaldare il materiale per attrito, e da un perno (pin) che, oltre a quella di riscaldare, ha anche la funzione di mescolare le particelle delle piastre da saldare. Questi due elementi sono essenziali per garantire la buona miscelazione del materiale e la saldatura priva di difetti. La figura 3.3 illustra un utensile per processi di Friction Stir Welding. Nella fase iniziale del processo, dove è prevista una prima immersione dell'utensile, il riscaldamento ottenuto deriva principalmente dall'attrito che si genera tra il perno e il pezzo in lavorazione; successivamente il calore viene generato proprio dalla deformazione plastica del materiale stesso. L'immersione dell'utensile procede fino a quando la superficie inferiore della spalla viene a contatto con la superficie del pezzo. L'attrito generato dal contatto tra la spalla e il pezzo rappresenta la maggior componente del calore prodotto. La spalla, inoltre, fornisce il confinamento per il volume di materiale riscaldato. Generalmente si utilizzano una spalla concava e pin cilindrici filettati [10].

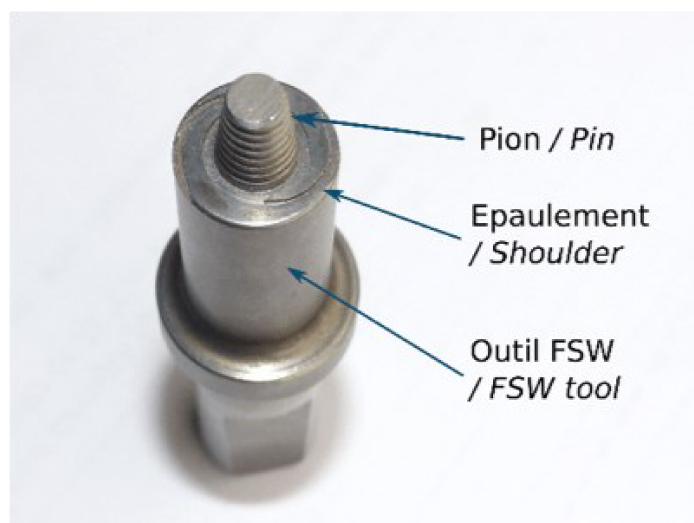


Figura 3.3 – Utensile per processi di FSW

Col passare degli anni e con il progresso negli studi riguardanti il processo di saldatura allo stato solido, si è riusciti a comprendere maggiormente il meccanismo di flusso del materiale e, di conseguenza, a progettare e realizzare utensili di forme differenti e caratteristiche in grado di modificare il flusso stesso, la miscelazione e di ridurre i carichi di processo. In particolare, uno studio è stato svolto da R.S. Mishra e Z.Y. Ma, che nel loro articolo “Friction Stir Welding and Processes” [2], hanno analizzato i risultati ottenuti utilizzando gli utensili Whorl e MX Triflute, sviluppati da TWI, illustrati rispettivamente in figura 3.4 e 3.5, verificando che i perni di entrambi gli utensili, di forma tronco conica, risultano spostare meno materiale rispetto ad un utensile cilindrico dello stesso diametro della radice. Gli studi hanno rivelato che l’utensile Whorl riduce il volume di materiale spostato di circa il 60%, mentre quello MX Triflute lo riduce di circa il 70%. Entrambi gli utensili, inoltre, garantiscono una riduzione della forza di saldatura, permettono un flusso di materiale più semplice e aumentano l’interfaccia tra perno e materiale, con conseguente aumento del calore generato. I ricercatori hanno evidenziato che il fattore principale che determina la superiorità dei perni tronco conici a spirale rispetto a quelli cilindrici convenzionali, è il rapporto tra il volume spazzato durante la rotazione del perno e il volume che occupa il perno stesso, definito anche come rapporto tra “volume dinamico” e “volume statico”. Solitamente questo rapporto, per perni con diametri di radice e lunghezza del perno simili, è di 1,1:1 per il perno cilindrico convenzionale, 1,8:1 per il Whorl e 2,6:1 per il perno MX Triflute.

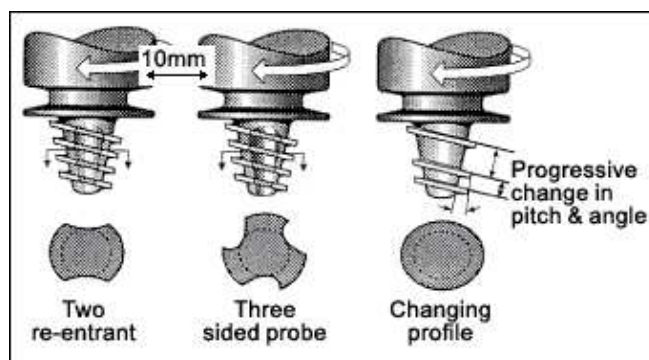


Figura 3.4 – Utensili di tipo Whorl



Figura 3.5 – Utensile MX Triflute

Per la saldatura a tornitura, il perno cilindrico convenzionale filettato ha portato ad un eccessivo assottigliamento della lamiera superiore, portando ad una significativa riduzione delle proprietà di piegatura. È risultato necessario, quindi, effettuare degli studi che portassero all'utilizzo di un utensile che presentasse una geometria tale da ottimizzare le qualità del giunto saldato in questo modo. Recentemente sono state sviluppate due nuove geometrie di perni: Flared-Triflute (figura 3.6) e A-skew (figura 3.7), che presentano delle caratteristiche di progettazione tali da: aumentare il rapporto tra il volume spazzato e il volume statico del perno, migliorando il percorso del flusso intorno e sotto il perno, allargare la regione di saldatura, fornire una migliore azione di miscelazione per la frammentazione dell'ossido e la dispersione all'interfaccia di

saldatura e fornire un'azione di forgiatura orbitale alla radice della saldatura migliorando la qualità della saldatura in questa regione. Rispetto al perno filettato convenzionale, quindi, l'utilizzo dei perni Flared-Trifute e A-skew ha comportato un miglioramento di oltre il 100% della velocità di saldatura, una riduzione del 20% circa della forza assiale, un importante ampliamento della regione di saldatura ed una riduzione dell'assottigliamento della piastra superiore. Perni di questo tipo sono sicuramente adatti per saldature a giro, a T e simili, ovvero saldature in cui l'interfaccia di giunzione risulta essere verticale rispetto all'asse della macchina.

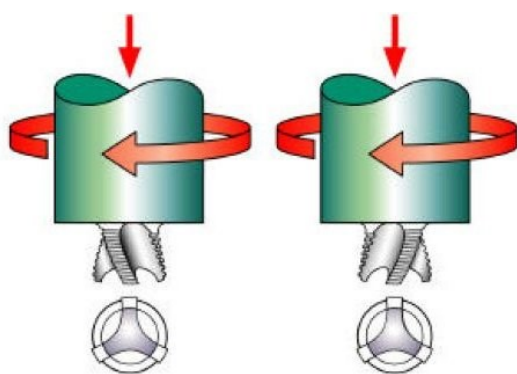


Figura 3.6 – Utensili Flared-Trifute



Figura 3.7 – Utensile A-skew

3.3 Friction stir welding applicato alle materie plastiche

Le materie plastiche possiedono numerosi vantaggi in termini di progettazione e formatura rispetto ai metalli. Tra i più apprezzati vantano un'ottima resistenza agli agenti chimici e agli ambienti umidi. Tuttavia, esistono anche alcuni problemi per l'utilizzo della plastica, relativi in particolare alle restrizioni in termini di resistenza e stabilità alle alte temperature. Per superare questo problema è opportuno preferire la realizzazione di più parti e, in seguito, saldarle permanentemente, piuttosto che usare metodi di giunzione temporanea. Si cerca dunque di utilizzare una tecnica di saldatura a basso consumo energetico, compatibilità ambientale, economicità, facilità di formazione, alta velocità di formazione e che possa garantire una buona resistenza meccanica e stabilità. Queste caratteristiche possono essere riunite proprio nel processo del Friction stir welding.

Ovviamente, avendo le materie plastiche e i metalli caratteristiche diverse, è opportuno applicare alcune modifiche alla tradizionale procedura che viene utilizzata per la giunzione dei metalli. Più precisamente, le connessioni intermolecolari nei materiali plastici sono più deboli rispetto a quelle dei metalli, il che comporta una dissipazione termica molto bassa e punti di fusione a temperature inferiori.

Rispetto allo studio del processo di Friction Stir Welding per i metalli, esistono pochi studi che affrontano l'analisi del FSW termoplastico. In un articolo intitolato "An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheet", Arvin Bagheri ha realizzato uno studio su lastre di ABS, utilizzando un particolare strumento rotante con una "scarpa calda", opportunamente sviluppata per migliorare la miscelazione a livello particellare, riportando una ottimizzazione della resistenza meccanica del giunto saldato che ha raggiunto l'89% rispetto la materiale di base. Anche il ricercatore italiano Agostino Scialpi ha svolto degli studi sul Friction stir welding, andando ad introdurre un particolare utensile per il FWS termoplastico.

È molto importante osservare che nel processo di saldatura per attrito ci sono alcuni parametri che possono condizionare le proprietà meccaniche del giunto saldato: i più importanti sono la velocità di rotazione dell'utensile, la velocità lineare dell'utensile e l'angolo di inclinazione.

3.4 Studio del FSW su ABS

Uno studio del processo di Friction Stir Welding è stato svolto dai ricercatori Nasser Sadeghian e Mohammad Kazem Besharati Givi, che hanno riportato i loro esperimenti nell'articolo "Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets" [3], nel quale hanno analizzato le caratteristiche di piastre in ABS saldate, di spessore 8 mm tagliate con dimensioni di 150/100 mm. Nella tabella 3.1 sono riportate le proprietà tipiche del copolimero in questione.

