



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**PROCESSI DI SALDATURA ALLO STATO
SOLIDO DI PIASTRE IN MATERIALE
TERMOPLASTICO OTTENUTE MEDIANTE
MANIFATTURA ADDITIVA**

**SOLID STATE WELDING PROCESSES OF
SHEETS IN THERMOPLASTIC MATERIAL
OBTAINED BY MEANS OF ADDITIVE
MANUFACTURING**

Relatore:
Prof. Ing. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:
Matteo Merli

Correlatore:
Prof.ssa Ing. Michela Simoncini

A.A. 2019/2020

A mio nipote Edoardo

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 – Materiali polimerici termoplastici	3
1.1. Introduzione.....	3
1.1.1. Materiali polimerici termoplastici	3
1.1.2. Caratteristiche chimico-fisiche.....	5
1.1.3. Tipologie ed utilizzi	6
1.2. Acrilnitrile-butadiene-stirene (ABS).....	7
1.2.1. Proprietà.....	9
1.2.2. Campo di utilizzo	11
1.2.3. Metodi di produzione	11
Capitolo 2 – Additive manufacturing	13
2.1. Generalità	13
2.2. Tecnica FDM	14
2.3. Campo di utilizzo	17

Capitolo 3 – Friction Stir Welding	18
3.1. Generalità	18
3.1.1. Principio di funzionamento	18
3.1.2. Parametri.....	23
3.2. Attrezzatura.....	24
3.2.1. Utensile.....	24
3.2.2. Sistema di bloccaggio.....	29
3.3. Stato attuale della ricerca	29
Capitolo 4 – Procedure sperimentali	34
4.1. Introduzione.....	34
4.2. Stampante 3D	34
4.3. Processo di FSW	35
4.4. Provini	37
4.5. Prove.....	38
4.5.1. Prove di trazione.....	38
4.5.2. Prove di piegatura.....	41
4.6. Stereomicroscopio	43
Capitolo 5 – Risultati sperimentali	44
5.1. Caratteristiche del provino saldato.....	44
5.2. Risultati prove di trazione	46
5.3. Risultati prove di piegatura	52
5.4. Analisi allo stereomicroscopio	55

Capitolo 6 – Conclusioni	57
Bibliografia	58
Sitografia	59
Ringraziamenti	60

Introduzione

Alla base del rapporto difficile, e spesso conflittuale, tra uomo e ambiente sta il diverso modo di funzionare del tecnosistema umano, in particolare di quello economico, in relazione con l'ecosistema globale. È questa tendenza che induce le società industrializzate ad affrontare la natura come "sfida" ambientale e non come dimensione cui adattarsi. La competitività tra i produttori e la necessità di proteggere l'ambiente, pur mantenendo un adeguato livello di benessere, è una delle più grandi problematiche alla base dello sviluppo economico: l'obiettivo al quale si punta è infatti quello di ottenere un "benessere sostenibile", riducendo le emissioni inquinanti e limitando i consumi di energia e di altre risorse. La saldatura è fondamentalmente una spina dorsale per tutte le attività di costruzione e fabbricazione in tutto il mondo. Al fine di evitare gli effetti nocivi per l'ambiente e per la salute dell'operatore che effettua il processo di saldatura, è stato inventato un processo ecologico presso il *The Welding Institute* nel Regno Unito, comunemente noto come *Friction Stir Welding* (FSW). La FSW è un processo emergente di giunzione allo stato solido in cui il materiale viene unito senza fusione, un processo ecologico che non produce fumi o gas tossici dovuti ad archi elettrici. Grazie a questi motivi e alla completa automatizzabilità del processo, è possibile adottare la tecnica FSW anche in un'officina non attrezzata per effettuare saldature convenzionali. Questa innovativa tecnica di saldatura si va così a configurare come una tecnica di produzione ecologica, soprattutto in virtù della sua efficienza energetica e compatibilità ambientale. Nello studio effettuato l'interesse va rivolto in particolare alla stampa 3D, protagonista dei giorni d'oggi in svariati settori che risulta essere economica ma anche ecosostenibile. Le piastre utilizzate nella prova di saldatura sono stati realizzati tramite una particolare tecnica di stampa, chiamata FDM, ovvero *Fused Deposition Modeling*. Attraverso questa modalità di stampa è possibile creare tutto ciò di cui si ha bisogno quando e dove si vuole, evitando l'affidamento a grandi magazzini, in attesa di essere trasportati in ogni angolo del pianeta, evitando inoltre anche spreco di materiale nella sua produzione. Un recente studio ha dimostrato che gli oggetti creati con le stampanti 3D richiedono dal 41% al 74% in meno di energia rispetto alle tradizionali produzioni manifatturiere. Da queste affermazioni risulta automatico che questa tecnica implica un aumento di efficienza logistica e produttiva. Tuttavia, una limitazione che presenta la stampante 3D è il volume di stampa

limitato, ovvero quello spazio che si sviluppa sugli assi X, Y, Z ed entro il quale il dispositivo può produrre oggetti. Questo volume è quindi da intendersi interno alla struttura della stampante e definito esclusivamente dalle possibilità di movimento del blocco estrusore: generalmente, infatti, le dimensioni su X, Y e Z vengono definite in millimetri o, al massimo, in centimetri. E' però possibile dividere il modello in più parti da stampare ed unirle successivamente, solitamente con colle o incastri. Grazie a questa nuova tecnica di saldatura si potranno quindi unire vari pezzi prodotti dalla stampa 3D, evitando l'utilizzo di incastri o particolari collanti.

Lo scopo perseguito nel presente lavoro è stato quello di valutare la fattibilità della saldatura allo stato solido su piastre in ABS stampate mediante tecnica 3D. Come prima cosa si è reso necessario valutare lo stato dell'arte della *Friction Stir Welding* al fine di evitare scelte tecniche errate. Si sono quindi condotte delle prove di saldatura effettuando la variazione di tre parametri fondamentali, ovvero velocità di rotazione dell'utensile, velocità di traslazione dell'utensile ed affondamento dell'utensile all'interno del materiale. La tesi si sviluppa poi nel confronto dei risultati ottenuti dalle prove di trazione e piegatura secondo le normative prestabilite. In entrambi i test il provino è stato sottoposto a sforzo fino al punto di rottura e sono state estratte le curve caratteristiche nel diagramma tensione-deformazione ponendo una maggiore attenzione alle prove di trazione. Nell'ultima parte di questo lavoro di tesi si sono valutati i risultati numerici e strutturali ottenuti da entrambe le prove ed effettuando il confronto con quelli dei provini in ABS non saldati anche attraverso l'utilizzo di un microscopio stereoscopico.

Capitolo 1 – Materiali polimerici termoplastici

1.1. Introduzione

Da circa un secolo le materie plastiche vengono impiegate per la fabbricazione di manufatti con le caratteristiche più svariate. Con materie plastiche si intende comunemente un'ampia serie di materiali sintetici o semi-sintetici che vengono utilizzati in una vasta gamma di applicazioni. Le materie prime con cui vengono realizzate le materie plastiche sono prodotti naturali come cellulosa, carbone, gas naturale, sale e, ovviamente, petrolio. Fra le numerose materie plastiche disponibili, una risulta essere particolarmente utilizzata in campo meccanico per le sue caratteristiche chimico-fisiche, ovvero i materiali polimerici.

I materiali polimerici sono generalmente il risultato della reazione di polimerizzazione di una quantità di molecole base per formare catene anche molto lunghe. A seconda delle proprietà e del comportamento di questi materiali sono state sviluppate tecnologie di processo molto diversificate. Esse, tuttavia, almeno nel caso della trasformazione dei polimeri termoplastici, prevedono sempre una fase in cui il materiale viene fuso in modo da poter subire il necessario processo di formatura.

1.1.1. Materiali polimerici termoplastici

I polimeri possono essere classificati in relazione alla loro proprietà quando vengono sottoposti a riscaldamento, ovvero in materiali polimerici *termoplastici* e *termoindurenti*. I materiali termoindurenti, grazie alla loro lavorazione per mezzo del calore e della pressione, subiscono delle variazioni che modificano permanentemente la loro natura. Una volta realizzato l'oggetto con la forma progettata, il materiale, se riscaldato nuovamente, carbonizza, non potendo né bruciare né cambiare forma. I materiali termoplastici invece ogni volta che verranno riscaldati torneranno lavorabili, in quanto è sufficiente aumentare la temperatura per portarli ad uno stato viscoso e poterli quindi formare.

I polimeri termoplastici sono polimeri formati da catene lineari o poco ramificate, non legate l'una con l'altra, ovvero non reticolate. Se riscaldati si ammorbidiscono fino a liquefarsi e si induriscono in un successivo raffreddamento: a livello molecolare i legami si indeboliscono, se però sono portati a temperature troppo elevate si degradano irreversibilmente.

E' interessante osservare la tipica curva tensione-deformazione di questa tipologia di materiali per capire come essi si deformino a seguito dell'applicazione di una forza dall'esterno (grafico 1.1). Tale comportamento dipende dal modo in cui le catene polimeriche si muovono l'una rispetto all'altra in condizioni di sforzo.

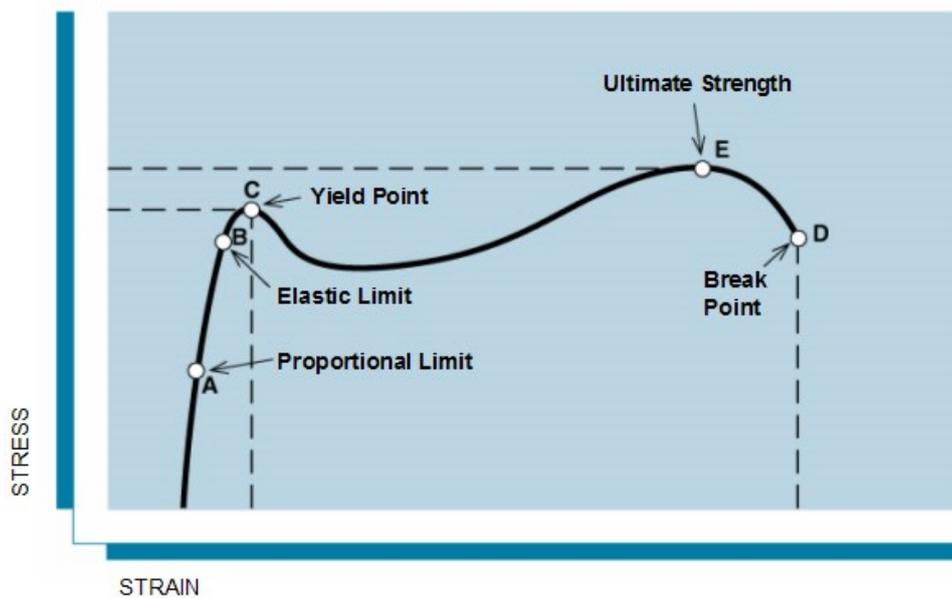


Grafico 1.1 – Curva tensione-deformazione caratteristica dei materiali polimerici termoplastici.

Si nota nel primo tratto della curva un andamento lineare che denota un comportamento elastico. Non appena la forza applicata si annulla, le catene ritornano alla loro posizione originaria (punto A). Nel secondo tratto della curva è presente un comportamento elastico non lineare. L'applicazione di uno sforzo maggiore può portare alla deformazione di interi segmenti di catena. Quando lo sforzo finisce essi ritornano nella loro posizione originaria, ma in tempi lunghi, ovvero da alcune ore a diversi mesi (punto B). Nel terzo tratto quando la forza applicata supera un certo valore tipico di ogni polimero, viene indotta nel materiale una deformazione plastica permanente (punto C). La curva presenta oltre tale punto un minimo e poi risale gradualmente.

1.1.2. Caratteristiche chimico-fisiche

I polimeri termoplastici possono essere *amorfi* o *semicristallini*: i primi sono trasparenti, gli altri sono invece opachi, a meno che gli indici di rifrazione delle due fasi (amorfa e cristallina) siano uguali, o la fase dispersa abbia dimensioni minori della lunghezza d'onda della radiazione visibile incidente. I polimeri amorfi al di sotto della temperatura di fusione hanno catene intrecciate e attorcigliate; presentano una certa resistenza ed elasticità e se non sono caricati mantengono la loro forma. I polimeri semicristallini sono invece costituiti da zone cristalline, in cui le catene polimeriche sono disposte in maniera ordinata, seguendo tutte la stessa orientazione, intervallate da zone amorfe. Per poter essere semicristallini, i polimeri devono seguire due criteri di cristallizzabilità:

- *Regolarità di costituzione*: lungo la catena polimerica ci deve essere un ordine in cui gli atomi si ripetono;
- *Regolarità di configurazione*: il monomero deve avere gli stessi atomi nello stesso posto lungo la catena.

Il comportamento dei polimeri amorfi è fortemente influenzato dalla temperatura: alla temperatura transizione vetrosa T_g i movimenti delle catene si riducono a tal punto che il materiale diviene compatto e rigido ed avviene una variazione di circa tre ordini di grandezza del modulo elastico. La temperatura di transizione vetrosa non è costante, ma dipende dal peso medio ponderale e dalla velocità di raffreddamento del polimero.

Le proprietà di un materiale termoplastico dipendono dalle condizioni di solidificazione, che sono:

- temperatura di stampaggio o reticolazione;
- tempo richiesto per tale processo.

I processi sono due: *cristallizzazione* e *vetrificazione*. Al punto di fine cristallizzazione però si ha il materiale 100% cristallino, ma raggiunge il massimo grado di cristallinità. Poi si ha anche la curva di transizione vetrosa, la quale incide sull'addensamento delle macromolecole e sul volume libero del polimero, ovvero lo spazio che rimane tra le macromolecole.

I polimeri termoplastici costituiscono una classe estremamente estesa di materiali.

Molti di questi materiali trovano applicazione grazie alle loro caratteristiche estetiche o funzionali in una grandissima varietà di oggetti e componenti.

La maggior parte di essi possiede le seguenti caratteristiche:

- elevata rigidità e resistenza specifica, confrontabili con quelle di molti metalli, eventualmente con la presenza di cariche e rinforzi;
- mantenimento di resistenza, rigidità, tenacità, stabilità dimensionale in un ampio campo di temperatura, resistenza all'invecchiamento.
- altre caratteristiche di rilievo per applicazioni specifiche come la resistenza ad abrasione, le proprietà elettriche ed ottiche, la risposta al fuoco e la resistenza a fatica.

Spesso infatti in diverse applicazioni, come nel campo aerospaziale ad esempio, vi è la necessità di materiali in grado di mantenere caratteristiche meccaniche strutturali utili fino a temperature superiori a quelle consentite ai comuni polimeri e tecnopolimeri, a volte superiori a 200 °C e più; inoltre questi materiali devono possedere ottime caratteristiche di resistenza al fuoco e ad agenti aggressivi, quali solventi, combustibili e lubrificanti con cui possono venire a contatto in condizioni di servizio.

1.1.3. Tipologie ed utilizzi

I materiali polimerici possono essere classificati in vari modi. In primo luogo, valutando la struttura si distinguono in *polimeri lineari*, se le unità monomeriche sono legate formando lunghe catene più o meno raggomitolate, *polimeri ramificati*, quando da una catena principale si suddividono in ramificazioni laterali e in *polimeri reticolati*, quando alcune ramificazioni connettono chimicamente più catene. I polimeri possono anche essere classificati però, come già affermato precedentemente, in base al loro comportamento al variare della temperatura, in *termoplastici*, se rammolliscono al riscaldamento per poi riacquistare consistenza solida a bassa temperatura secondo un ciclo che può essere ripetuto infinite volte, e in *termoindurenti* se dapprima rammolliscono ma poi si consolidano definitivamente senza poter riacquistare fluidità.

I più comuni materiali termoplastici sono:

- *Polietilene o politene (PE)*: è il più semplice dei polimeri sintetici ed è la più comune fra le materie plastiche, con ottime proprietà isolanti e di stabilità chimica. Gli usi più comuni sono come isolante per cavi elettrici, film per l'agricoltura, borse e buste di plastica, contenitori di vario tipo, tubazioni, strati interni di contenitori asettici per liquidi alimentari e molti altri;
- *Polipropilene (PP)*: resistente al calore e agli agenti chimici e presenta un buon grado di isolamento elettrico;
- *Polistirene (PS)*: caratterizzato da durezza e rigidità e si usa per produrre scotch, imballaggi, giocattoli e arredi;
- *Polimetilmetacrilato (PMMA)*: è molto trasparente, più del vetro, è usato nella fabbricazione di vetri di sicurezza e articoli simili, nei presidi antinfortunistici, nell'oggettistica d'arredamento o architettonica in genere;
- *Polivinilcloruro (PVC)*: materia plastica più utilizzata per via delle sue proprietà meccaniche. Lo si usa per serramenti, giocattoli, contenitori, grondaie, etc.;
- *Poliacrilonitrile-butadiene-stirene (ABS)*: ottime proprietà meccaniche, risulta duro e resistente, offrendo una buona resistenza agli urti, utilizzato per creare giocattoli, articoli di consumo, telefoni, caschi protettivi, pannelli interni di portiere, montanti, componenti di sedili, griglie, etc.;
- *Poliacrilonitrile (PAN)*: l'uso di questo polimero è principalmente rivolto alla produzione di fibre sintetiche resistenti all'invecchiamento, ad agenti fisici e chimici e caratterizzati da notevoli proprietà meccaniche;
- *Polietilentereftalato (PET)*: è una resina termoplastica adatta al contatto alimentare, facente parte della famiglia dei poliesteri.

1.2. Acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS)

L'ABS nasce negli anni '50 con lo scopo di creare un materiale che sommi le caratteristiche peculiari di ciascuno dei tre monomeri: l'*acrilonitrile*, la *gomma butadienica* e lo *stirene*.

ABS sta infatti per *acrilonitrile-butadiene-stirene*:

- *Acrilonitrile*: monomero sintetico prodotto da propilene e ammoniaca. Questo componente contribuisce alla resistenza chimica dell'ABS e alla stabilità al calore;
- *Butadiene*: realizzato come sottoprodotto della produzione di etilene. Questo componente offre tenacità e resistenza agli urti al polimero ABS;
- *Stirene*: prodotto per deidrogenazione dell'etilbenzene. Fornisce rigidità e lavorabilità alla plastica ABS.

La struttura dei tre componenti può essere osservata nella figura 1.1 sottostante:

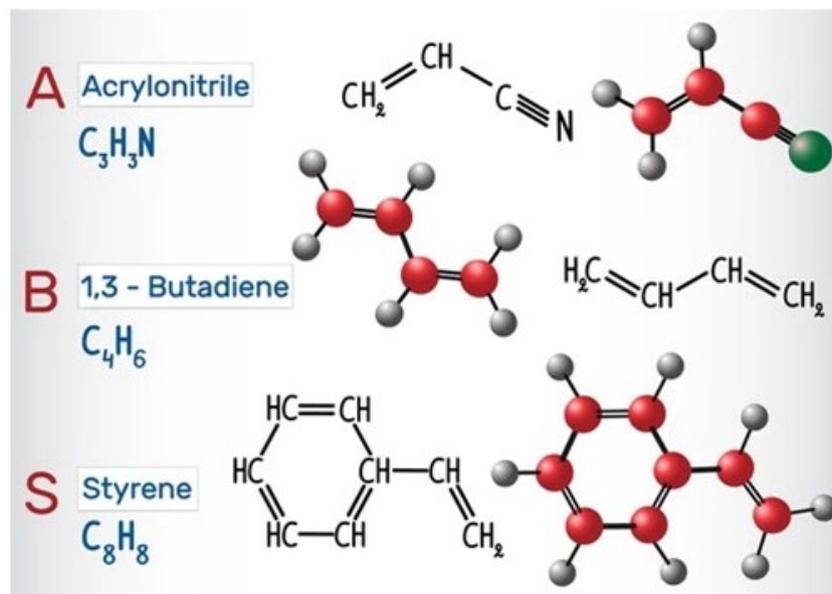


Figura 1.1 – Struttura dei tre monomeri principali che compongono l'ABS.

Le proporzioni possono variare dal 15 al 35% di acrilonitrile, dal 5 al 30 % di butadiene e dal 40 al 60% di stirene. Il risultato è una lunga catena di polibutadiene incrociata con catene più corte di poli (stirene-co-acrilonitrile). La formula chimica dell'acrilonitrile-butadiene-stirene è $C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N$ (figura 1.2).

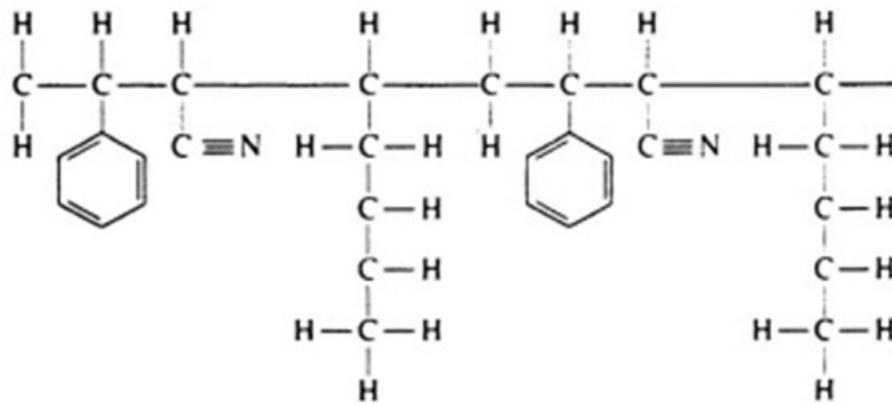


Figura 1.2 – Struttura molecolare dell'acrilonitrile-butadiene-stirene.

1.2.1. Proprietà

L'acrilonitrile-butadiene-stirene presenta un'ampia finestra di elaborazione e può essere lavorato sulla maggior parte dei macchinari standard. Può essere stampato ad iniezione, soffiato o estruso. Ha una bassa temperatura di fusione che lo rende particolarmente adatto per l'elaborazione mediante stampa 3D.

La plastica ABS è un materiale biocompatibile, riciclabile al 100%, atossico ed innocuo. Non ha agenti cancerogeni e non sono noti effetti avversi sulla salute correlati alla sua esposizione. Inoltre, l'ABS riciclato può essere miscelato con materiale vergine per produrre prodotti a costi inferiori preservando l'alta qualità.

L'ABS è un materiale di scelta ideale per varie applicazioni strutturali, grazie alle sue diverse proprietà fisiche come:

- Alta rigidità;
- Buona resistenza agli urti, anche a basse temperature;
- Buone proprietà isolanti;
- Buona saldabilità;
- Buona resistenza all'abrasione e alla deformazione;
- Elevata stabilità dimensionale, ovvero meccanicamente forte e stabile nel tempo;
- Elevata luminosità superficiale ed eccellente aspetto superficiale.

L'ABS mostra eccellenti proprietà meccaniche, è duro e resistente in natura e quindi offre una buona resistenza agli urti ed offre un elevato grado di qualità superficiale. Oltre a queste caratteristiche, l'acrilonitrile-butadiene-stirene presenta buone proprietà di isolamento elettrico. L'ABS viene prontamente modificato sia dall'aggiunta di additivi (come stabilizzatori di calore, stabilizzanti per idrolisi, lubrificanti, stabilizzanti UV, etc.) che dalla variazione del rapporto dei tre monomeri di acrilonitrile, butadiene e stirene. Vengono utilizzati in qualità non rinforzate e rinforzate per aumentare le proprietà specifiche del materiale. Per quanto riguarda le proprietà chimiche, l'ABS è in grado di resistere agli acidi acquosi, agli alcali, agli alcoli, agli oli animali, vegetali e minerali, ma subisce l'attacco degli acidi solforico e nitrico concentrati ed è solubile negli esteri, nei chetoni e negli idrocarburi aromatici. L'ABS può essere usato, in generale, nella fascia di temperature da -20°C a $+80^{\circ}\text{C}$, è idrofobico (angolo di contatto = 81.0 ± 0.6) e ha carattere igroscopico a causa della polarità dei gruppi nitrile.

Pertanto, i voti disponibili includono:

- Impatto alto e medio;
- Alta resistenza al calore;
- Elettroplaccabile.

L'ABS presenta però delle limitazioni, quali:

- Scarsa resistenza agli agenti atmosferici;
- I gradi normali si bruciano facilmente e continuano a bruciare una volta rimossa la fiamma;
- Si graffia facilmente;
- Scarsa resistenza ai solventi, in particolare aromatici, chetoni ed esteri;
- Può soffrire di screpolature da stress in presenza di alcuni grassi;
- Bassa rigidità dielettrica;
- Bassa temperatura di servizio continuo.

L'ABS è in qualche modo igroscopico, ovvero ha la capacità di assorbire prontamente le molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante, risultando quindi necessario asciugarlo prima di alcuni processi a base di calore. Esistono vari metodi di saldatura da poter applicare all'ABS, tra cui la tecnica della FSW.

1.2.2. Campo di utilizzo

Grazie alla combinazione delle proprietà meccaniche, tra cui la buona resistenza all'impatto e la tenacità, alla facilità di lavorazione, alla buona resistenza alle sostanze chimiche e al basso costo, l'ABS presenta numerose applicazioni in particolare nel settore automobilistico, ma anche nel settore degli elettrodomestici, dell'elettronica, dell'edilizia e delle costruzioni, dei trasporti e molti altri. Nel settore automobilistico l'ABS costituisce il materiale di base per la realizzazione di pannelli interni di portiere, plance, componenti di sedili, pannelli degli strumenti e alloggiamenti di specchi. Negli ultimi anni l'ABS, convenzionalmente stampato ad iniezione o per estrusione nel caso di film o lastre, ha acquisito ancor maggior interesse in quanto risulta essere il materiale più utilizzato nella tecnologia FDM.

1.2.3. Metodi di produzione

La formazione di prodotti in ABS può avvenire secondo vari processi:

- *Formatura per estrusione:* viene adottata per la produzione di profili, film, fibre, fogli, tavole e tubi in policarbonato, polimetilmetacrilato, cloruro di polivinile o polietilene. La resina, preventivamente riscaldata, viene fatta passare sotto pressione attraverso una filiera (sagomata in ragione del profilo da ottenere) e prontamente raffreddata all'uscita dalla macchina, in modo da farle conservare la sagoma acquisita.
- *Formatura per iniezione:* è il metodo più utilizzato, mediante il quale la resina in forma granulare viene riscaldata, iniettata dentro uno stampo sagomato in ragione della forma che dovrà assumere il prodotto e raffreddata per renderla solida. Con questo procedimento è possibile unire numerosi componenti di plastica mediante accoppiamento geometrico.

- *Formatura per stampa 3D*: si presenta sotto forma di un lungo filamento avvolto intorno a una bobina. Gli oggetti stampati con ABS vantano una resistenza, flessibilità e durata leggermente superiori. È un ottimo materiale per la prototipazione e può essere facilmente lavorato, levigato, incollato e verniciato.

Capitolo 2 – Additive manufacturing

2.1. Generalità

Le richieste sempre più complesse da parte dei progettisti hanno spinto i tecnologi ad approcciarsi sempre più alla rivoluzione dell'*additive manufacturing*. Quest'ultima si distingue dalle tradizionali tecnologie di lavorazione perché non asporta materiale dal grezzo ma ottiene particolari tridimensionali molto complessi attraverso il deposito progressivo di strati di materiale.

L'*additive manufacturing* è un termine coniato per racchiudere i concetti di:

- *rapid prototyping*: insieme di tecniche industriali volte alla realizzazione fisica del prototipo, in tempi relativamente brevi, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto;
- *rapid tooling*: tecnica che consente, in tempi molto più rapidi, di realizzare attrezzature per la creazione di prototipi come alternativa allo stampo metallico;
- *rapid manufacturing*: si intende la produzione rapida di prodotti personalizzati per il cliente. A differenza del *rapid prototyping*, con il *rapid manufacturing* non viene realizzato alcun modello, bensì prodotti finali per l'utilizzo in condizioni reali.

Questa famiglia di tecnologie si basano sul principio di funzionamento della stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo l'asse Z, ovvero verso l'alto, al fine di ottenere un oggetto tridimensionale. Il processo di produzione additiva ha come input la realizzazione del modello 3D dell'oggetto e a seguire un processo semi-automatico di conversione del file in formato STL. Attraverso software di modellazione si prevede la scomposizione dell'oggetto in strati, definiti *layer*, stampabili dalle stampanti 3D. Avviene a questo punto il processo di stampa e, a seconda delle finalità d'uso, delle attività post-produzione se necessario, per ottenere adeguati livelli di finitura e proprietà meccaniche del manufatto realizzato [3].

Esistono differenti tecnologie di additive manufacturing:

- Stampa 3D (*Binder Jetting/Inkjet Printing*)
- FDM (*Fused Deposition Modeling*) o FFF (*Fusion Filament Fabrication*)
- Fotopolimero a getti (*Jetted Photopolymer*)
- LOM (*Laminated Object Manufacturing*)
- PBF (*Power Bed Fusion*)
- *Laser Metal Deposition/Laser Cladding*
- *Digital Light Processing* e Stereolitografia
- *Liquid deposition modeling*

2.2. Tecnica FDM

In questo studio i provini sono stati ricavati attraverso la tecnica FDM. La semplicità, affidabilità e convenienza di questo processo hanno reso la tecnologia di produzione additiva ampiamente riconosciuta e adottata dall'industria, dal mondo accademico e dai consumatori. Grazie a questa tecnologia, inventata da Scott Trump, fondatore di Stratasys, possono essere realizzati oggetti con qualsiasi geometria e una precisione estremamente accurata, talvolta in strati fino a 0,05 mm. La modellazione a deposizione fusa è uno dei processi di produzione additiva maggiormente utilizzati per la fabbricazione di prototipi e parti funzionali in comuni tecnopolimeri.