Property	Unit	Value
Elastic modulus	MPa	1108–1339 ^a
Tensile strength	MPa	39.35–42.87 ^a
Ultimate elongation	%	2.92–3.14 ^a
Notched Izod impact strength at 23 °C	J/m	30–450
Coefficient of friction (with steel)	ASTM D1894	0.21–0.28
Coefficient of friction (with aluminum)	ASTM D1894	0.40
Specific gravity	–	1.03–1.09
Moisture absorption at 23 °C and R.H. 50%	%	0.21–0.35
Rockwell hardness	R	102–124

^a Experimentally assessed in this research.

Tabella 3.1 – Tabella che mostra alcune caratteristiche del polimero utilizzato nello studio

Nell'esperimento vengono utilizzate due tipologie di utensili: (a) spalla cilindrica con perno cilindrico e (b) spalla cilindrica con perno conico, mostrati rispettivamente nelle figure 3.8 e 3.9.



Figura 3.8 – Utensili con perno cilindrico



Figura 3.9 – Utensili con perno conico

Gli strumenti sono realizzati in acciaio per utensili e la superficie inferiore è lavorata in modo tale da aumentare l'efficienza della saldatura, intrappolando il calore generato dall'attrito in uno spazio ristretto per trasformare il materiale dallo stato solido a materia fusa. Viene anche utilizzata una lama in acciaio inossidabile definita “statically hot”, poiché non possiede movimento rotatorio, e consente di ottenere un cordone di saldatura piatto ed esente da difetti. Nella tabella 3.2 vengono indicati i parametri di lavorazione, tra cui i più importanti sono velocità di rotazione (n) e lineare (V), rapporto dei diametri (D/d) e angolo di inclinazione dell'utensile (α).

Parameters	Symbol/unit	Levels	Coded parameter value		
			-1	0	1
Rotational speed	n (rpm)	3	900	1400	1800
Linear speed	V (mm/min)	3	6	16	25
Tilt angle	α (°)	3	0	1	2
Shoulder diameter	D (mm)	3	10	15	20
Pin diameter	d (mm)	3	5	6	8
Diameters ratio	D/d (mm/mm)	3	2	2.5	$\frac{20}{8}$
Pin profile	Block	2	Cylindrical	-	Conical

Tabella 3.2 – Tabella che indica i parametri di lavorazione utilizzati

Per la prova di trazione vengono realizzati campioni con il metodo ASTM: D638 e la velocità di deformazione della macchina viene impostata a 15 mm/minuto. Nella tabella 3.3 vengono riepilogati i risultati della prova di trazione basati sul processo di saldatura proposto.

Run	Block	D/d (mm/mm)	n (rpm)	V (mm/min)	Alpha (°)	Max. tensile strength	
						True stress (MPa)	Relative strength (%)
-	Parent ABS	-	-	-	-	41.80	100
1	Cylindrical	2	1400	16	1	26.71	63.9
2	Cylindrical	20/6	1400	16	1	41.42	99.1
3	Cylindrical	2.5	1800	16	1	34.45	82.4
4	Cylindrical	2.5	1400	16	2	34.13	81.7
5	Cylindrical	2.5	1400	16	1	27.18	65
6	Cylindrical	2.5	1400	16	1	25.10	60
7	Cylindrical	2.5	1400	25	1	37.36	89.4
8	Cylindrical	2.5	900	16	1	23.93	57.2
9	Cylindrical	2.5	1400	6	1	26.91	64.4
10	Cylindrical	2.5	1400	16	0	27.76	66.4
11	Conical	20/6	900	25	0	5.79	13.9
12	Conical	2.5	1400	16	1	20.20	48.3
13	Conical	2	1800	25	0	-	-
14	Conical	20/6	1800	25	2	33.75	80.7
15	Conical	2.5	1400	16	1	27.03	64.7
16	Conical	2	1800	25	2	24.93	59.6
17	Conical	20/6	900	6	0	6.82	16.3
18	Conical	2	900	6	0	37.14	88.9
19	Conical	20/6	900	6	2	34.14	81.7
20	Conical	20/6	1800	25	0	33.04	79
21	Conical	2	900	25	2	-	-
22	Conical	2	1800	6	0	39.30	94
23	Conical	2	1800	6	2	32.56	77.9
24	Conical	2	900	25	0	16.65	39.8
25	Conical	2.5	1400	16	1	27.01	64.6
26	Conical	20/6	1800	6	0	27.77	66.4
27	Conical	2.5	1400	16	1	23.84	57
28	Conical	2	900	6	2	34.38	82.2
29	Conical	20/6	1800	6	2	33.91	81.1
30	Conical	20/6	900	25	2	41.95	100.4

Tabella 3.3 – Tabella che mostra i risultati ottenuti dalle prove di trazione

Vengono dunque elencate dieci saldature realizzate con utensili cilindrici e venti saldature con quelli conici. Vengono indicate la resistenza a trazione in valore assoluto e anche come rapporto percentuale rispetto alla resistenza dell'ABS di partenza.

L'articolo propone uno studio relativo ai parametri di elaborazione e dei fattori geometrici, al fine di migliorare la resistenza del giunto saldato. I parametri di elaborazione includono velocità di rotazione e lineare, mentre i fattori geometrici includono il rapporto tra i diametri e l'angolo di inclinazione. L'obiettivo dell'indagine è quello di massimizzare la resistenza a trazione e migliorare il comportamento meccanico del giunto saldato. L'efficienza della saldatura è

definita come il rapporto della resistenza allo snervamento dei fogli di ABS saldati rispetto all'ABS base.

I risultati hanno evidenziato che le saldature con bassa velocità di rotazione e alta velocità lineare vedono una caduta della resistenza del giunto saldato. La scarsa generazione di calore di attrito genera uno stato pastoso e la formazione di vuoti nella zona di saldatura. È necessario dunque generare una quantità sufficiente di calore, tale da superare l'energia di legame delle catene termoplastiche, così da fluidificare la materia fusa. La quantità di calore aumenta per elevate velocità di rotazione e con superfici ad elevato coefficiente di attrito. Inoltre, una condizione di rapporto tra i diametri D/d elevato consente di ottenere un riscaldamento maggiore, e di conseguenza un'ottimizzazione delle caratteristiche del giunto saldato. Allo stesso modo, aumentare il valore dell'angolo di inclinazione causa un incremento nella generazione del calore, anche se può causare delle instabilità dovute all'elevata fluidità della materia fusa e sua conseguente dispersione, e possibile rigonfiamento dello stampo.

In conclusione, è stato osservato che, con opportuni parametri di elaborazione e geometrici, il processo di FSW consente di saldare piastre in ABS garantendo una efficienza, in termini di resistenza, elevata. Infatti, dalla tabella 5, osserviamo che si sono ottenuti giunti saldati con un'efficienza di circa il 101% e del 99%, rispettivamente per strumenti a forma conica e cilindrica.

4. Procedura sperimentale

4.1 Materiale

Il materiale utilizzato nelle prove è l'ABS plus P430 stampato con la stampante 3D modello *Stratasys*. ABS plus *Stratasys* è un materiale termoplastico tra i primi ad essere utilizzati dai sistemi di prototipazione rapida *Stratasys* con tecnologia FDM. ABS plus è forte e performante e, tra le sue caratteristiche, troviamo: resistenza, capacità di sopportare gli urti e stabilità nel tempo. La tabella 4.1 mostra le caratteristiche meccaniche del materiale in questione [11].

MECHANICAL PROPERTIES ¹	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 4.1 – Proprietà meccaniche ABS plus P430

4.2 Stampante 3D

Per prima cosa sono state realizzate le piastre in ABS, tramite la stampa 3D, in particolare con la tecnica FDM (Fused Deposition Modeling). La stampante utilizzata è la Fortus 250 mc di *Stratasys* (in figura 4.1), un modello di medie dimensioni, in grado di realizzare parti complesse in modo efficiente, anche in diversi colori. Per operare, la stampante ha bisogno di un software di tipo CAM in ingresso, che riesce a tradurre la geometria della parte da realizzare in movimenti lungo le tre direzioni dello spazio, che saranno poi effettuati da parte dell'ugello e della piattaforma di supporto. Il software CAM, prima di questa operazione, svolge quello che è definito "slicing", che consiste nell'analizzare il progetto Cad e tradurre il modello tridimensionale in una serie di layer (strati) che saranno realizzati uno sopra l'altro dall'estrusore.



Figura 4.1 – Stampante 3D Fortus 250 mc di Stratasys

4.3 Processo di FSW

La realizzazione del processo di Friction Stir Welding è stata possibile grazie alla macchina CNC a controllo numerico, mostrata in figura 4.2. Per effettuare la lavorazione, la macchina utilizza il G-code, che le permette di gestire il posizionamento, e di conseguenza 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 e z di inizio e fine lavorazione, così da poter svolgere un'interpolazione lineare e costruire il giunto di saldatura che risulterà essere lineare.



Figura 4.2 – Macchina CNC a controllo numerico

Il processo di saldatura ha previsto l'utilizzo prima di un utensile pin e successivamente di un utensile pin-less, ovvero senza pin; il che significa che è costituito solamente da un cilindro (shoulder) di diametro pari a 15 mm che ruota, trasla e penetra nel materiale da saldare che è fissato su un sostegno inclinato di un angolo pari a 2° grazie a un apposito sistema di bloccaggio. La scelta di non utilizzare il pin per le prove successive alla prima deriva dal fatto che lo spessore della lamina è ridotto, e per la realizzazione del processo è sufficiente il calore generato dalla pressione che l'utensile, traslando e ruotando, esercita sulla superficie superiore delle piastre. Se lo spessore fosse stato maggiore, l'utilizzo di un utensile senza pin avrebbe comportato degli svantaggi, poiché, se fosse andato troppo poco in profondità, l'effetto del calore non avrebbe interessato tutto lo spessore, mentre, in caso contrario, se fosse entrato troppo in profondità si sarebbe ottenuto un avvallamento. Il mancato utilizzo del pin consente, inoltre, di limitare lo scarto di materiale, di contenere e limitare i problemi relativi all'usura e di ottenere delle superfici con finitura superficiale e caratteristiche di rugosità migliori, nonché di rilevare dei miglioramenti anche dal punto di vista estetico.