I componenti fondamentali di un sistema FDM sono costituiti da un sistema che permette la fusione del filamento e da un sistema di movimentazione lungo i tre assi che consente la costruzione dell'oggetto. Una ruota motrice guida il filamento di materiale termoplastico dalla "cartuccia" all'interno di un sottile tubo, che attraverso una serie di resistenze, porta a fusione il filamento che viene estruso mediante un ugello, il quale presenta una testa di dimensioni caratteristiche per ogni materiale (figura 2.1).

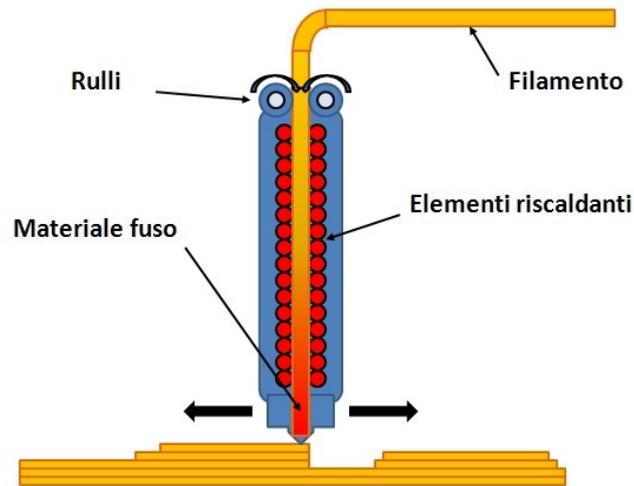


Figura 2.1 – Principio di funzionamento della tecnica FDM.

L'ugello è provvisto di un meccanismo che consente di interrompere e riprendere il flusso di materiale fuso. Il materiale estruso viene depositato su una piattaforma in direzione X-Y e un pistone muove la piattaforma lungo la direzione Z. Un secondo estrusore consente la deposizione di un materiale di supporto, diverso dal materiale costituente l'oggetto di interesse, generalmente PLA (poliacidolattico). L'intero apparato è contenuto all'interno di una camera riscaldata al fine di ridurre l'energia necessaria alla fusione del filamento all'interno dell'ugello.

Il processo si basa sull'estrusione di resina termoplastica malleabile in uno stato semi-solido depositata, attraverso un estrusore, su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza. Sfrutta il materiale di supporto per evitare il collasso della struttura, la deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la fabbricazione dal basso verso l'alto. Facendo riferimento alla figura 2.2 si può osservare come nella modellazione a deposizione fusa un filamento *a)* di materiale plastico è spinto verso una testina mobile riscaldata *b)* che fonde ed estrude il filamento depositandolo, strato dopo strato, nella forma desiderata *c)*. Una piattaforma mobile *e)* si sposta dopo che ogni strato è stato depositato. Per questo tipo di tecnologia di stampa è necessario aggiungere al modello delle strutture temporanee di sostegno verticali *d)* per sorreggere le parti sporgenti.

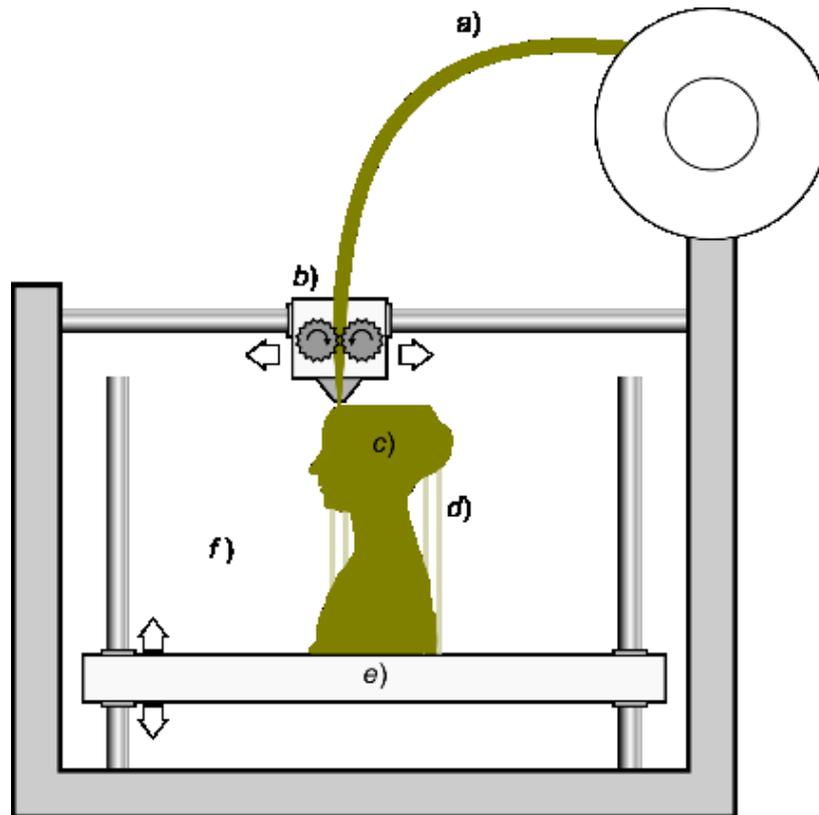


Figura 2.2 – Rappresentazione schematica del processo di stampa 3D attraverso tecnica FDM.

I vantaggi di questa tecnica sono ben visibili nella diffusione quasi casalinga delle stampanti 3D. Il processo risulta essere molto pulito in quanto non lascia scorie, polvere o liquidi ed è accompagnata dal relativo basso costo, dalla facilità di impiego e dalle minori dimensioni delle strumentazioni. L'unico aspetto ancora da migliorare risulta essere la qualità del prodotto ottenuto attraverso questa tecnica, in quanto risulta essere inferiore a quella ottenibile con altre tecniche sia di prototipazione rapida che quelle tradizionali. Nella figura 2.3 è rappresentato un particolare modello di stampante 3D chiamata *3Drag* di *Futura Elettronica*.



Figura 2.3 – Modello di stampante 3D 3Drag di Futura Elettronica.

2.3. Campo di utilizzo

La stampa 3D viene utilizzata comunemente nella visualizzazione dei modelli, nella prototipazione/CAD, nella colata dei metalli, nell'architettura, nell'educazione, nella tecnica geospaziale, nella sanità e nell'intrattenimento/vendita al dettaglio. Negli ultimi tempi però questa tecnologia ha iniziato a prendere campo in molti altri settori in quanto presenta un'elevata efficienza.

Gli ambiti nel quale la stampa 3D viene utilizzata sono:

- *Utilizzo casalingo*: queste stampanti soddisfano le più disparate esigenze, da quelle puramente didattiche o hobbistiche;
- *Utilizzo alimentare*: si è dimostrata sin dalla sua prima evoluzione molto interessata al settore alimentare tanto che negli Stati Uniti sono già stati aperti alcuni ristoranti dimostrativi che preparano cibo solo mediante l'utilizzo di stampanti 3D;
- *Utilizzo edilizio*: si stanno testando materiali e stampanti 3D interamente indirizzate al settore edilizio/architettonico, riuscendo però a stampare fino ad ora solo pietra ed argilla;
- *Utilizzo medico*: è possibile “digitalizzare” il paziente tramite le tecnologie tradizionali e modellare al computer una protesi o una parte di organo perfettamente su misura con costi e tempi ridotti;
- *Utilizzo nello spazio*: per portare la stampa 3D nello spazio e poter stampare autonomamente pezzi di ricambio metallici, contenendo i costi e minimizzando gli sprechi.

Capitolo 3 – Friction Stir Welding

3.1. Generalità

La saldatura a frizione (FSW) è una tecnica avanzata per la giunzione di materiali in funzionamento continuo. Questa tecnologia nell'ultimo decennio ha rappresentato una metodologia vincente per svariate applicazioni, come quelle in campo automobilistico e spaziale, che devono essere fondamentalmente caratterizzate da elevate duttilità e allo stesso tempo da elevati valori di resistenza per garantire elevate prestazioni. Questa innovativa tecnica di saldatura riduce in maniera significativa la presenza di tensioni residue e distorsioni nei giunti rispetto ai processi di saldatura tradizionali; inoltre, considerando che il processo avviene allo stato solido, risultano assenti le microstrutture di risolidificazione. Bisogna oltretutto considerare che i metodi più tradizionali necessitano di un'attenta preparazione delle superfici per evitare l'innescò della corrosione a causa della presenza di ossidi, mentre la FSW consente di saldare parti parzialmente ossidate sulle superfici senza inconveniente per il processo, evitando quindi le procedure di pulitura e sgrassaggio prima di effettuare la saldatura.

3.1.1. Principio di funzionamento

La tecnica FSW sfrutta l'azione di un utensile rotante che, nelle saldature di testa, viene affondato nelle piastre da saldare e contemporaneamente fatto traslare lungo la linea di saldatura. Il materiale in prossimità dell'utensile subisce forti deformazioni plastiche che consentono la formazione del giunto. L'utensile svolge due funzioni principali: *riscaldamento del pezzo in lavorazione e movimento del materiale per produrre la giunzione*. Il riscaldamento avviene per attrito tra l'utensile ed il pezzo in lavorazione e deformazione plastica del pezzo. Il riscaldamento localizzato ammorbidisce il materiale attorno al perno e la combinazione di rotazione e traslazione dell'utensile porta al movimento

del materiale dalla parte anteriore del perno alla parte posteriore del perno. Come risultato di questo processo viene prodotto un giunto allo "stato solido".

Si distinguono quattro fasi del processo (figura 3.1):

- a) l'utensile, messo in rotazione, si appoggia sulle parti da saldare in corrispondenza della linea di contatto dei lembi;
- b) sotto la spinta applicata dalla macchina, l'estremità inferiore dell'utensile, detta punta o *pin*, penetra nella zona plasticizzata fino a che la spalla (ovvero la parte a sezione maggiore, sovrastante il pin, detta anche *shoulder*) tocca la superficie del materiale da saldare;
- c) l'utensile, mantenendo il suo moto di rotazione, trasla lungo la linea di contatto dei lembi; il materiale viene trascinato in rotazione da un lembo all'altro e viene trasferito dietro all'utensile, creando la tipica configurazione del materiale ad "anelli di cipolla", chiamata *onion rings*;
- d) alla fine del giunto, l'utensile viene sollevato e lascia un foro non passante delle stesse dimensioni del pin.

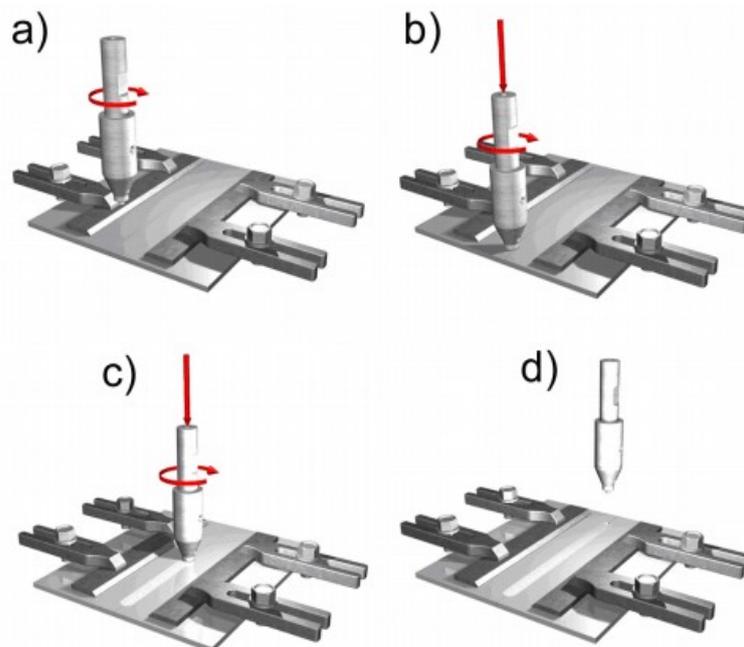


Figura 3.1 – Rappresentazione schematica delle quattro fasi principali che caratterizzano il processo di FSW.

A causa delle caratteristiche geometriche dell'utensile, il movimento del materiale intorno al perno può essere piuttosto complesso. Durante il processo di FSW, il materiale subisce un'intensa deformazione plastica ad alta temperatura, con conseguente generazione di grani ricristallizzati fini ed equiassiali. La microstruttura fine delle saldature a frizione produce buone proprietà meccaniche. La FSW è considerata lo sviluppo più significativo nell'ambito delle giunzioni in un decennio ed è una tecnologia "verde" per la sua efficienza energetica, il rispetto dell'ambiente e la versatilità. Rispetto ai metodi di saldatura convenzionali, la FSW consuma molta meno energia. I potenziali vantaggi della FSW rispetto alle tecniche di saldatura per fabbricazione esistenti includono: maggiore produttività, specialmente per le sezioni più spesse, la possibilità di saldatura in continuo, la possibilità di saldare quasi tutti i termoplastici, il semplice design del giunto, saldature praticamente senza l'utilizzo di calore dall'esterno e il fatto che si tratta di un processo automatizzato, con conseguente miglioramento della qualità, ed una riduzione dei difetti di saldatura.

Si possono definire tre tipologie di benefici differenti che presenta la FSW rispetto alla tradizionale tecnica di saldatura:

- *Benefici metallurgici:* processo in fase solida, bassa distorsione del pezzo, buona stabilità dimensionale e ripetibilità, nessuna perdita di elementi leganti, eccellenti proprietà metallurgiche nell'area del giunto, microstruttura fine e assenza di crepe;
- *Benefici ambientali:* nessun gas di protezione richiesto, nessuna pulizia della superficie richiesta, elimina gli sprechi di macinazione, elimina i solventi necessari per lo sgrassaggio e risparmio di materiali di consumo, come tappeti, fili o altri gas;
- *Benefici energetici:* un migliore utilizzo dei materiali consente la riduzione del peso, sfrutta solo il 2,5% dell'energia necessaria per una saldatura laser e diminuzione del consumo di carburante in aeromobili leggeri, applicazioni automobilistiche e navali.

Ci sono molte applicazioni in questo settore, soprattutto ai giorni d'oggi, in cui si presenta una particolare attenzione per l'ambiente [6]. In particolare:

- *Cantieristica navale:* oggi la FSW è la tecnologia maggiormente impiegata nelle costruzioni navali. Negli ultimi anni, i produttori di alluminio hanno compiuto enormi progressi nello sviluppo di leghe di alluminio migliorate specificatamente per l'impiego nelle industrie navali. L'impiego della FSW porta miglioramenti nelle proprietà di corrosione e l'aumento della resistenza a fatica. Questo sviluppo, unito alle caratteristiche di formabilità, piegatura, taglio e saldatura, almeno pari a quello della lega, è molto allettante per i produttori che ambiscono naturalmente a produrre navi in alluminio sempre più grandi e più veloci;
- *Aerospaziale:* Boeing applica la FSW agli ELV (Expendable Launch Vehicles) Delta II e Delta IV, in particolare il primo di questi con un modulo saldato a frizione che è stato lanciato nel 1999. Il processo è stato utilizzato anche per il serbatoio esterno dello Space Shuttle e, più recentemente, è stato impiegato anche per Ares I, per l'Orion Crew Vehicle alla NASA e per i missili Falcon 1 e Falcon 9 di SpaceX. Anche i pannelli per il pavimento degli aerei militari Airbus A400M e parti della fusoliera dell'Airbus A380 sono stati giuntati con questo tipo saldatura. Automation GmbH utilizza il sistema Delta NFS per le macchine per produrre le rampe di lancio sviluppate per il settore aerospaziale e altre applicazioni industriali;
- *Settore automobilistico:* poiché l'industria automobilistica tende ad aumentare l'uso dell'alluminio, il processo di saldatura ad attrito è largamente applicato in quanto offre molti potenziali vantaggi per la giunzione di tale materiale. Contrariamente alla maggior parte degli altri processi di giunzione, esso risulta essere più robusto, essendo più capace di gestire la variazione di produzione di grandi volumi. Questo tipo di processo offre proprietà meccaniche migliori rispetto ad altri processi di giunzione;
- *Robotica:* Kuka Robotics ha adattato il suo robot per carichi pesanti per la saldatura a frizione mediante lo strumento Delta NFS. Il sistema ha fatto la sua prima apparizione pubblica nel novembre 2012;
- *Personal Computers:* Apple ha impiegato la saldatura FSW sull'iMac 2012 al fine di unire efficacemente la base al retro del device.

Le due piastre sottoposte a saldatura possono essere distinte in:

- *Advancing side*: piastra nella quale la componente della velocità tangente alla traiettoria circolare dell'utensile risulta essere diretta nella stessa direzione di avanzamento;
- *Retreating side*: piastra nella quale la componente della velocità tangente alla traiettoria circolare dell'utensile risulta essere diretta in direzione opposta alla direzione di avanzamento.

È chiaro quindi che nella *Retreating side* la temperatura raggiunta risulterà essere inferiore, comportando di conseguenza distinzioni nella struttura finale. Inoltre, poiché la direzione della componente tangenziale dell'utensile e la sua traiettoria sono le stesse, questo provoca la nascita di un maggiore attrito. Al contrario, verso il lato dove si ritira, il materiale risulta più morbido, in quanto muovendosi genera meno calore. Inoltre, poiché la componente tangenziale e le velocità di traslazione sono opposte, ciò provoca minori forze di attrito. Questi fattori generano un aumento della temperatura sia nell'*Advancing side* che nella *Retreating side*.

Anche se la FSW fornisce costantemente saldature di alta qualità, per raggiungere questo obiettivo è necessario un uso corretto del processo e il controllo di una serie di parametri. Un fattore chiave per garantire la qualità della saldatura è l'uso di uno strumento appropriato e il movimento di saldatura. Per poter effettuare il processo di saldatura è necessario l'impiego di un utensile rotante non consumabile, il quale viene prodotto con materiali che possiedono proprietà superiori alle alte temperature rispetto a quelle dei materiali da unire. Le saldature a frizione presentano tipicamente tre regioni microstrutturali principali (figura 3.2):

- una pepita di saldatura;
- una zona termomeccanicamente alterata (TMAZ);
- una zona termicamente alterata (HAZ).

Tecnicamente, la pepita di saldatura (o nocciolo di saldatura) e il TMAZ sono entrambe "zone termomeccanicamente colpite", ma sono considerate separatamente per mostrare caratteristiche microstrutturali distinte. La pepita di saldatura subisce una ricristallizzazione dinamica, mentre il TMAZ no. L'estensione e la composizione microstrutturale di queste zone dipendono dal materiale e dalle condizioni di lavorazione [4].

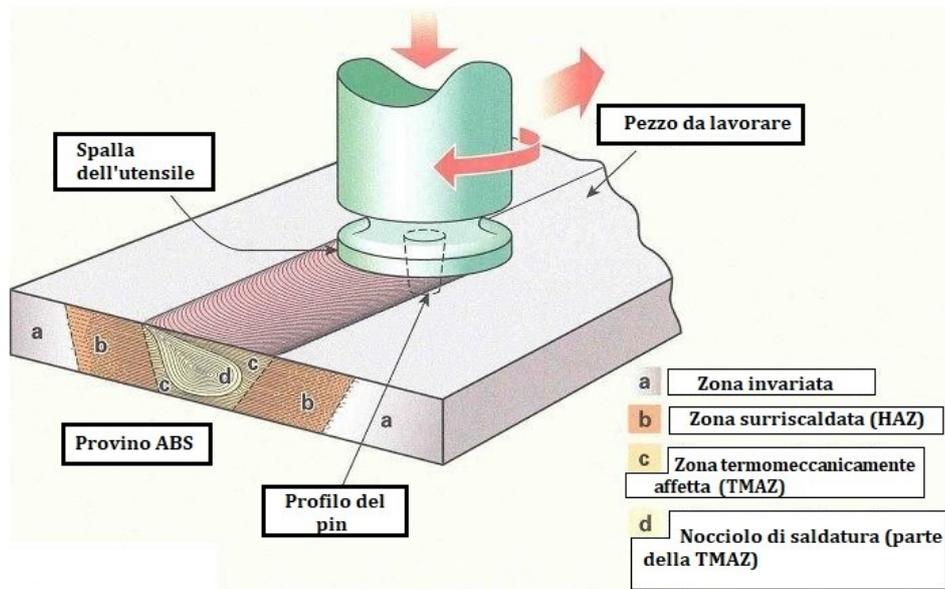


Figura 3.2 – Zone di materiale termicamente interessate durante il processo di FSW.

3.1.2. Parametri

Per la FSW, due parametri sono molto importanti: la *velocità di rotazione dell'utensile* “ ω ”, definito in giri al minuti (*rpm*) applicata in senso orario o antiorario, e la *velocità di traslazione dell'utensile* “ v ”, definito in millimetri al minuto (*mm/min*), applicata lungo la linea di giunzione. La rotazione dell'utensile provoca il riscaldamento e la miscelazione del materiale attorno al perno rotante e la traslazione dell'utensile sposta il materiale riscaldato dalla parte anteriore alla parte posteriore del perno, portando a termine il processo di saldatura. Velocità di rotazione dell'utensile più elevate generano una temperatura più elevata a causa del maggiore riscaldamento per attrito e provocano una miscelazione più intensa del materiale, come verrà discusso più avanti. Tuttavia, va notato che l'accoppiamento per attrito della superficie dell'utensile con il pezzo da saldare regolerà il riscaldamento. Di conseguenza, non ci si aspetta un aumento monotono del riscaldamento con l'aumento della velocità di rotazione dell'utensile, poiché il coefficiente di attrito all'interfaccia cambierà con l'aumento della velocità di rotazione dell'utensile.

Oltre alla velocità di rotazione dell'utensile e alla velocità di traslazione, un altro importante parametro di processo è *l'angolo di inclinazione del mandrino o dell'utensile* rispetto alla superficie del pezzo. Un'adeguata inclinazione del mandrino verso la direzione di

trascinamento assicura che la spalla dell'utensile trattenga il materiale riscaldato per mezzo di un perno filettato e sposti il materiale in modo efficiente dalla parte anteriore alla parte posteriore del perno. Inoltre, anche la profondità di inserimento del perno nei pezzi in lavorazione, definito generalmente come *affondamento*, è importante per produrre saldature sane con spalle dell'utensile lisce. La profondità di inserimento del perno è associata all'altezza del perno stesso. Quando la profondità di inserimento è troppo bassa, la spalla dell'utensile non entra in contatto con la superficie originale del pezzo. Pertanto, la spalla rotante non è in grado di spostare il materiale riscaldato in modo efficiente dalla parte anteriore alla parte posteriore del perno, con conseguente generazione di saldature con canale interno o scanalatura superficiale. Quando la profondità di inserimento è troppo profonda, la spalla dell'utensile si immerge nel pezzo creando un eccesso di bava. In questo caso, si produce una saldatura significativamente concava che porta ad un assottigliamento locale delle piastre saldate.

3.2. Attrezzatura

3.2.1. Utensile

L'utensile utilizzato nel processo di FSW è costituito principalmente da una spalla per riscaldare il materiale per attrito e da un perno, definito *pin*, per mescolare i componenti (figura 3.3). Queste due componenti sono elementi essenziali per garantire una buona miscelazione del materiale ed una saldatura senza difetti.

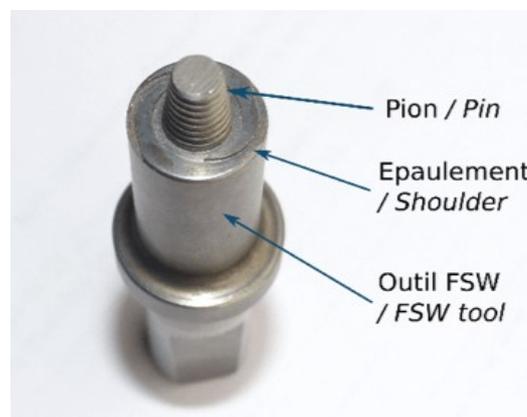


Figura 3.3 – Componenti principali di un utensile utilizzato per il processo di FSW [7].

La spalla durante il processo è posizionata sulla superficie delle parti da saldare, generando il calore di attrito necessario per "ammorbidire" i pezzi. Il fenomeno metallurgico può essere considerato vicino a quello dell'estrusione.

Inoltre, a causa della sua forma e delle sue dimensioni, la spalla confina il materiale e gli impedisce di uscire dall'area di saldatura. Il perno si immerge nelle parti saldate e grazie alla sua forma consente sia di riscaldare il materiale per effetto di taglio, sia di assicurare la miscelazione del materiale nonostante la presenza di ossidi sulle parti. Pertanto, la scelta di un utensile adatto ai materiali associati a parametri di saldatura qualificati chiude il materiale dietro il percorso dell'utensile, frantumando l'ossido e dà una saldatura ineccepibile.

La geometria degli utensili è l'aspetto più influente nello sviluppo del processo. La geometria dell'utensile gioca un ruolo critico nel flusso dei materiali e a sua volta governa la velocità di traslazione alla quale FSW può essere condotto. L'utensile ha due funzioni principali: *riscaldamento localizzato* e *flusso di materiale*. Nella fase iniziale di immersione dell'utensile, il riscaldamento dipende principalmente dall'attrito tra il perno ed il pezzo in lavorazione, mentre alcuni riscaldamenti aggiuntivi dipendono dalla deformazione del materiale. L'utensile viene immerso fino a quando la spalla non tocca il pezzo in lavorazione. L'attrito tra spalla e pezzo risulta essere il fenomeno principale del riscaldamento. Ovviamente, la dimensione relativa del perno e dello spallamento risultano essere importanti, mentre le altre caratteristiche di progettazione non sono critiche. La spalla fornisce anche il confinamento per il volume riscaldato del materiale. La seconda funzione dell'utensile è quella di "mescolare" e "muovere" il materiale. L'uniformità della microstruttura e delle proprietà, così come i carichi di processo, sono regolati dal design dell'utensile. Nei casi più generali si utilizza una spalla concava e pin cilindrici filettati.

Con la crescente esperienza ed un certo miglioramento nella comprensione del flusso del materiale, la geometria dell'utensile si è evoluta in modo significativo. Sono state aggiunte caratteristiche complesse per alterare il flusso del materiale, la miscelazione e ridurre i carichi di processo. Per esempio, gli utensili *Whorl* (figura 3.4) e *MX Triflute* (figura 3.5) sviluppati da *TWI* hanno dimostrato che i perni di entrambi gli utensili spostano meno materiale rispetto ad un utensile cilindrico dello stesso diametro della radice.

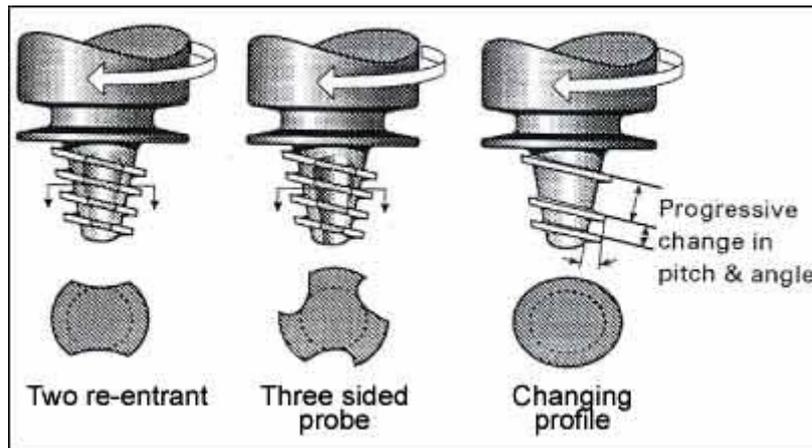


Figura 3.4 – Variazioni delle tipologie di utensile Whorl.

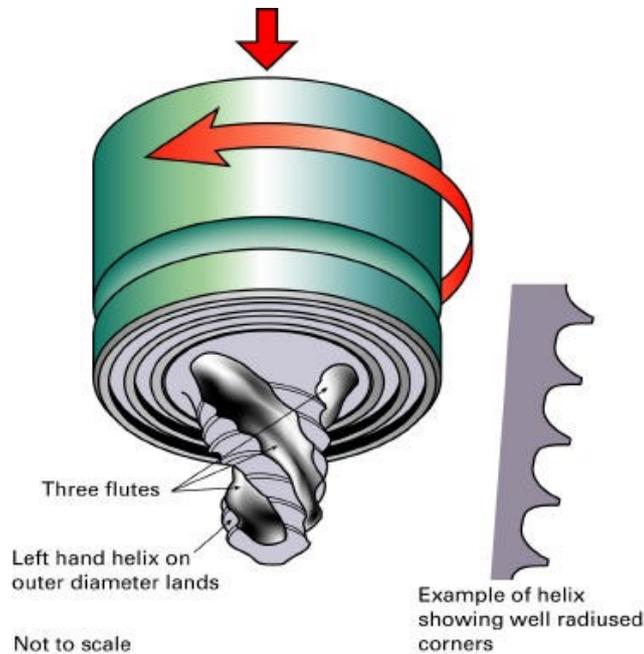


Figura 3.5 – Utensile MX Triflute.

In genere, il *Whorl* riduce il volume spostato di circa il 60%, mentre l'*MX Triflute* riduce il volume spostato di circa il 70%. Si ritiene che entrambi gli utensili presentino delle caratteristiche di progettazione favorevoli, in quanto:

- riducono la forza di saldatura;
- permettono un flusso di materiale plastificato più semplice;
- aumentano l'interfaccia tra il perno e il materiale plastificato, facendo accrescere così la generazione di calore.

Da recenti studi si è dimostrato che il fattore principale che determina la superiorità dei perni a spirale rispetto ai perni cilindrici convenzionali è il rapporto tra il volume spazzato durante la rotazione e il volume del perno stesso, cioè un rapporto tra il "volume dinamico" e "il volume statico" che è importante per fornire un adeguato percorso di flusso. Tipicamente, 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*. 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. Inoltre, per le saldature a giro, la larghezza dell'interfaccia di saldatura e l'angolo in cui la tacca incontra il bordo della saldatura è importante anche per le applicazioni in cui la fatica è la preoccupazione principale.