Il primo processo di FSW è stato realizzato su piastre di ABS di colore bianco, con un utensile pin di diametro 15 mm e con i seguenti parametri:

- velocità di rotazione ω : 1250 rpm;
- velocità di avanzamento v : 20 mm/min;
- affondamento: 0,6 mm

Le prove sono state svolte su due coppie di piastre diverse, per tener conto anche della ripetibilità del risultato. Inoltre, sarà interessante notare la differenza tra le caratteristiche dei provini di tipo B e C, che si trovano, rispettivamente, centralmente e in prossimità del bordo, a causa dello smaltimento del calore che avverrà in maniera diversa.

Un secondo processo sperimentale è stato quello della saldatura “double side”, che consiste nel realizzare da un lato il normale processo di FSW con l’affondamento desiderato, e successivamente realizzare lo stesso processo sul lato opposto, con un affondamento minore, al fine di “chiudere” la saldatura. Infatti, dalle saldature precedenti, si è osservato che, per determinati parametri di processo, l’effetto del calore non riusciva a raggiungere tutto lo spessore delle piastre; è quindi una sperimentazione importante ed interessante per poter verificare se le proprietà meccaniche del giunto vanno ad incrementarsi in seguito alla doppia saldatura. Per questo tipo di saldatura è stato utilizzato un utensile pin-less, poiché è sufficiente il calore generato dalla pressione del solo shoulder. La figura 4.3 mostra le piastre saldate in tale maniera.



Figura 4.3 – Piastre saldate double side, con affondamento di 0,4 mm da un lato e 0,2 mm dal lato “di chiusura”

Per questo tipo di saldatura i parametri utilizzati sono:

- velocità di rotazione ω : 1250 rpm;
- velocità di avanzamento v : 20 mm/min;
- affondamento: 0,4 mm e 0,2 mm (rispettivamente sulle facce superiori e inferiori)

Un altro tipo di sperimentazione è stato svolto su piastre dello stesso materiale (ABS) stampate in colori diversi, blu e bianco, con utensile pin-less. L'obiettivo di questa prova è quello di comprendere al meglio come le particelle delle due lamine vadano a mescolarsi tra loro, ovvero se è più consistente lo spostamento di molecole dall'avancing side verso il giunto o dal retreating side verso il giunto. È interessante notare che, realizzando la saldatura, il giunto saldato si è mostrato di un colore azzurro chiaro, a dimostrare che realmente le particelle vanno a mescolarsi, dando vita a un colore intermedio tra il blu e il bianco. Anche in questo caso è stata effettuata la saldatura double side, mantenendo invariato l'affondamento tra faccia superiore e inferiore, con i parametri illustrati nella tabella 4.2:

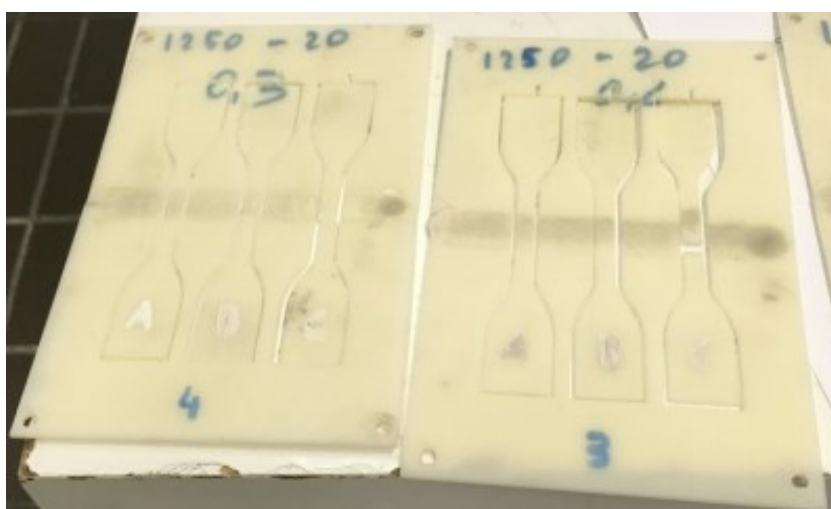
Condizioni	Velocità di rotazione ω [rpm]	Velocità di avanzamento v [mm/min]	Affondamento [mm]
1	1250	20	0,4
2	1650	20	0,4
3	1650	20	0,3
4	1650	40	0,4

Tabella 4.2 – Parametri utilizzati per le saldature double side (in questo caso l'affondamento è lo stesso su entrambe le facce)

4.4 Provini

I provini vengono ricavati successivamente alla saldatura grazie ad una macchina che esegue tagli a getto d'acqua. Per ogni coppia di piastre saldate si ottengono tre tipologie di provini, che vengono denominati A, B e C, mostrati in figura 4.4, che differiscono uno dall'altro per

posizione e, di conseguenza, anche struttura, poiché B è il provino ricavato nella zona centrale della piastra, mentre A e C sono quelli più esterni. Inoltre, avendo più provini, si può esaminare lo studio sia con prove di trazione che con prove di piegatura. I provini presentano una sezione rettangolare, semplice nel caso della prova di piegatura, mentre per la prova di trazione essi prevedono anche due estremità utili per effettuare il serraggio sulla macchina. Questa tipologia di provini viene definita “a doppio T” o “a osso di cane”.



*Figura 4.4 – Provini ricavati dal taglio a getto d’acqua ancora situati nelle piastre saldate.
In ogni piastra si definiscono i provini A, B e C, rispettivamente da sinistra a destra*

4.5 Prove di trazione

La prova di trazione è una prova di caratterizzazione di materiali che consiste nel sottoporre un provino standardizzato, con dimensioni definite da norme UNI, a un carico monoassiale che parte da modulo nullo fino a raggiungere un valore tale da rompere il provino. Con la prova di trazione si può ricavare la curva σ - ϵ , che mette in relazione tensione e deformazione. Nella curva si distinguono una regione ad andamento elastico ed una ad andamento plastico; il punto massimo della curva definisce la strizione del materiale, ovvero il momento in cui si verifica una deformazione localizzata, dopo la quale i dati ottenuti dalla prova non sono più attendibili. Dalla prova di trazione si possono ottenere:

- Resistenza allo snervamento: la tensione alla quale inizia la deformazione plastica definita come la deformazione corrispondente ad una deformazione dello 0,02%;
- 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 è stata utilizzata una macchina di prova universale MTS 810, mostrata in figura 4.5. Per prima cosa il provino, in posizione verticale, va fissato alle estremità sui due afferraggi della macchina e, successivamente, inizia la vera e propria trazione che avrà fine al momento della frattura del materiale. Per l'elaborazione dei dati, un computer acquisisce le informazioni relative alla prova grazie ad una scheda di acquisizione e ad un software, mettendo in relazione la forza applicata dalla macchina con lo spostamento da essa effettuato. I dati acquisiti vengono inseriti automaticamente in un file Excel, e vengono elaborati per realizzare i grafici tensione-deformazione, utili a valutare le caratteristiche del materiale.



Figura 4.5 – Macchina MTS 810 utilizzata per le prove di trazione

Per effettuare il passaggio dal grafico forza-spostamento al grafico tensione-deformazione è necessario utilizzare le relazioni indicate dalla normativa presa a riferimento per l'esecuzione delle prove, ovvero la ISO 527-1 (o ASTM D638). Le relazioni sono:

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \qquad \sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon)$$

nelle quali

- ε_t = deformazione a trazione
- σ_t = tensione a trazione

Inoltre, dato che $\sigma = \frac{F}{A_0}$, per poterle applicare è necessario conoscere i valori della lunghezza iniziale del provino L_0 , la sua lunghezza finale L , la sua sezione iniziale A_0 e la forza F applicata su di esso.

Le prove di trazione svolte su materiali saldati tramite FSW hanno l'obiettivo di analizzare come la variazione dei diversi parametri (velocità di rotazione e lineare, affondamento e utilizzo del pin o meno) contribuisca al cambiamento della resistenza e delle proprietà meccaniche del provino.

4.6 Prove di piegatura

La prova di piegatura viene effettuata per valutare l'attitudine del materiale a lasciarsi deformare a flessione. 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 (figura 4.6), che origina deformazioni permanenti. La prova può essere eseguita fino a che sia raggiunto un determinato valore dell'angolo α , oppure fino a che si manifestino le prime screpolature in corrispondenza della superficie esterna del materiale piegato.

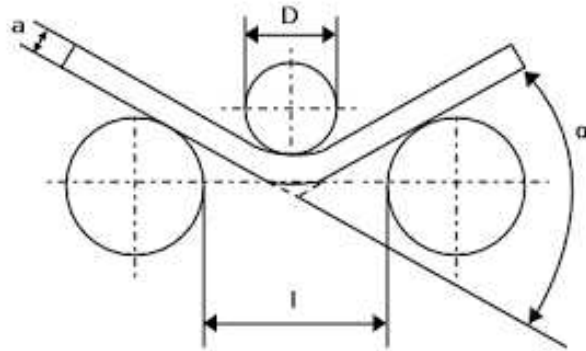


Figura 4.6 – Schema della prova di piegatura

La prova di piegatura è stata eseguita seguendo la normativa ISO 178 o ASTM D790. Questi metodi di prova sono utilizzati per determinare le proprietà relative alla flessione delle plastiche non rinforzate e rinforzate, tra cui compositi ad alto modulo e materiali isolanti elettrici utilizzando un sistema di carico a tre punti applicato al provino. I provini devono essere solidi, uniformemente rettangolari e a sezione rettangolare. Il provino viene poggiato sui due supporti cilindrici e caricato in mezzeria, ovvero in corrispondenza della saldatura, da un punzone anch'esso di forma cilindrica. Molto importante durante questa prova è applicare un'elevata velocità di acquisizione, ovvero di almeno 100 Hz. Anche per le prove di piegatura è stata utilizzata una macchina universale MTS 810, ovviamente con una configurazione differente, adatta per la prova di piegatura (figura 4.7). Il provino è stato posizionato sui rulli in modo tale che la faccia saldata sia rivolta verso il basso, mentre la superficie opposta, ovvero quella non saldata che presenta una "luce" in mezzeria, è rivolta verso l'alto. Così facendo, la parte non saldata verrà a contatto con il punzone e sarà quindi sottoposta a compressione, mentre la parte saldata sarà sottoposta di conseguenza a trazione. In seguito alle prove di piegatura sono state effettuate le stesse procedure successive alla prova di trazione, acquisendo dati correlati alla corsa del punzone e alla sua forza applicata al provino.

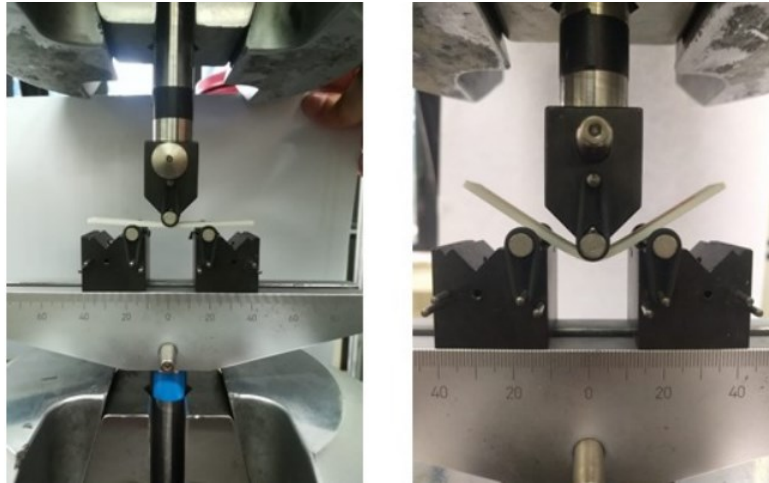


Figura 4.7 – Macchina MTS 810 configurata per la prova di piegatura; a sinistra è raffigurato il provino prima della prova, mentre a destra, dopo la prova

Anche in questa prova sarà quindi necessario effettuare il passaggio dal grafico forza-spostamento al grafico tensione-deformazione attenendosi alle formulazioni relative alla normativa utilizzata:

$$\sigma_f = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

$$\varepsilon_f = \frac{6 D d}{L^2}$$

Con:

- σ_f = tensione flessionale delle fibre esterne nel punto medio [Mpa]
- P = carico applicato dal punzone [N]
- L = distanza tra i due supporti [mm]
- b = larghezza del provino [mm]
- d = spessore del provino [mm]
- ε_f = deformazione flessionale relativa alla superficie esterna
- D = massima flessione del centro del fascio [mm]

4.7 Stereomicroscopio

Per l'osservazione dei provini successiva ai trattamenti di FSW e anche alle prove di trazione e piegatura, è stato utilizzato uno stereomicroscopio, allo scopo di analizzare dettagliatamente le caratteristiche strutturali e superficiali, in particolare del giunto e dei punti di rottura.

Lo stereoscopio utilizzato è il modello Leica EZ4 D (mostrato in figura 4.8), che offre uno zoom 4,4:1 di alta qualità e un'illuminazione ad elevato contrasto fornita da 7 LED, che garantiscono luce incidente e obliqua. Nello stereomicroscopio è integrata una fotocamera digitale che consente la visione rapida e in tempo reale su uno schermo di un computer grazie al trasferimento da stereo a microscopio USB. Per la visione delle immagini è stato utilizzato un software appositamente sviluppato, Leica LAS EZ, che permette di regolare la qualità e le caratteristiche dell'immagine quali luminosità e formato, così da acquisire immagini di elevata qualità.



Figura 4.8 – Stereomicroscopio Leica EZ4 D

5. Risultati

5.1 Risultati prove di trazione con utensile pin

A seguito della prova di trazione sono stati ricavati i grafici σ - ϵ dei provini A e B, appartenenti alle lastre saldate 2 e 3, perfettamente uguali, verificando inoltre la differenza del loro comportamento rispetto al provino in ABS non saldato. Nel grafico 5.1 sono inserite tutte le curve tensione-deformazione dei provini sottoposti a trazione e anche del provino non saldato:

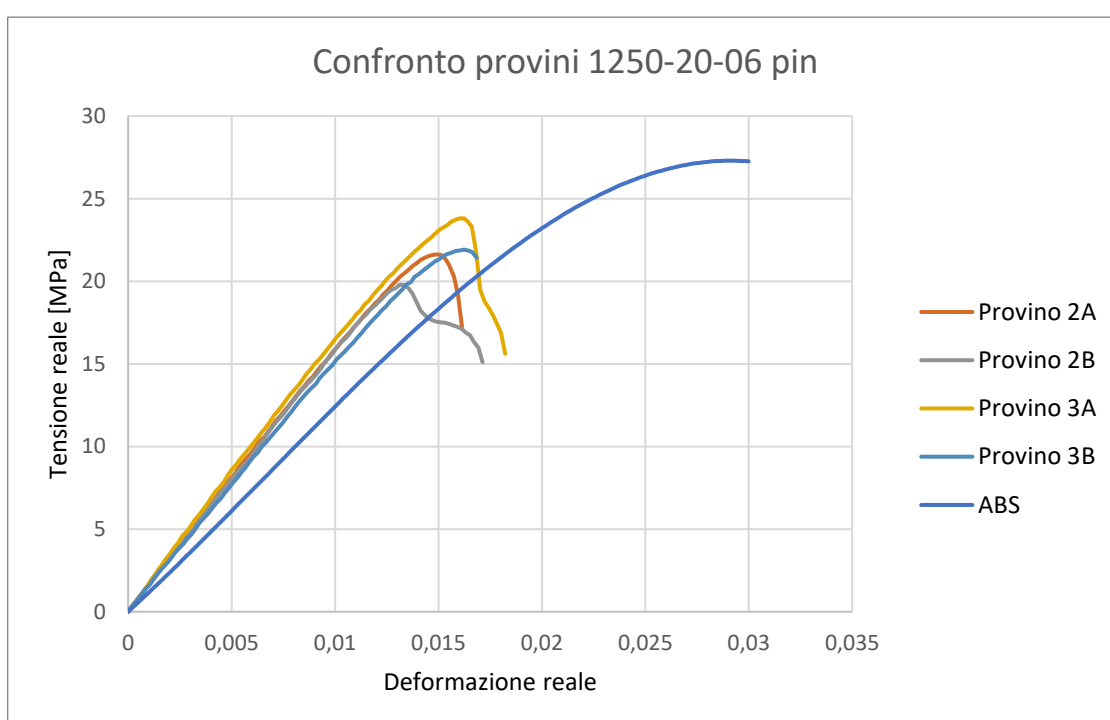


Grafico 5.1 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra i provini saldati nelle condizioni 1250-20-0,6 e il provino in ABS non saldato

Come si può notare dal grafico sovrastante, tutti i provini sottoposti a saldatura risultano meno performanti rispetto al provino in ABS non saldato. I valori di tensione massima raggiunta in MPa e la deformazione massima raggiunta sono riassunti nella seguente tabella 5.1:

Provino	σ massima [Mpa]	ϵ massima	σ rottura [Mpa]	ϵ rottura
2A	21,625	0,014931	17,251	0,016137
2B	19,796	0,013132	15,116	0,017131
3A	23,804	0,016012	15,608	0,018227
3C	21,918	0,016245	21,405	0,016852
ABS	27,92	0,027106	24,896	0,08526

Tabella 5.1 – Risultati di tensione e deformazione raggiunti dai provini a seguito della prova di trazione

Come già affermato nei capitoli precedenti, per ogni prova di saldatura sono stati ricavati 3 provini, ovvero A, B e C, differenti da un punto di vista strutturale e logistico in quanto B risulta essere il provino ricavato dalla zona centrale delle piastre, mentre A e C sono i provini più esterni che risentono maggiormente il fenomeno di saldatura dato dall'effetto bordo dovuto a scambi termici differenti. Nei grafici 5.2 e 5.3 sono riportati due esempi di confronto tra i provini A e B, dove si può notare la lieve differenza dell'andamento delle curve tensione-deformazione prese in considerazione. Da questo risultato ottenuto si può affermare quindi che la zona della piastra dalla quale si ricava il provino risulta essere un fattore praticamente trascurabile.