Recentemente, sono state sviluppate due nuove geometrie di perni: *Flared-Triflute* (figura 3.6), con maggiore svasatura, e *A-skew* (figura 3.7), con l'asse del perno leggermente inclinato rispetto all'asse del mandrino della macchina per migliorare la qualità della saldatura a giro [5].

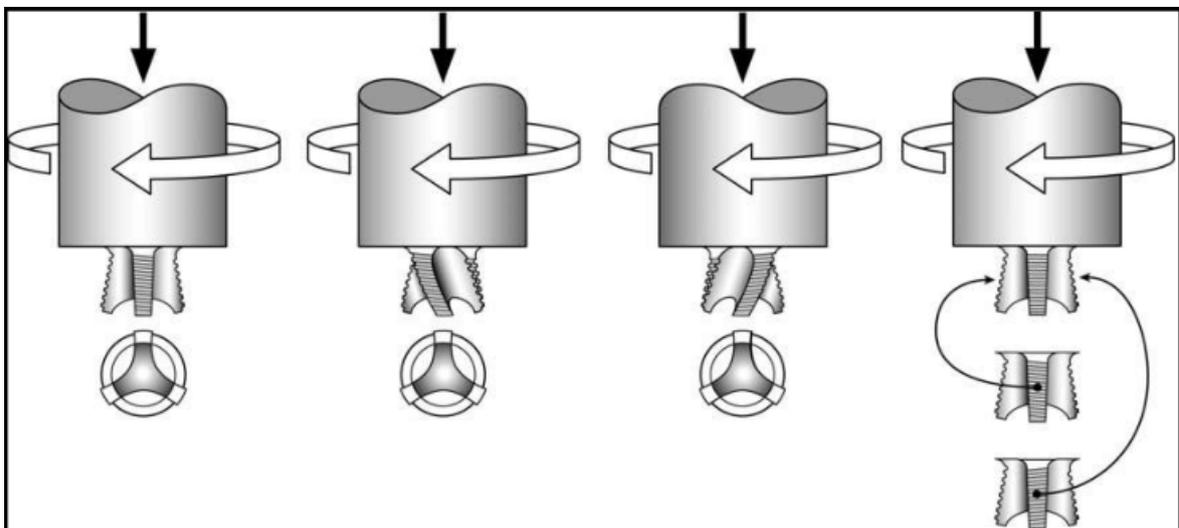


Figura 3.6 – Variazioni della struttura di un utensile *Flared-Triflute*.



Figura 3.7 – Utensile *A-skew*.

Si ritiene che le caratteristiche di progettazione del *Flared-Trifute* e dell'*A-skew* siano state sviluppate per migliorare la qualità della saldatura a giro, in quanto:

- aumentano il rapporto tra il volume spazzato e il volume statico del perno, migliorando così il percorso del flusso attorno e sotto il perno;
- allargano la regione di saldatura a causa della svasatura nel perno *Flared-Trifute* e l'azione obliqua nel perno *A-skew*;
- forniscono una migliore azione di miscelazione per la frammentazione dell'ossido e la dispersione all'interfaccia di saldatura;
- forniscono un'azione di forgiatura orbitale alla radice della saldatura a causa dell'azione obliqua, migliorando la qualità della saldatura in questa regione.

Rispetto al perno filettato convenzionale, risulta che i perni *Flared-Trifute* e *A-skew* forniscano:

- un miglioramento di oltre il 100% della velocità di saldatura;
- una riduzione di circa il 20% della forza assiale;
- un significativo ampliamento della regione di saldatura, ovvero 190-195% dello spessore della piastra per i perni *Flared-Trifute* e *A-skew*, 110% per il perno filettato convenzionale;
- una riduzione dell'assottigliamento della piastra superiore di un fattore >4 .

Inoltre, il perno *Flared-Trifute* ha ridotto significativamente l'angolo di ribaltamento dell'intaglio in corrispondenza dell'interfaccia di saldatura, mentre il perno *A-skew* ha prodotto una leggera flessione nelle regioni esterne della piastra sovrapposta, utili per migliorare le proprietà dei giunti saldati attraverso FSW.

3.2.2. Sistema di bloccaggio

A causa delle notevoli forze che si sviluppano durante il processo di saldatura, risulta essere d'obbligo fissare molto rigidamente i pezzi da unire ed utilizzare piastre di sostegno per contenere l'eventuale fuoriuscita del materiale plasticizzato (figura 3.8). Da questo però ne consegue un effetto negativo, ovvero costi elevati sia delle attrezzature utilizzate per il serraggio dei pezzi sia del centro di lavoro.



Figura 3.8 – Sistema di bloccaggio utilizzato per le piastre sottoposte a saldatura durante il processo di FSW.

3.3. Stato attuale della ricerca

La saldatura a frizione (FSW) è stata inventata al *The Welding Institute* (TWI) del Regno Unito nel 1991 come tecnica di giunzione allo stato solido, ed è stata inizialmente applicata alle leghe di alluminio. Per quasi 20 anni questo processo è stato utilizzato in settori ad alto contenuto tecnologico come l'aerospaziale o l'industria automobilistica e in applicazioni

dove è richiesta alta precisione come la microsaldatura. Questa tecnica si basa sul calore d'attrito generato attraverso il contatto tra uno strumento rotante e il pezzo in lavorazione. Le prove effettuate fino ad oggi hanno rivelato che giunti sani con le caratteristiche e l'efficienza desiderate sono fabbricati con una velocità di saldatura di 20 mm/min e una velocità di rotazione di 1600 giri/min, sfruttando un dispositivo riscaldante chiamato *hot shoe* che ha proprio il compito di preriscaldare le piastre così da rendere la saldatura più efficiente, utilizzando una temperatura della scarpa pari a 100 °C [2]. Inoltre, dai risultati dei test di trazione si è riscontrato che l'aggiunta del rinforzo in nanosilice provoca un aumento del 26% della resistenza articolare. Dalle analisi XRD e SEM si è constatato che la saldatura con un numero di passaggi pari a due determina una distribuzione uniforme della nanosilice nella zona trattata che provoca la formazione di una struttura simile al composito che aumenta l'efficienza del giunto fino al 100%. Effettuando una saldatura a doppio lato si eliminano i difetti di saldatura migliorando la resistenza articolare. Se si utilizzasse un utensile a profilo conico, applicando una velocità di rotazione di 900 giri/min, una velocità lineare di 25 mm/min, con una spalla a perno con rapporto di 20/6 e angolo di inclinazione di 2°, questi parametri porterebbero ad ottenere un'efficienza del giunto del 101%. Una maggiore forza assiale fornita dallo strumento migliorato nella progettazione provoca significativi miglioramenti nella resistenza articolare e allungamento.

L'aggiunta di polveri nano-addizionali comportano un netto miglioramento delle proprietà meccaniche del provino saldato. L'utilizzo di nano-tubi in carbonio (CNT) sono stati usati per rinforzare giunti termoplastici diversi realizzati in fogli di polietilene ad alta densità e ABS. Sulla base della conoscenza, l'associazione di particelle di nanosilice per il miglioramento delle proprietà comuni dei fogli di ABS non è stato quasi mai riportato nella letteratura. Il motivo della selezione della nanosilice è il suo alto modulo di elasticità e buona resistenza, nonché combinazione desiderata con ABS. Dopo l'aggiunta di nano polveri, all'utensile è stato aggiunto il pin per comprimere le polveri nel solco e limitare il loro sfogo. Utilizzando lo strumento senza pin, si potrebbe provocare la chiusura della superficie superiore di solchi, impedendone così l'espulsione.

Gli esperimenti presi in considerazione nell'articolo di Reza Bagherian Azhiria et al. [1] possono essere classificati in due principali fasi. Nella prima fase, sono stati condotti una serie di esperimenti effettuando una variazione della velocità di rotazione dell'utensile (800, 1200 e 1600 rpm) e della velocità di traslazione dell'utensile (20, 50 e 80 mm/min). In questa fase sono stati effettuati senza aggiunta di nanosilice 9 esperimenti a passaggio singolo. Successivamente sono stati condotti 9 esperimenti mediante aggiunta di nanosilice. Dopo

aver trovato rotazione ottimale dell'utensile e velocità di traslazione sotto una serie di esperimenti (grafico 3.1), si mira ad osservare l'effetto del numero di passaggi (1, 2 e 3 passaggi) sulla dispersione di nanosilice nella matrice in ABS.

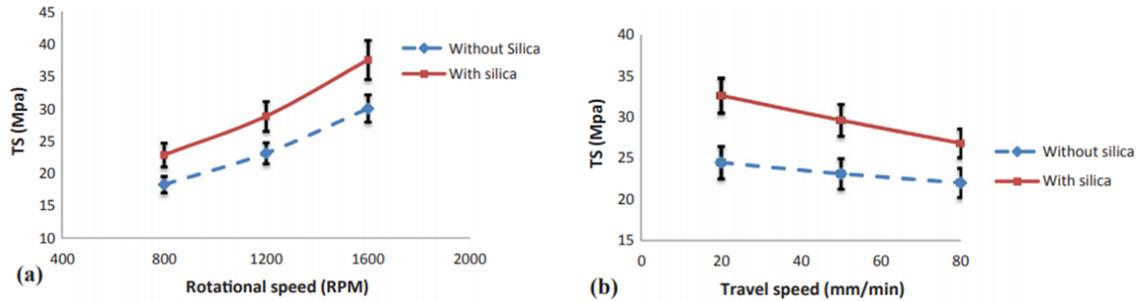


Grafico 3.1 – Andamento della tensione massima in funzione della variazione della velocità di rotazione (a) e della velocità di traslazione dell'utensile (b) in presenza e in assenza di nanosilice su matrice in ABS.

I campioni sono stati sottoposti al processo di FSW variando da 1 a 3 passaggi. Effettuando un solo passaggio, il risultato ottimale si avrà con un angolo di inclinazione del piano di $4,1^\circ$. Quando il numero di passaggi aumenta da 1 a 2, la struttura risulta più uniforme. Tuttavia, quando viene utilizzato un numero di passaggi pari a 3, il nuovo picco si forma a $3,2^\circ$, il che significa che utilizzando il processo di FSW a 3 passaggi si provoca l'agglomerazione della fase composita. Ciò si verifica a causa della degradazione dell'ABS all'aumentare del numero di passaggi che danneggia l'uniformità della struttura. Pertanto, si è concluso che il numero di 2 passaggi risulta essere ottimale come si può osservare nel grafico 3.2.

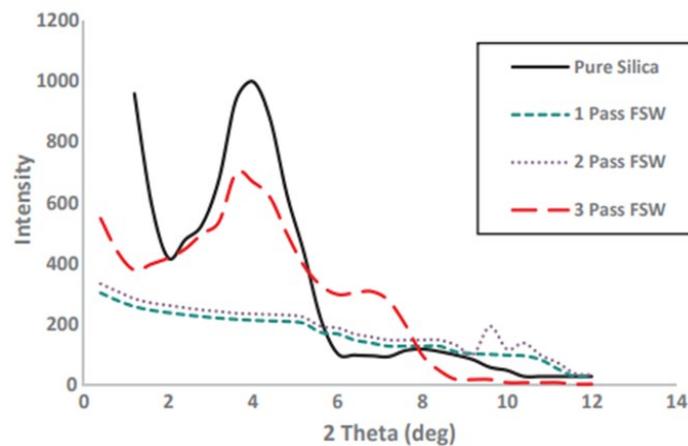


Grafico 3.2 – Variazione dei valori ottimali raggiungibili in relazione all'angolo di inclinazione del piano al variare del numero di passaggi.

I risultati ottenuti possono essere riassunti come segue:

- Indipendentemente dall'aggiunta di nanosilice, la resistenza articolare raggiunge il valore massimo quando la velocità di rotazione dell'utensile è 1600 rpm e la velocità di traslazione dell'utensile è di 20 mm/min. Inoltre, in condizioni simili, l'aggiunta di nanosilice provoca un miglioramento del 25,2% dei valori medi di trazione;
- L'analisi XRD dei campioni ha mostrato che per i campioni rinforzati da particelle di nanosilice, l'applicazione di 1 e 2 passaggi implica la dispersione desiderata di nanosilice nella matrice in ABS. Inoltre, quando il processo viene eseguito a 3 passaggi, a causa di un carico eccessivo meccanico e termico, viene a crearsi un'elevata porosità nella matrice ABS che comporta la distruzione dell'uniformità della dispersione della silice;
- La micrografia SEM della sezione trasversale mostra che con l'aggiunta di silice nella microfibrilla e nella struttura composita si genera una struttura a strati. Questa struttura provoca il miglioramento della resistenza articolare contro il carico di trazione ed aumenta la resistenza. Effettuando due passaggi, la struttura a strati è uniformemente distribuita e causa un ulteriore miglioramento delle proprietà meccaniche;
- Confrontando le curve tensione-deformazione dei campioni fabbricati si evince che l'efficienza congiunta dei campioni senza aggiunta di nanosilice è di circa il 71% rispetto al materiale di base. Tuttavia, mediante l'aggiunta di nanosilice ed eseguendo il processo FSW a due passaggi, la resistenza del giunto è notevolmente migliorata e raggiunge il 98% di efficienza in più rispetto al materiale di base;
- I profili di micro-durezza ottenuti in diverse condizioni mostrano che l'aggiunta di nanosilice provoca un miglioramento significativo in durezza della pepita di saldatura rispetto al metallo base. Questo è dovuto alla formazione di una struttura simile al composito, ovvero polimeri con particelle nanoceramiche, che abbassano il livello di porosità e migliorano la durezza.

Nei grafici 3.3 e 3.4 sottostanti è possibile osservare la variazione della durezza in funzione della distanza dal centro e della resistenza in funzione dell'allungamento dei provini sottoposti a varie condizioni di saldatura, facendo variare il numero di passaggi e con la presenza e l'assenza di nanosilice.

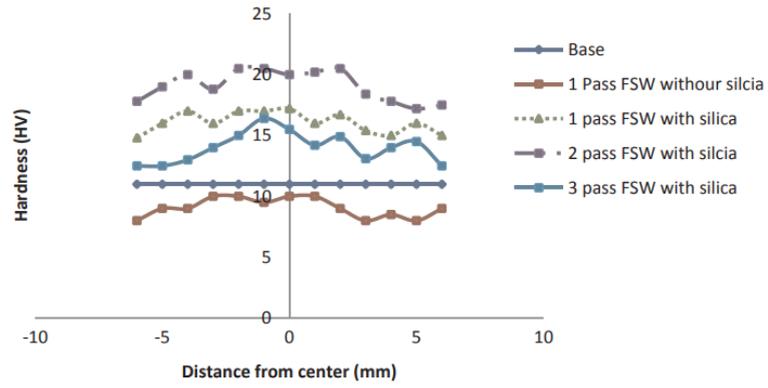


Grafico 3.3 – Confronto della durezza al variare della distanza dal centro in differenti condizioni di saldatura.