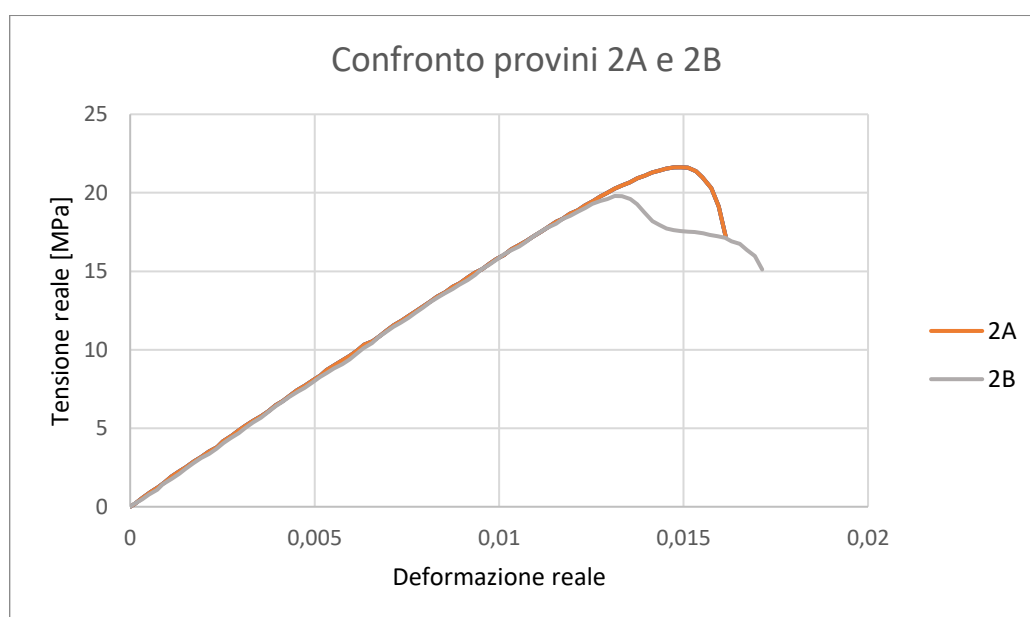


Grafico 5.2 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra i provini 2A e 2B

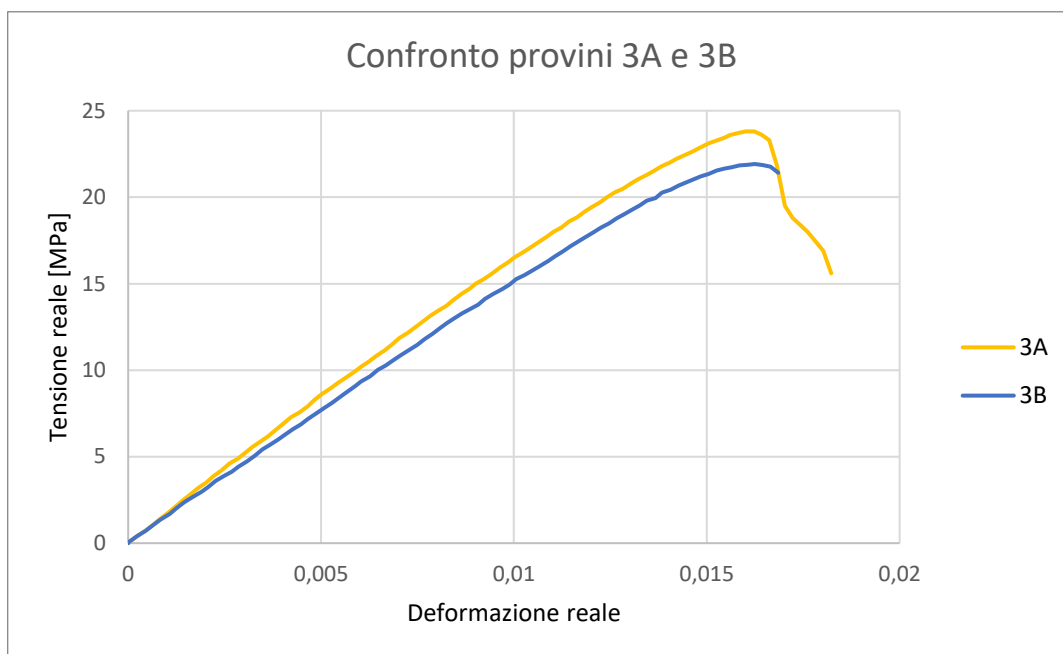


Grafico 5.3 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra i provini 3A e 3B

5.2 Analisi allo stereomicroscopio delle prove di piegatura

Un'interessante analisi al microscopio stereoscopico è stata svolta su delle piastre saldate con utensile pin-less di 15 mm di diametro. In particolare, successivamente alla prova di piegatura che porta a rottura il provino si è osservato che, con il variare dei tre parametri (velocità di rotazione, velocità di avanzamento e affondamento), il punto di frattura presenta delle caratteristiche diverse.

Le figura 5.1 mostra le immagini, ottenute allo stereomicroscopio, dei provini ricavati dalle piastre saldate, lasciando inalterati velocità di rotazione ed affondamento, e variando invece la velocità di avanzamento che è di, rispettivamente, 20 mm/min e 40 mm/min.

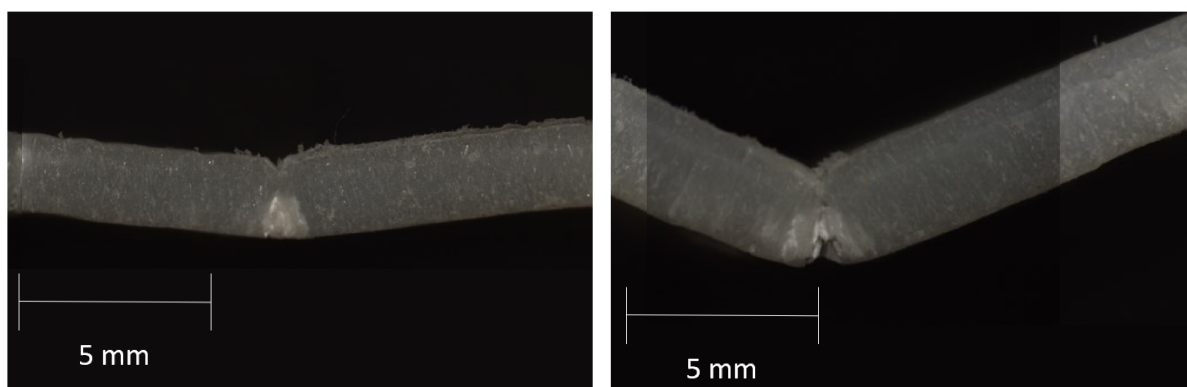


Figura 5.1 – Immagini che mostrano la differenza della rottura tra i provini ricavati dalle saldature nelle condizioni di 1250-20-04 (a sinistra) e di 1250-40-04 (a destra), con ingrandimento 16x

Dalle immagini è evidente come la frattura del provino saldato nelle condizioni di velocità di avanzamento maggiore risulti essere più netta, infatti l'angolo della frattura è visibilmente maggiore rispetto all'altro provino. Sarebbe interessante svolgere uno studio per comprendere meglio in che maniera la velocità di avanzamento, e quindi anche la resistenza vanno ad influenzare le caratteristiche della frattura.

La figura 5.2 mostra le immagini, ottenute allo stereomicroscopio, dei provini ricavati dalle piastre saldate, lasciando inalterati velocità di rotazione e velocità di avanzamento, e variando invece l'affondamento che è di, rispettivamente, 0,3 mm e 0,5 mm.

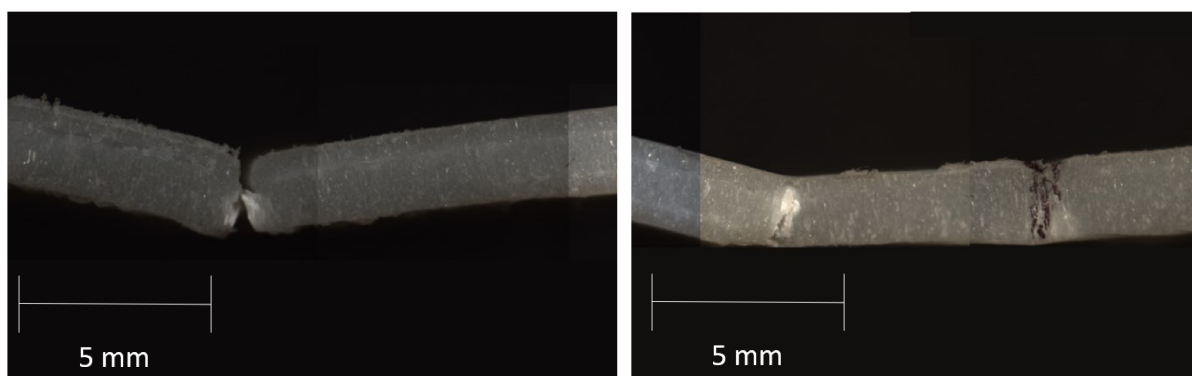


Figura 5.2 – Immagini che mostrano la differenza della rottura tra provini ricavati dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-03 (a sinistra) e 1250-20-05 (a destra), con ingrandimento 16x

Dalle immagini si può notare come il provino con affondamento maggiore presenti due punti di rottura, a differenza dell'altro provino che ne presenta solamente uno, come del resto tutti gli altri. Anche in questo caso sarebbe interessante svolgere uno studio per comprendere le motivazioni che portano a questo fenomeno, andando a studiare approfonditamente in che maniera il calore generato per attrito determina la presenza di uno o più punti di frattura e la loro posizione.

5.3 Saldatura Double Side

Come già affermato nel capitolo 4, un limite dato dall'utilizzo di un utensile pin è costituito dalla finitura superficiale di scarsa qualità e dal fatto che il cordone non risulta avere proprietà notevoli dal punto di vista estetico. Per questo motivo un utensile di tipo pin-less può sicuramente garantire un miglioramento in questi termini, pur riducendo il calore generato e di conseguenza le caratteristiche di resistenza del giunto. Per far sì che possano essere migliorate sia le une che le altre proprietà, si è pensato di operare con una saldatura double side, quindi sia sulla faccia superiore che su quella inferiore, così da essere sicuri che la saldatura possa coinvolgere tutto lo spessore della piastra; è evidente, infatti, dalla figura 5.3, che

nell'immagine di sinistra che il calore non è riuscito a raggiungere tutto lo spessore delle piastre, poiché è netta la separazione tra le due nella parte inferiore; la figura di destra mostra che con la saldatura double side si ottiene una completa giunzione delle piastre.

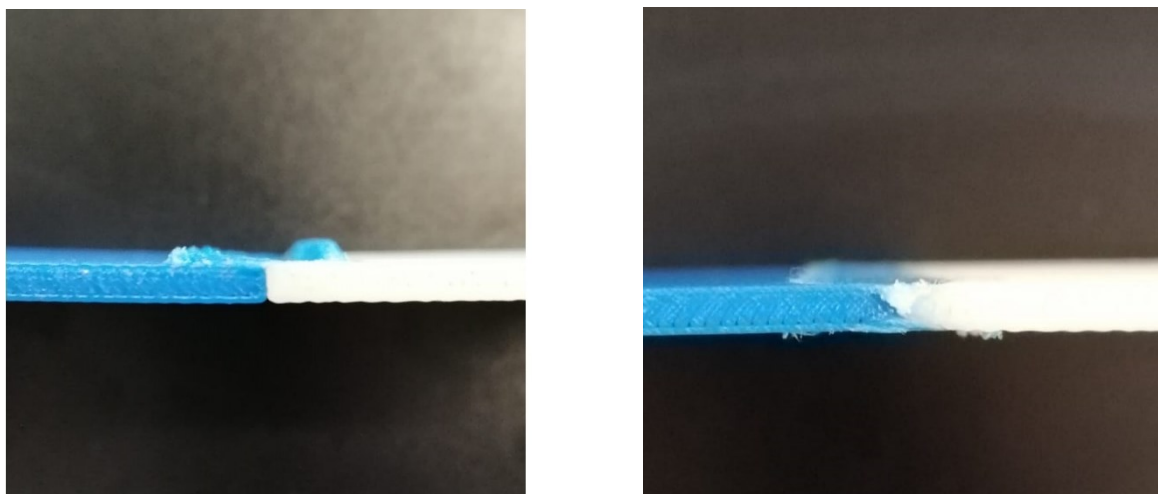


Figura 5.3 – Immagini che mostrano le lastre di profilo, così da poter notare che nella saldatura classica (sinistra) vi è una separazione netta tra le due lamine, mentre nella saldatura double side (destra) la giunzione è avvenuta su tutto lo spessore

Anche utilizzando la saldatura double side bisogna tener conto del fatto che incrementare l'affondamento, così come la velocità di rotazione, fa sì che la qualità del giunto (in termini estetici e di finitura superficiale) tende a peggiorare, come evidente dalle figure 5.4 e 5.5, che mostrano la differenza tra il giunto a velocità di rotazione di 1250 rpm e 1650 rpm (mantenendo costanti affondamento a 0,4 mm e velocità di avanzamento a 20 mm/min).

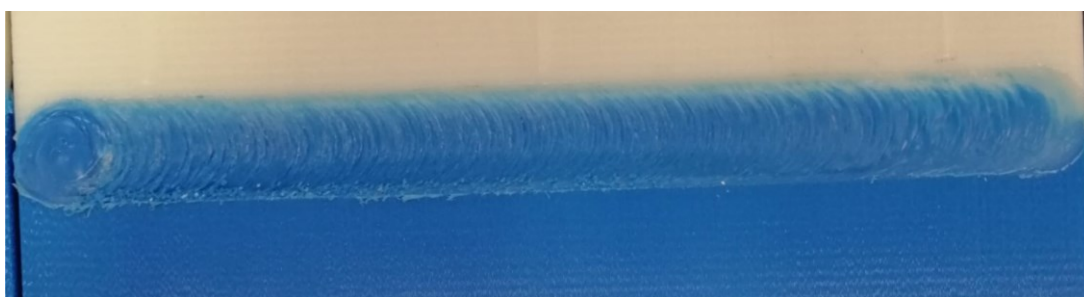


Figura 5.4 – Cordone di saldatura nelle condizioni di 1250 rpm

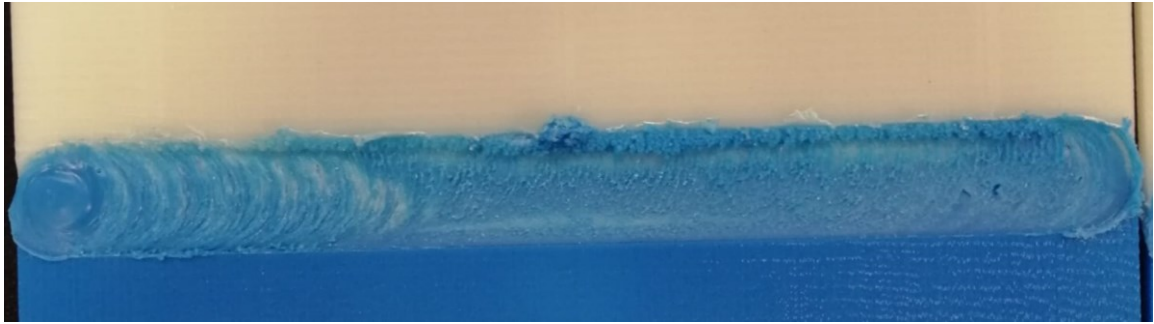


Figura 5.5 – Cordone di saldatura nelle condizioni di 1650 rpm, dove è evidente che le proprietà di finitura superficiali sono di minor qualità rispetto alla condizione precedente

Effettuando le prove di trazione sarà molto importante andare a confrontare le curve σ - ϵ dei provini ricavati dalle piastre saldate double side e dalle piastre saldate solamente su una delle due facce. Se effettivamente le prime risultassero essere più resistenti, si avrebbe un risultato di notevole importanza, poiché si sarebbero risolti i problemi inerenti alla finitura superficiale e all'aspetto estetico, andando anche ad incrementare la resistenza del giunto.

Inoltre, essendo le piastre di colore diverso (una bianca e una blu), sarebbe interessante andare ad osservare, al microscopio stereoscopico, la superficie di frattura che si origina quando il provino arriva a rottura in seguito alla prova di trazione. Questo studio potrebbe offrire delle informazioni in merito al mescolamento del materiale nel giunto saldato.

5.4 Analisi della temperatura

Alcuni risultati interessanti sono stati ottenuti andando a misurare la temperatura del giunto saldato, utilizzando delle termocoppie. In particolare, è stato possibile inserire le termocoppie all'interno delle piastre in ABS, realizzando quest'ultime con un apposito foro cieco che permette alla termocoppia di arrivare a 2 millimetri dal giunto (dato di progetto sul quale va tenuto conto che potrebbero esserci eventuali errori accidentali dovuti al processo di stampa). A causa di questa distanza le temperature registrate risulteranno essere inferiori di diverse decine di gradi rispetto alla temperatura effettivamente raggiunta in prossimità del giunto. Per realizzare i grafici tempo-temperatura è stata utilizzata un'apparecchiatura, mostrata in figura 5.6 che comprende quattro termocoppie con due appositi lettori, in grado ognuno di ospitare due termocoppie, e un cronometro per gestire i vari intervalli di tempo nei quali registrare la temperatura captata.

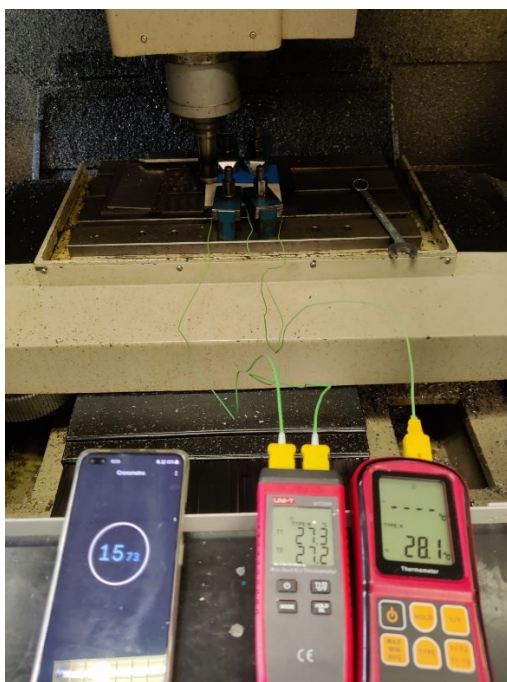


Figura 5.6 – Apparecchiatura per la misurazione della temperatura durante il processo di FSW

Tre delle quattro termocoppie utilizzate sono state poste all'interno delle piastre, come illustrato in figura 5.7, mentre la quarta, non vincolata, è stata usata per misurare la temperatura sul giunto, che è risultata essere più elevata rispetto a quella degli altri tre misuratori.