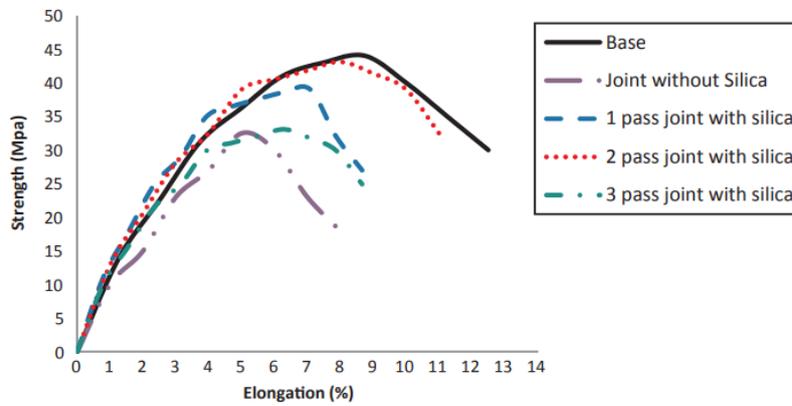


Grafico 3.4 – Confronto delle curve tensione-deformazione nelle varie condizioni di saldatura.

Capitolo 4 – Procedure sperimentali

4.1. Introduzione

Nello studio effettuato si vuole andare ad osservare il comportamento ed i risultati ottenuti a seguito della saldatura allo stato solido su piastre in ABS stampate mediante tecnica FDM verificandone il loro comportamento sottoponendo i provini saldati a prove di trazione e piegatura. L'obiettivo dello studio è quello di isolare gli effetti di ciascun parametro sottoposto a variazione, ovvero di ω , v e *affondamento*.

4.2. Stampante 3D

Come prima cosa sono state realizzate le piastre mediante stampa 3D attraverso la tecnica FDM (Filament Deposition Modeling) in materiale ABS. La stampante utilizzata è una *Stratasys Fortus 250mc*, la quale costruisce pezzi in termoplastica in ogni grado di produzione, offrendo nove scelte di colore. Questo permette ai prototipi realizzati di somigliare fedelmente ai prodotti finiti nell'aspetto e nella durata. La Fortus 250mc presenta un involucro di 254 x 254 x 305 mm e tre spessori di strato (0,178 mm, 0,254 mm e 0,330 mm) ed è alimentata da un software di gestione ed elaborazione dei lavori chiamato *Insight*. Sono state effettuate due metodologie di stampaggio che differiscono nella metodologia di stratificazione del filamento plastico:

- Una prima modalità di stampa consiste nella stratificazione di materiale occupando un'area che corrisponde alla superficie maggiore del provino. La stratificazione si concluderà quando sarà raggiunta un'altezza pari allo spessore del provino, ovvero come in figura 4.1;

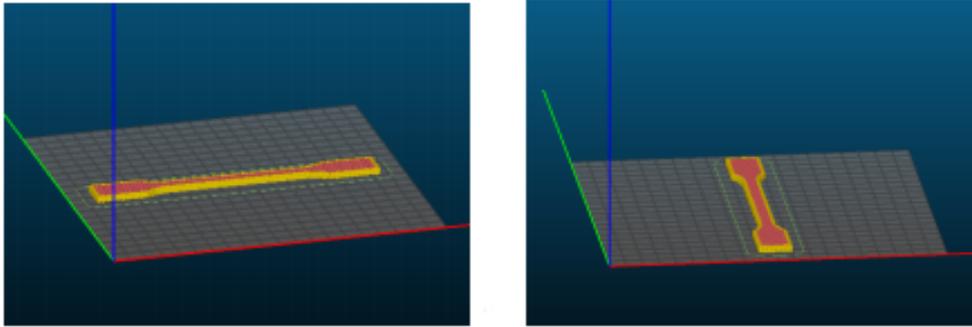


Figura 4.1 – Rappresentazione della prima modalità di stampa.

- Una seconda modalità di stampa consiste invece nella stratificazione di materiale occupando un'area coincidente allo spessore del provino. La stratificazione si concluderà in questo caso quando sarà raggiunta un'altezza pari alla larghezza del provino, ovvero come in figura 4.2.

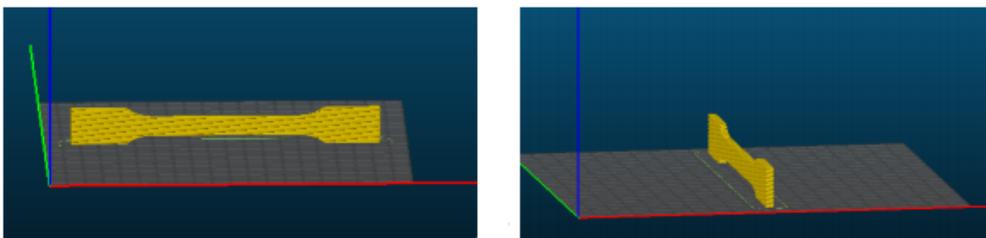


Figura 4.2 – Rappresentazione della seconda modalità di stampa.

I provini ricavati dalle piastre saldate e sottoposte alle prove, di cui si parlerà successivamente, sono stati realizzati con la seconda modalità di stratificazione.

4.3. Processo di FSW

Una volta realizzate le piastre con uno spessore pari a 2 mm attraverso l'utilizzo della stampante 3D, sono state saldate in coppia attraverso la tecnica di saldatura allo stato solido, ovvero attraverso il processo di *Friction Stir Welding*. L'utensile utilizzato per effettuare la prova di saldatura risulta essere *pinless*, ovvero senza pin, l'estremità inferiore dell'utensile (figura 4.3). Dal momento che lo spessore delle lamine è molto ridotto, per eseguire il processo è sufficiente il calore generato dalla pressione che lo *shoulder* strisciando e ruotando esercita sulla superficie superiore delle piastre, senza dover ricorrere al pin, in quanto il suo effetto sarebbe trascurabile. È ovvio che se si fosse lavorato un materiale con

uno spessore maggiore l'utilizzo di un utensile senza pin avrebbe comportato degli svantaggi in quanto, se fosse andato troppo poco in profondità, l'effetto del calore non avrebbe invaso tutto lo spessore, mentre, al caso contrario, se fosse entrato troppo in profondità si sarebbe ottenuto un avvallamento. Non utilizzare il pin nell'esecuzione di un processo è particolarmente conveniente in quanto si evitano anche elevati scarti di materiale e problemi legati all'usura.



Figura 4.3 – Utensile pinless utilizzato per le saldature di questo studio.

Sono state realizzate 10 prove di saldatura utilizzando 5 condizioni differenti ottenute variando i parametri sul quale si basa questo processo, ovvero: la *velocità di rotazione dell'utensile*, la *velocità di avanzamento dell'utensile* e l'*affondamento dell'utensile nel materiale*. I parametri fatti variare per la saldatura sono riassunti nella tabella 4.1 sottostante.

Tabella 4.1 – Parametri utilizzati per ogni condizione di saldatura sottoposta a studio

Condizioni	Velocità di rotazione ω [rpm]	Velocità di traslazione v [mm/min]	Affondamento [mm]
1	800	40	0,4
2	1250	20	0,3
3	1250	20	0,4
4	1250	20	0,5
5	1250	40	0,4

Tutte le saldature sono state ricavate con un valore di *dwelling time* pari a 10 secondi, ovvero l'intervallo di tempo nel quale l'utensile entra a contatto con le piastre ruotando ma senza iniziare a traslare. Questo tempo di permanenza a contatto con le piastre senza traslazione consente di raggiungere temperature più elevate nella zona di saldatura.

4.4. Provini

I provini vengono ricavati a seguito della saldatura grazie ad un apposito macchinario che effettua tagli a getto d'acqua, ottenendone tre tipologie da ogni piastra, come si può osservare in figura 4.4. Si ricavano così i provini A, B e C differenti da un punto di vista logistico e strutturale, 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.

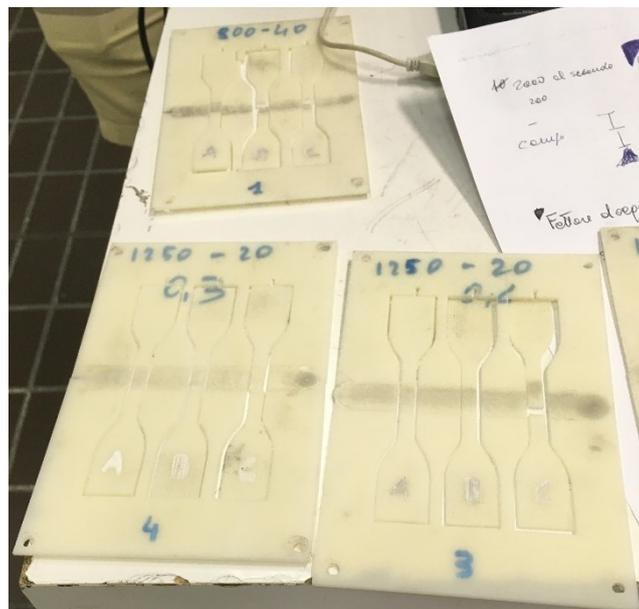


Figura 4.4 – Provini ricavati dal taglio a getto d'acqua ancora situati nelle piastre saldate. In ogni piastra si definiscono i provini A, B e C, rispettivamente da sinistra a destra.

I provini presentano una sezione rettangolare sia per le prove di piegatura che per quelle di trazione. Nel caso della prova di piegatura presentano una geometria rettangolare semplice, mentre i provini dedicati per la prova di trazione sono provvisti di due estremità utili per

effettuare il serraggio alla macchina. Questa tipologia di provini viene infatti denominata "a doppio T" o "a osso di cane".

4.5. Prove

Le prove a cui sono sottoposte le piastrine a seguito della saldatura sono due: prova di trazione e prova di piegatura. Queste due prove consentono di effettuare un confronto tra le varie condizioni investigate affinché si possa avere un comportamento meccanico migliore. La condizione di saldatura ottimale tra quelle effettuate sarà data dal provino che presenterà una maggiore resistenza meccanica a seguito di entrambe le prove.

4.5.1. Prove di trazione

La prova di trazione è una prova di caratterizzazione dei materiali che consiste nel sottoporre un provino di dimensioni standard, definite da una apposita norma UNI, nel nostro caso ISO 527 o ASTM D638, di un materiale in esame sottoposto ad un carico F monoassiale inizialmente di modulo nullo che viene incrementato fino ad un valore massimo che determina la rottura del materiale. La prova di trazione permette di ricavare la curva σ - ε di un materiale, ovvero la curva che mette in relazione tensione e deformazione. La curva ottenuta a seguito della prova di trazione dipende da vari fattori, ovvero: composizione chimica, trattamento termico, deformazioni plastiche precedenti, velocità di deformazione e temperatura.

Si distinguono inoltre all'interno della curva tensione-deformazione una regione ad andamento elastico ed una ad andamento plastico; il punto massimo della curva definisce la strizione del materiale, ossia quando si ha una deformazione localizzata tale da far sì che la prova non sia più attendibile. È inoltre possibile ottenere da prova:

- ❖ *Modulo di Young E* : grandezza tipica di un materiale che esprime il rapporto tra deformazione e tensione definita dall'inclinazione della retta in campo elastico;
- ❖ *Resistenza allo snervamento*: tensione alla quale inizia la deformazione plastica definita come la deformazione corrispondente ad una deformazione prefissata dello 0,2%;

- ❖ *Resistenza alla trazione*: tensione di picco della curva in corrispondenza con l'inizio della strizione.
- ❖ *Duttilità*: capacità del materiale di ridurre molto la sua sezione;
- ❖ *Resilienza*: energia che il materiale è in grado di immagazzinare in campo elastico restituibile allo scarico valutabile con il modulo di resistenza;
- ❖ *Tenacità*: capacità di un materiale di assorbire energia in campo plastico.

La procedura per effettuare la prova di trazione risulta essere molto semplice ed efficace. Per la realizzazione di questa prova è stata utilizzata una macchina di prova universale *MTS 810* (figura 4.5). Prima di tutto, si fissa il provino tra due morsetti in posizione verticale, così da evitare che la forza di gravità influisca sulla prova. Tramite due morsetti si stringono le estremità del provino ed una volta afferrati a dovere, una ganascia comincia a spostarsi a velocità costante, impostata tramite computer. A questo punto comincia a nascere uno stato di sforzo nel materiale generando una forza crescente, opposta alla direzione della traversa della macchina. Lo stop alla macchina può essere imposto quando il provino si rompe oppure quando la traversa si è spostata di una distanza prefissata, a seconda del tipo di prova che deve essere effettuata.

La prova di trazione in studio è stata effettuata seguendo la normativa ISO 527. I campioni vengono inseriti nelle impugnature della macchina e tirati fino al fallimento. Per questa normativa, la velocità di prova è tipicamente di 5 o 50 mm/min per misurare la resistenza e l'allungamento e 1 mm/min per misurare il modulo di misura. Le prime prove di trazione sono state effettuate utilizzando una velocità di prova pari a 0,02 mm/s ma si è notato come il materiale arrivasse al punto di rottura in intervalli di tempo molto brevi, scegliendo quindi di utilizzare una velocità più moderata. Sono state effettuate più prove con differenti condizioni utilizzando sia il provino B che il provino C. Dalle seguenti prove è risultato che alcuni provini presentano una rottura centrale ed altri invece in corrispondenza del cordolo di saldatura. Successivamente alle prove di trazione sono stati acquisiti dei dati direttamente dal computer grazie ad un'apposita scheda di acquisizione ed un software, mettendo in relazione la forza applicata dalla macchina con lo spostamento effettuato da essa. I dati acquisiti durante il processo sono stati inseriti in documenti Excel dai quali sono stati ricavati grafici tensione-deformazione per verificare il risultato dei provini e il loro comportamento sottoponendoli a trazione.



Figura 4.5 – Macchina di prova universale MTS 810 configurata per prova di trazione.

Per effettuare il passaggio dal grafico forza-spostamento al grafico tensione-deformazione sarà necessario attenersi alle formulazioni relative alla normativa utilizzata:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) = \sigma \frac{L}{L_0}$$

$$\sigma = W/A_0$$

$$\varepsilon_T = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

Dove:

- σ_T = tensione di trazione reale [MPa]
- σ = tensione di trazione [MPa]
- ε_T = deformazione di trazione reale
- ε = deformazione di trazione
- dL = incremento dell'allungamento [mm]
- L_0 = lunghezza iniziale [mm]
- L = lunghezza finale [mm]
- W = forza applicata [N]
- A = area trasversale originale [mm²]

4.5.2. 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). 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.

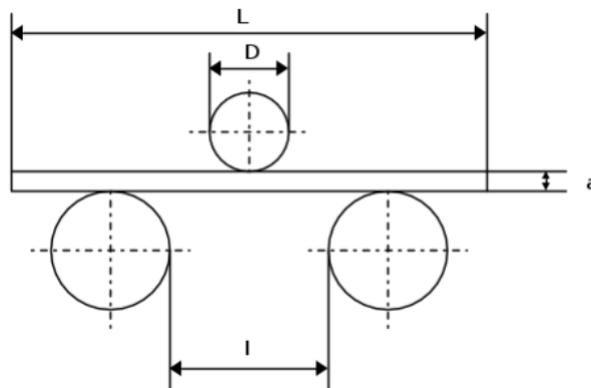


Figura 4.6 – Schema della struttura per effettuare la prova di piegatura.