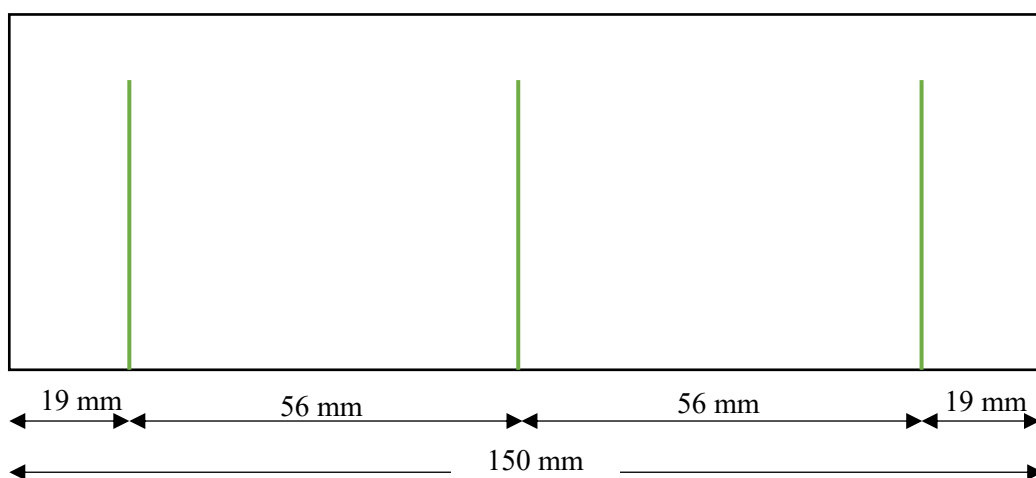


Figura 5.7 – Schema rappresentante le posizioni delle termocoppie all'interno delle piastre in ABS

Il grafico 5.4 mostra l'andamento della temperatura in funzione del tempo di lastre saldate con utensile pinless e nelle condizioni di:

- velocità di rotazione ω : 1650 rpm;
- velocità di avanzamento: 20 mm/min
- affondamento: 0,4 mm

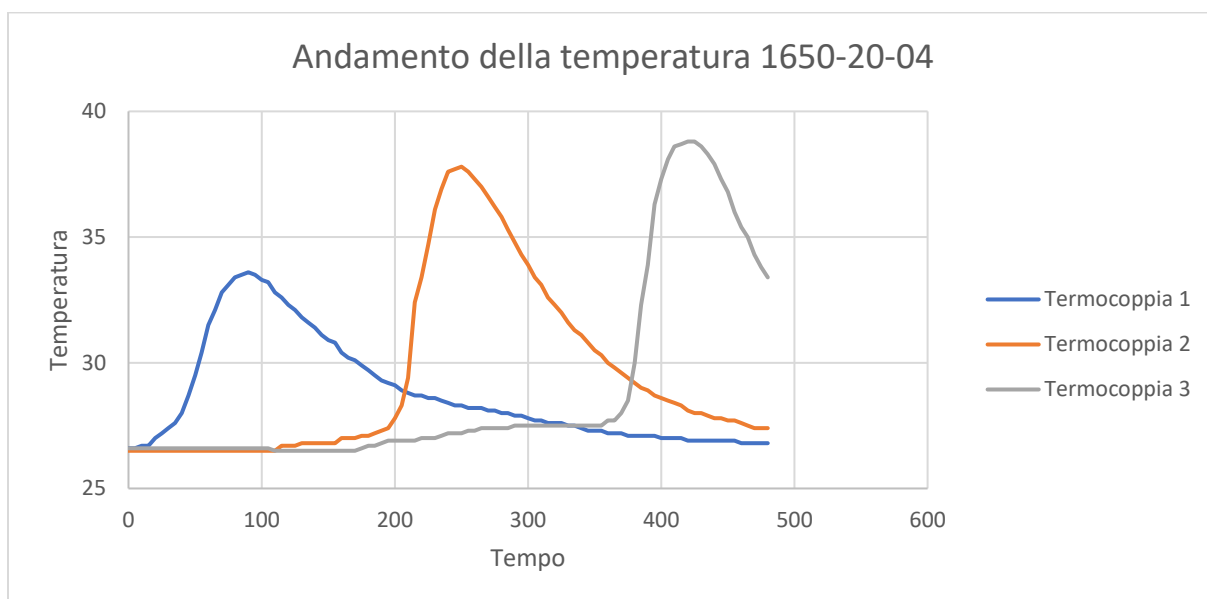


Grafico 5.4 – Andamento della temperatura in funzione del tempo nel processo con le condizioni 1650-20-04

Il grafico mostra l'andamento della temperatura delle tre termocoppie contemporaneamente, considerando un intervallo di tempo tra un punto e l'altro di cinque secondi. È evidente che la temperatura aumenta quando la termocoppia in questione vede l'utensile avvicinarsi, mentre diminuisce quando quest'ultimo si allontana. Per considerare alcuni aspetti interessanti prendiamo come riferimento la tabella 5.2 che mostra la temperatura massima percepita da ogni termocoppia, l'istante di tempo al quale questa viene registrata e, sapendo che la velocità di avanzamento è di 20 mm/min, è possibile calcolare a che distanza dalla termocoppia viene percepita la massima temperatura, moltiplicando la velocità di avanzamento (che è nota) e l'istante di tempo (in minuti). La tabella presenta anche la posizione della termocoppia, considerando come zero il margine sinistro della lastra in ABS.

Termocoppia	Temperatura massima [°C]	Tempo alla temperatura massima [s]	Posizione alla temperatura massima [mm]	Posizione della termocoppia [mm]
1	34,1	90	30	19
2	38,3	250	83	75
3	39,3	420	140	131

Tabella 5.2 – Tabella rappresentante alcuni valori particolari relativi al processo nelle condizioni di 1650-20-04

Un aspetto importante, desumibile anche dal grafico, riguarda la temperatura massima raggiunta, che è di 39,3 °C nell'ultima termocoppia. Con la quarta termocoppia è stata misurata la temperatura in prossimità del giunto, e ivi si è ottenuto un valore di circa 120 °C, a dimostrare che, a causa della distanza (2 mm) dal giunto, le temperature risultano essere sensibilmente inferiori. Si è ipotizzato che esiste una proporzionalità tra il valore misurato con la termocoppia a 2 mm dal giunto e quello che effettivamente si ha in prossimità del giunto. Quindi avendo misurato in prossimità della terza termocoppia una temperatura di 120 °C sul giunto, è stato preso come fattore moltiplicativo tre ($39,3 \cdot 3 \approx 120$). Ciò significa che possiamo considerare la temperatura sul giunto, alla posizione della seconda termocoppia, come $38,3 \cdot 3 \approx 115$ °C e, alla posizione della terza termocoppia $34,1 \cdot 3 \approx 102$ °C.

Un altro dato riguarda l'andamento delle tre temperature, ognuna rispetto all'altra: anche in questo caso era possibile direttamente dedurre dal grafico il fatto che le termocoppie presentano un picco crescente, infatti la prima termocoppia ha registrato una temperatura massima di 34,1 °C, la seconda di 38,3 °C e la terza di 39,3 °C. La spiegazione che è stata assunta come motivo di questo aumento di temperatura è che, essendo la piastra di supporto (quella inclinata di 2° circa) in acciaio, il calore generato provoca un innalzamento della temperatura su tutta la piastra conduttrice, inducendo, di conseguenza, la seconda e la terza termocoppia a registrare valori più alti rispetto alla temperatura ambiente, pur essendo l'utensile ancora lontano.

La tabella risulta essere utile poiché mostra anche a che distanza dalla termocoppia si registra la temperatura massima. Si può notare che in tutti e tre i casi ciò avviene alcuni millimetri dopo che l'utensile ha superato la posizione della termocoppia, rispettivamente a 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.

L'apparecchiatura per la misurazione della temperatura è stata utilizzata nei processi che hanno previsto la saldatura delle piastre in colori diversi (blu e bianco), i cui parametri di processo sono riportati nella tabella 4.2. In tale maniera è stato possibile fare un confronto tra le varie temperature raggiunte in relazione ai diversi parametri di progetto. In particolare, si è osservato che:

- Mantenendo costanti l'affondamento (0,4 mm) e la velocità di avanzamento (20 mm/min), se si aumenta la velocità di rotazione, l'ipotesi fatta a priori è che la temperatura aumenti, poiché ruotando l'utensile a maggiori velocità, si genera maggior calore per attrito. Il grafico 5.5, che mostra il confronto tra le temperature registrate nelle condizioni di 1250 rpm e 1650 rpm, conferma l'affermazione ipotizzata.

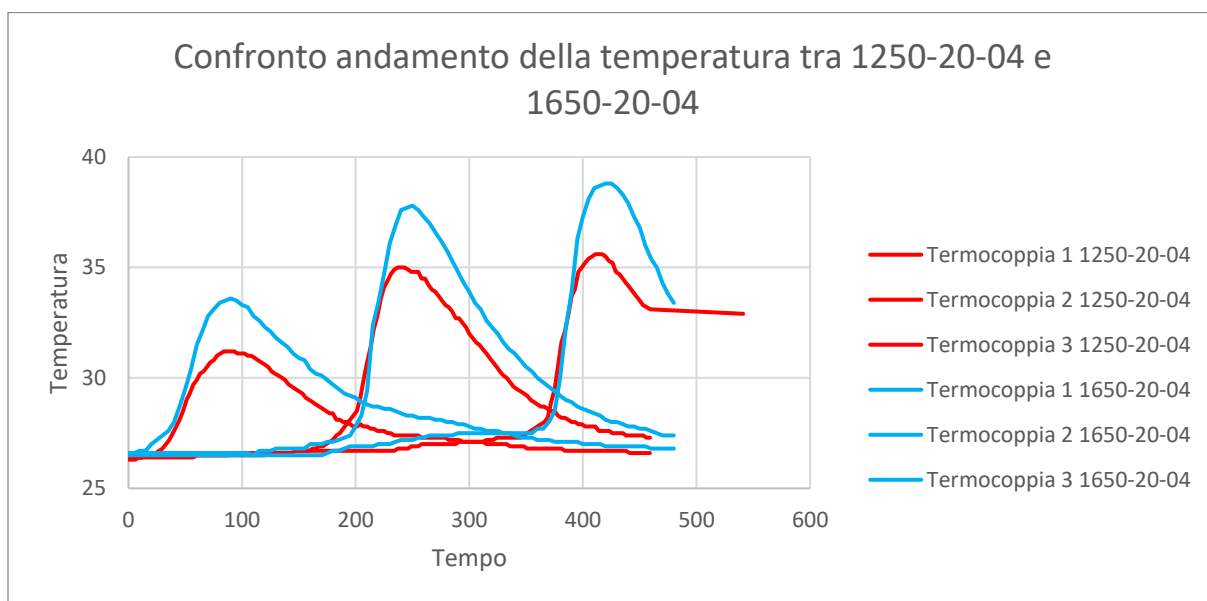


Grafico 5.5 – Confronto tra gli andamenti della temperatura nelle condizioni di 1250 rpm e 1650 rpm (lasciando invariati gli altri parametri)