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 mezzera, 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.

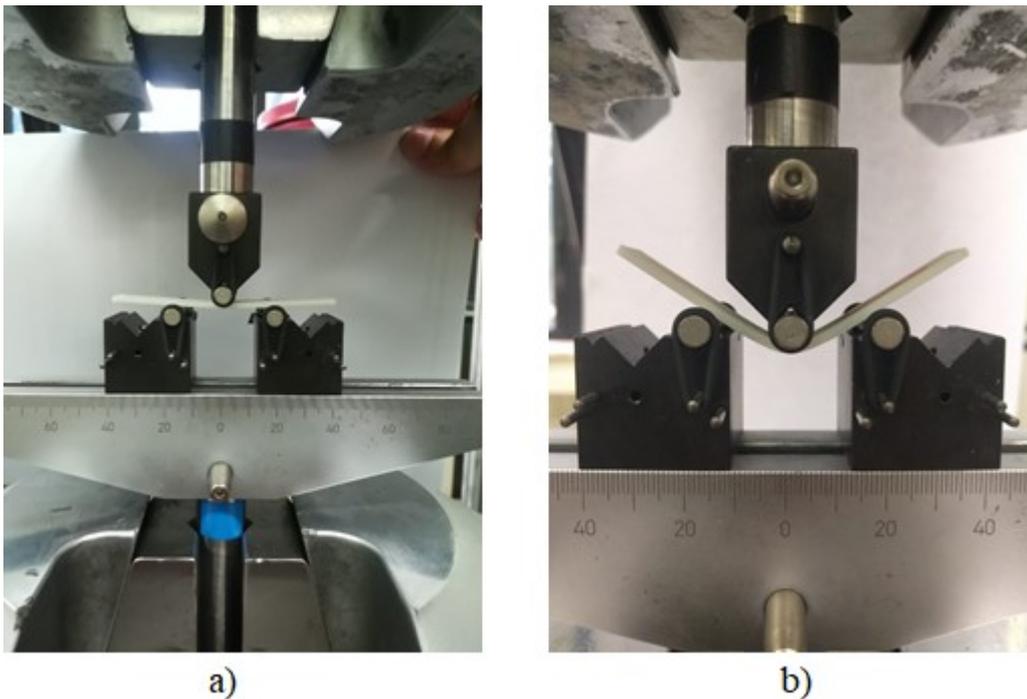


Figura 4.7 – Macchina di prova universale MTS 810 configurata per prova di piegatura. Nelle due figure si può osservare il provino prima (a) e dopo la prova (b).

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:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$
$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

Dove:

- ❖ σ_f = tensione flessionale delle fibre esterne nel punto medio [MPa]
- ❖ P = carico applicato dal punzone [N]
- ❖ L = distanza fra 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]

4.6. Stereomicroscopio

Per effettuare l'osservazione della struttura dei provini, sia nella parte saldata che nei punti di rottura, è stato necessario l'utilizzo di un *microscopio stereoscopico*, noto anche come *stereomicroscopio*, un tipo di microscopio ottico progettato per produrre una visione stereoscopica di un oggetto. Nello studio effettuato è stato utilizzato uno stereomicroscopio *Leica EZ4 D* (figura 4.8), il quale offre uno zoom 4,4:1 ad alta qualità, come si può osservare dalla figura 5.7. Sono presenti 7 LED che forniscono luce incidente, obliqua per un'illuminazione a contrasto elevato. La fotocamera digitale integrata consente la ripresa rapida in tempo reale su schermo grazie al trasferimento da stereo a microscopio USB. Per effettuare le misurazioni di base, annotazione ed archiviazioni delle immagini è stato utilizzato un software chiamato *LAS EZ*.



Figura 4.8 – Microscopio stereoscopico Leica EZ4 D.

Capitolo 5 – Risultati sperimentali

A seguito delle prove di trazione e di piegatura sono stati ricavati i risultati sperimentali che permetteranno di osservare quali fra le condizioni di saldatura investigate risulteranno essere le più efficaci. I risultati presi in considerazione dovranno essere confrontati per entrambe le prove, sia di trazione che di piegatura, poiché la saldatura più efficiente tra quelle prese in studio sarà quella che presenterà una maggior resistenza in entrambe le prove.

5.1. Caratteristiche del provino saldato

Ogni provino ricavato dalle piastre saldate presenterà delle caratteristiche totalmente differenti nel tratto sottoposto a saldatura, sia da un punto di vista strutturale che superficiale. Dalle figure 5.1 e 5.2 ricavate dallo stereomicroscopio si può notare come la variazione dei parametri nelle varie prove comporti una qualità superficiale di saldatura completamente differente in corrispondenza del giunto:

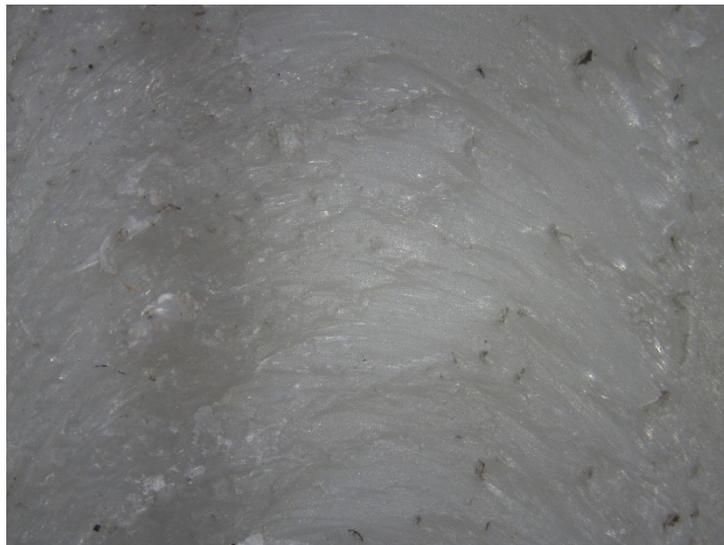


Figura 5.1 – Finitura superficiale del provino 800-40-04 con zoom 16x.



Figura 5.2 – Finitura superficiale del provino 1250-20-05 con zoom 16x.

Come dimostrato dalle figure sovrastanti, questi due giunti presentano un'impronta di saldatura totalmente differente in conseguenza all'aumento della velocità di rotazione dell'utensile, alla diminuzione della velocità di traslazione dell'utensile e all'aumento dell'affondamento dell'utensile nel materiale. La variazione di questi parametri consentono di raggiungere una condizione di saldatura molto più calda ricavando una struttura molto più definita da un punto di vista superficiale. La direzione di avanzamento può essere individuata dal risultato di saldatura in quanto l'utensile traslando lascia alle sue spalle un'impronta che presenta una geometria a mezzaluna e lascia nel punto finale di contatto una circonferenza completa.

In tutti i provini le superfici inferiori che non vengono a contatto con l'utensile presentano una "luce" dovuta al mancato coinvolgimento della saldatura in tutto lo spessore del provino. Le piastre risulteranno quindi distaccate nella parte opposta alla saldatura, come si può osservare in figura 5.3.



Figura 5.3 – Immagine dorsale del provino 1250-20-03 con zoom 35x.

5.2. Risultati prove di trazione

A seguito della prova di trazione sono stati ricavati i grafici σ - ϵ dei provini B e C per ogni condizione di saldatura, 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:

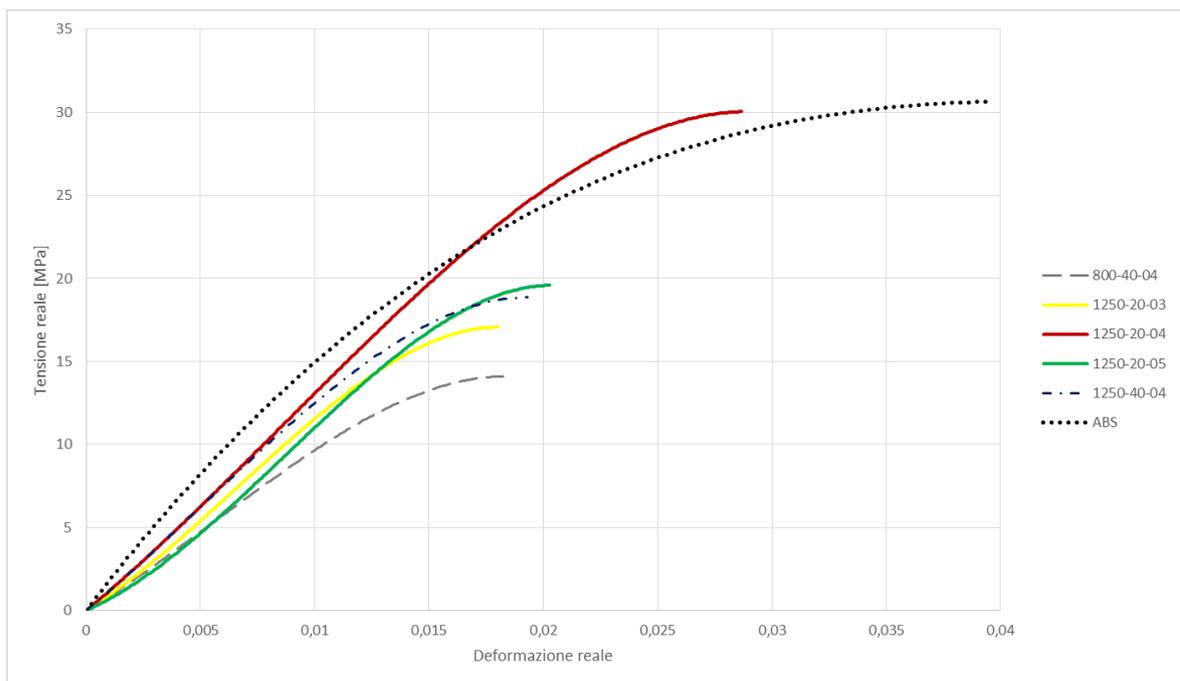


Grafico 5.1 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra tutti i provini saldati sottoposti a trazione e un provino in ABS non sottoposto a saldatura.

Come si può notare dal grafico sovrastante, tutti i provini sottoposti a saldatura risultano meno performanti rispetto al provino in ABS non saldato, differenziandosi fra loro al variare dei parametri. L'unico che si differenzia notevolmente dagli altri per valore di tensione massima e deformazione massima raggiunta risulta essere il 1250-20-04, con un valore di tensione massima leggermente inferiore rispetto al provino in ABS non saldato, raggiungendo però un valore di deformazione massima sensibilmente più basso.

Inoltre, tutti i provini sottoposti a prova di trazione si sono rotti in corrispondenza della mezzeria della saldatura, a differenza però del 1250-20-03 e del 1250-20-04. Sarebbe quindi interessante andare ad investigare la motivazione dell'avvenimento di questo fenomeno.

I valori di tensione massima raggiunta in MPa e la deformazione massima raggiunta sono riassunti nella seguente tabella 5.1:

Tabella 5.1 – Risultati di tensione massima e deformazione massima raggiunta dai provini a seguito della prova di trazione.

<i>Nome provino</i>	<i>Tensione massima [MPa]</i>	<i>Deformazione massima</i>
<i>800-40-04 B</i>	14,101	0,01823
<i>800-40-04 C</i>	10,578	0,01548
<i>1250-20-03 C</i>	17,062	0,01804
<i>1250-20-04 B</i>	30,049	0,02868
<i>1250-20-04 C</i>	24,404	0,02342
<i>1250-20-05 B</i>	19,581	0,0203
<i>1250-20-05 C</i>	17,9	0,01853
<i>1250-40-04 B</i>	18,871	0,01931
<i>1250-40-04 C</i>	18,868	0,01921
<i>Provino ABS</i>	30,65	0,0395

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 B e C della stessa condizione di saldatura, 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.

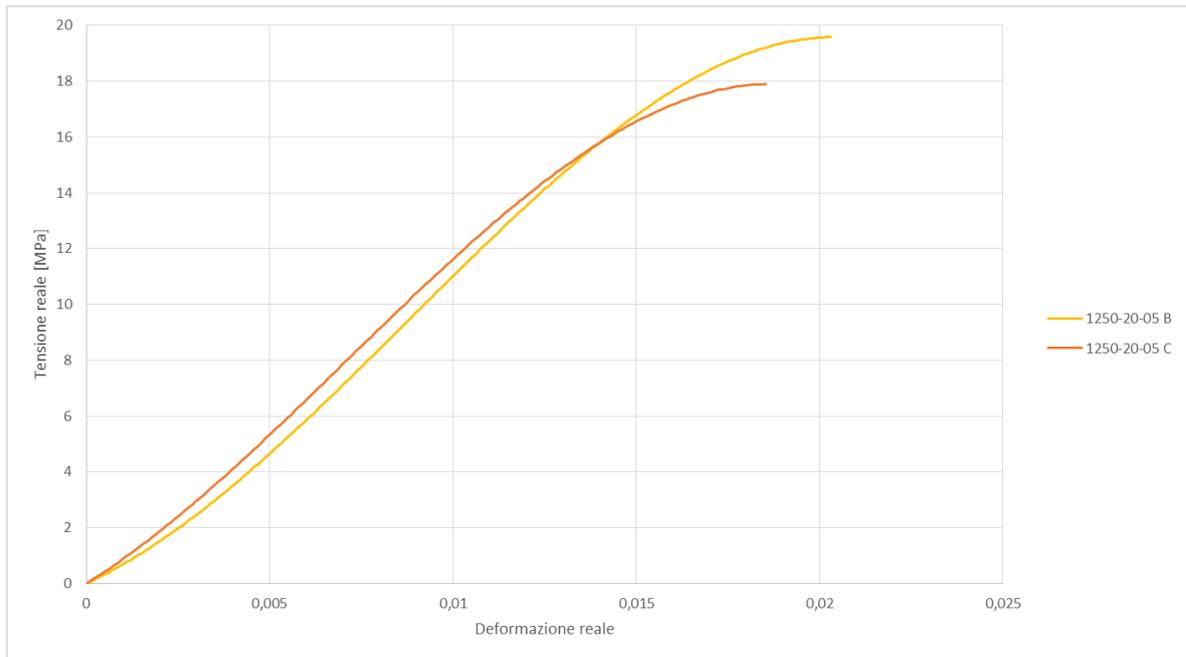


Grafico 5.2 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra i provini 1250-20-05 B e C.