- Mantenendo costanti la velocità di rotazione (1650 rpm) e l'affondamento (0,4 mm), se si aumenta la velocità di avanzamento, l'ipotesi fatta a priori è che la temperatura diminuisca, poiché l'utensile, stazionando per un tempo minore in prossimità della termocoppia, ha meno tempo per generare calore per attrito. Il grafico 5.6, che mostra il confronto tra le temperature registrate nelle condizioni di 20 mm/min e 40 mm/min, smentisce l'ipotesi, poiché si può osservare che, ad eccezione della prima termocoppia che ha dato alcuni problemi anche in altre misurazioni, perché difficilmente si era in grado di arrivare a battuta sul foro cieco con la termocoppia, le altre due curve risultano avere il picco di massimo in corrispondenza della stessa ordinata. È interessante notare che i picchi risultano essere sfalsati, perché la velocità di avanzamento di una prova è il doppio dell'altra e di conseguenza il tempo si dimezza.

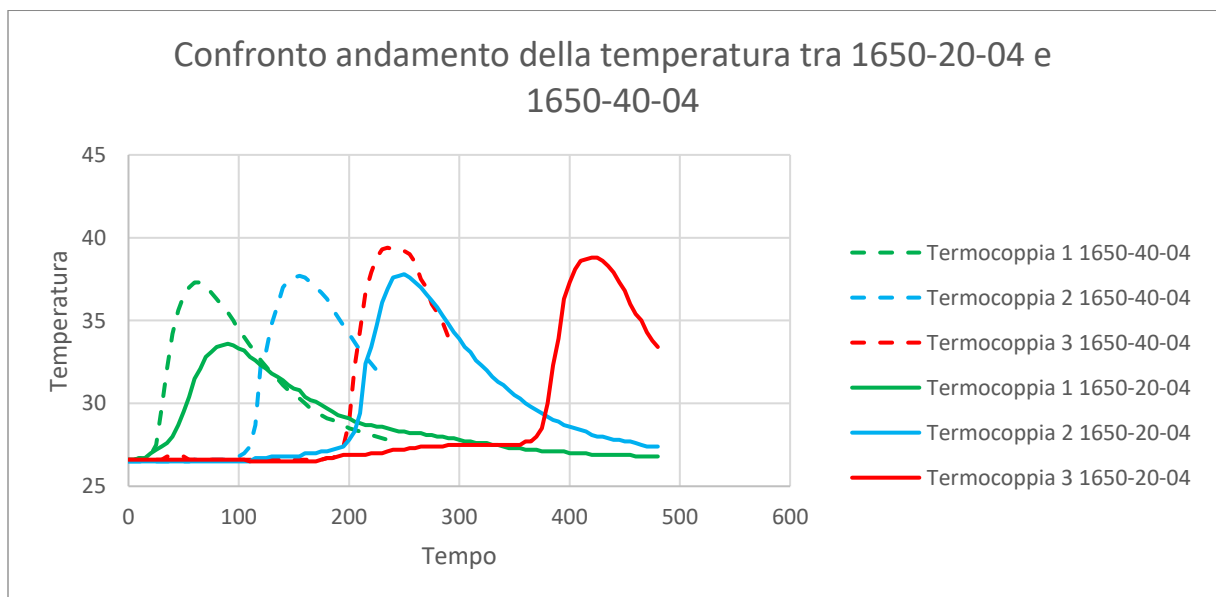


Grafico 5.6 – Confronto tra gli andamenti della temperatura nelle condizioni di 20 mm/min e 40 mm/min (lasciando invariati gli altri parametri)

- Mantenendo costanti la velocità di rotazione (1650 rpm) e la velocità di avanzamento (20 mm/min), se si incrementa l'affondamento, l'ipotesi fatta a priori è che la temperatura aumenti, poiché aumenta il volume di materiale rimescolato e quindi anche

il calore generato per attrito. Il grafico 5.7, che mostra il confronto tra le temperature registrate nelle condizioni di 0,3 mm e 0,4 mm, conferma l'ipotesi iniziale. In questo caso si è verificata un'incongruenza con la prima termocoppia, per il problema precedentemente discusso relativo al suo inserimento all'interno del foro apposito, e di conseguenza non si sono registrati consistenti aumenti di temperatura.

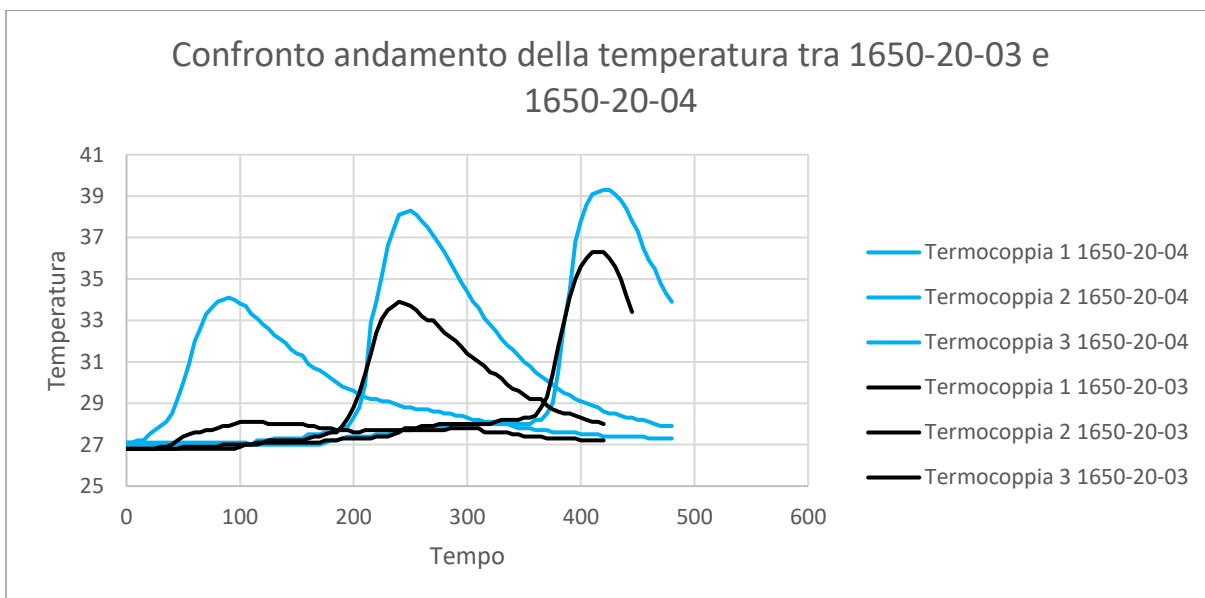


Grafico 5.7 – Confronto tra gli andamenti della temperatura nelle condizioni di 0,4 mm e 0,3 mm di affondamento (lasciando invariati gli altri parametri)

6. Conclusioni

Dai risultati ottenuti attraverso l'analisi della temperatura, si è osservato che la variazione dei parametri fondamentali di processo influenza le temperature raggiunte in prossimità del giunto. In particolare, si è osservato che:

- l'incremento della velocità di rotazione ω causa un aumento della temperatura poiché 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 v non ha particolari ripercussioni sulla temperatura raggiunta.

In accordo con gli studi precedentemente svolti, si può notare che le condizioni che causano un incremento della temperatura, sono le stesse che consentono di ottenere le migliori qualità del giunto, a dimostrazione del fatto che la generazione di calore in maggiore entità coincide con un miglioramento delle prestazioni meccaniche.

Per avere una visione più ampia e completa sul processo e sulla sua fattibilità è opportuno svolgere ulteriori studi, andando a investigare altri range di parametri e sperimentando altre condizioni di processo.

Un'analisi molto importante sarà quella derivante dalle prove di trazione sui provini ricavati dalle piastre di diversa colorazione saldate double side, poiché potrebbero rappresentare un notevole risultato qualora fossero più resistenti delle normali piastre saldate mediante FSW, e perché offriranno la possibilità di analizzare al meglio il mescolamento delle particelle sul giunto, tramite l'osservazione al microscopio stereoscopico della superficie di frattura.

Bibliografia

[1] P.L. Threadgill, A.J. Leonard, H.R. Shercliff e P.J. Withers, “*Friction Stir Welding of aluminum alloys*”, Elsevier

[2] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, “*Friction stir welding and processing*”, Mater SciEng, 2005, 1 – 78

[3] Nasser Sadeghian, Mohammad Kazem Besharati Givi, “*Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets*”, Elsevier

[4] Archimede Forcellese, Slide del Corso di Tecnologia Meccanica, A.A 2020/2021

[5] Tiziano Bellezze, Slide del Corso di Tecnologia dei Materiali, A.A 2019/2020

Sitografia

[6] <https://www.xpolymers.it/abs.html>

[7] 3dremag.eu

[8] <https://www.researchgate.net>

[9] <https://www.3dhubs.com>

[10] www.stirweld.com

[11] <https://www.technimoldsistemi.com>