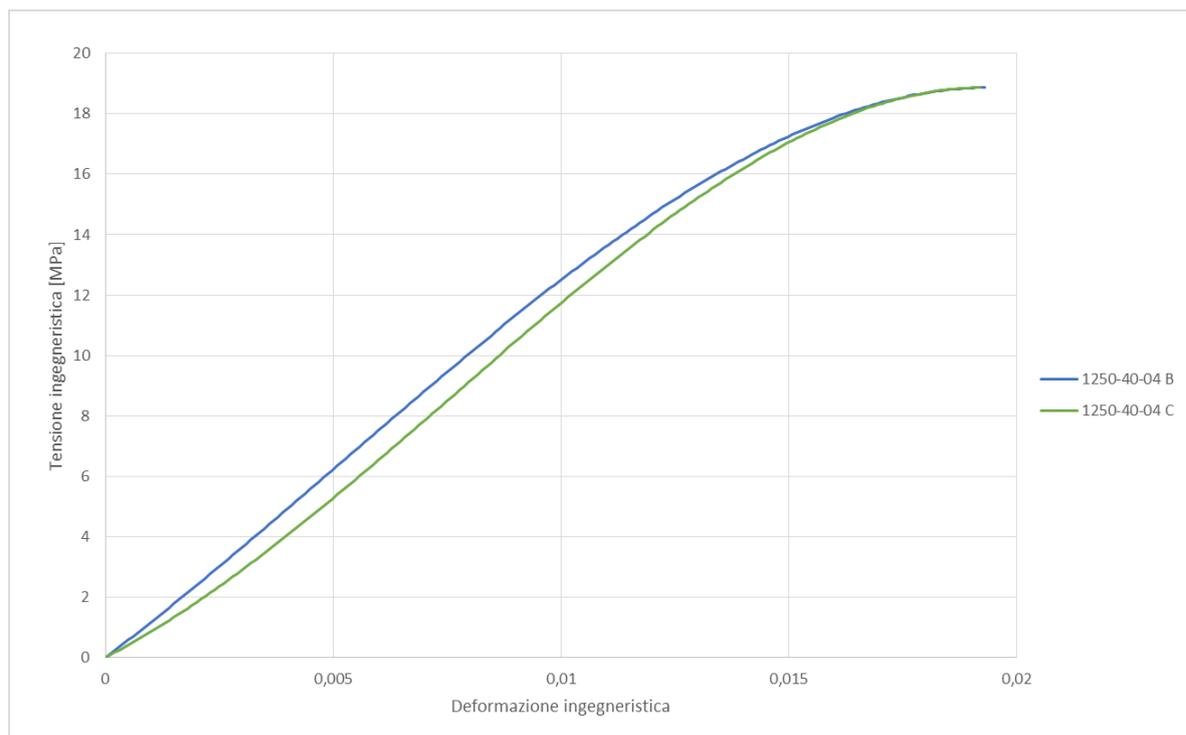


Grafico 5.3 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra i provini 1250-40-04 B e C.

Dalle prove effettuate si possono definire i seguenti risultati:

- All'aumentare della velocità di rotazione dell'utensile aumenta il valore di tensione e deformazione massima raggiungibile: questo fenomeno è giustificato dal fatto che una maggiore ω comporta il raggiungimento di una temperatura più elevata in corrispondenza della zona di saldatura (grafico 5.4). In particolare si nota come la tensione massima raggiungibile aumenta in maniera significativa, mentre la variazione della deformazione massima raggiungibile è molto ridotta.

$$\omega \propto \sigma, \varepsilon$$

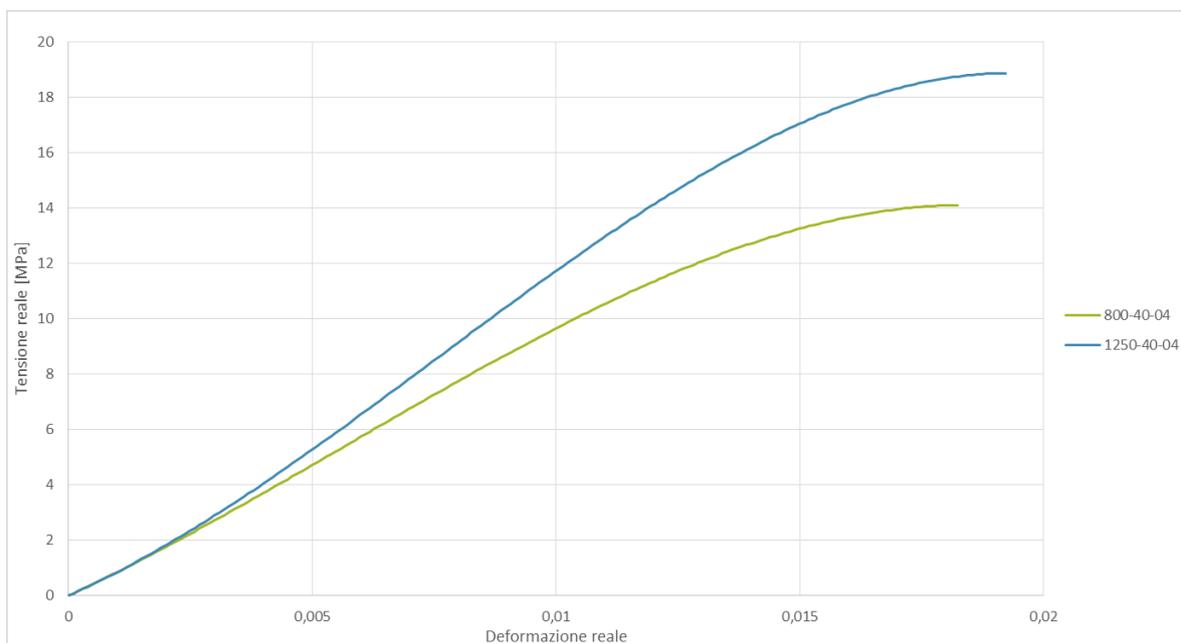


Grafico 5.4 – Curve tensione-deformazione a confronto tra provini saldati con differenti velocità di rotazione.

- All'aumentare della velocità di traslazione dell'utensile diminuisce il valore di tensione e deformazione massima raggiungibile: questo fenomeno è giustificato dal fatto che una maggiore v comporta una maggiore dissipazione di calore lungo la linea di saldatura (grafico 5.5). In questo caso si può notare come la variazione di questo parametro comporti significative variazioni sia di tensione massima che di deformazione massima raggiungibile.

$$v \propto \sigma, \varepsilon$$

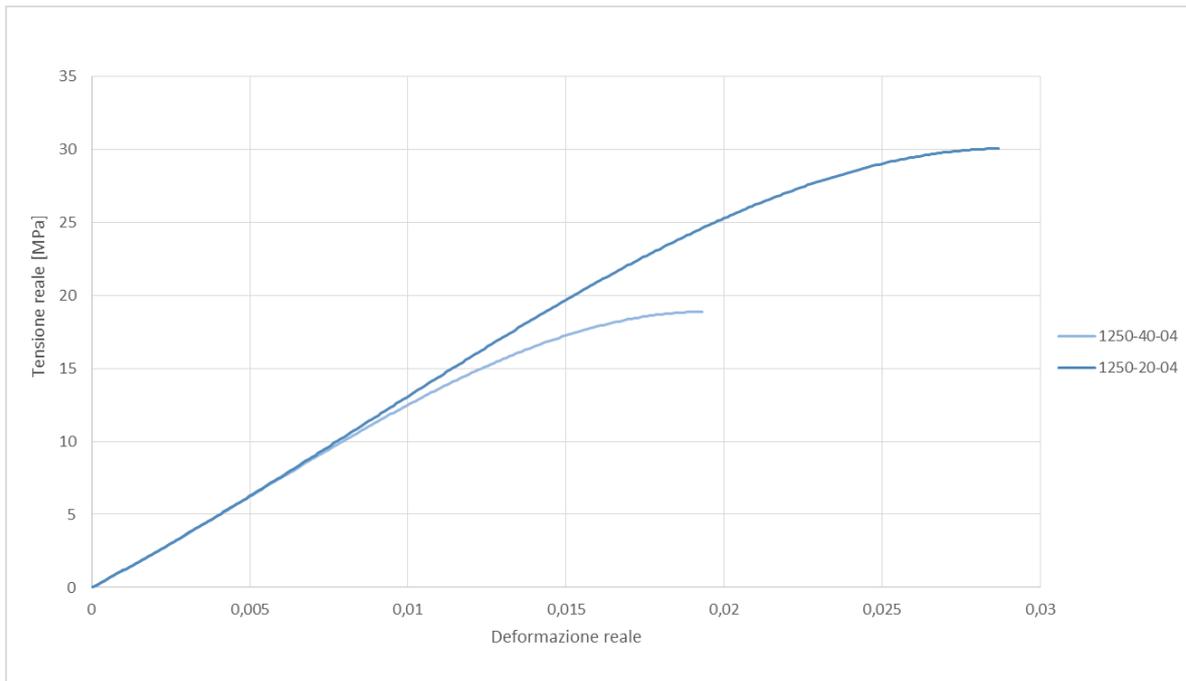


Grafico 5.5 – Curve tensione-deformazione a confronto tra provini saldati con differenti velocità di traslazione.

- La resistenza varia in maniera non lineare all'aumentare dell'affondamento: per valori di 0,3 mm si nota un valore minimo di tensione massima, aumenta per valori di 0,4 mm per poi diminuire nuovamente per valori di 0,5 mm (grafico 5.6). Dai risultati ottenuti da queste prove si può notare una sorta di andamento parabolico ma soltanto con un numero di prove superiori si riuscirà a definire con maggiore precisione l'andamento della resistenza al variare dell'affondamento. La variazione della resistenza al variare dell'affondamento ha un andamento parabolico in quanto con un affondamento troppo basso non si riesce ad interessare troppo materiale, mentre con un affondamento troppo elevato viene a formarsi un gradino che comporta la nascita di accumuli di tensione (grafico 5.7). Con un giusto affondamento si riuscirà quindi ad ottenere come risultato una resistenza ottimale.

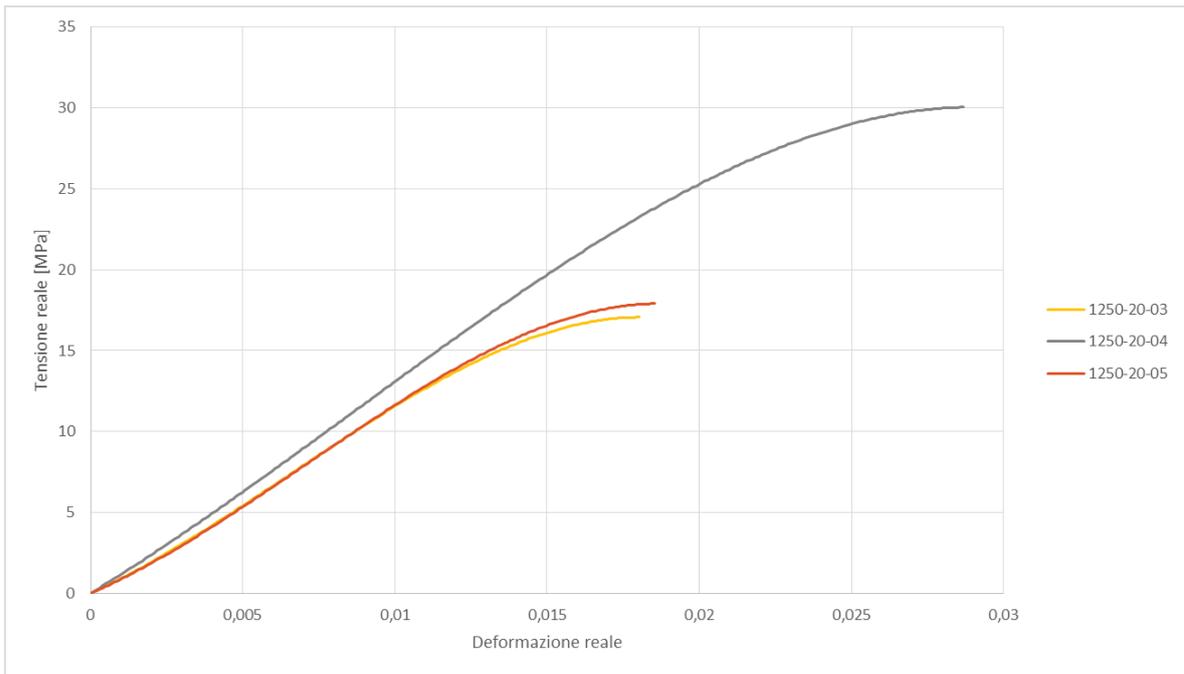


Grafico 5.6 – Curve tensione-deformazione a confronto tra provini saldati con differenti valori di affondamento.

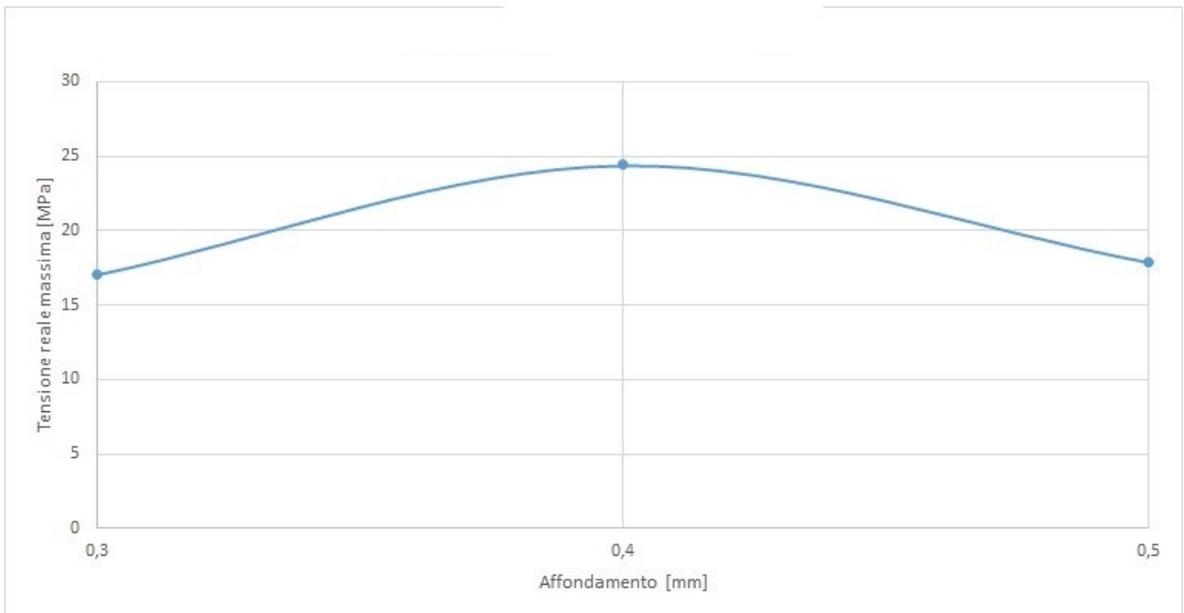


Grafico 5.7 – Curva rappresentante l'andamento della tensione in funzione dell'affondamento dell'utensile nel materiale durante il processo di saldatura.

5.3. Risultati prove di piegatura

Analogamente alle prove di trazione, anche per le prove di piegatura sono stati ricavati i grafici $\sigma - \varepsilon$ per riuscire a definire il comportamento a flessione dei giunti saldati e verificarne la loro qualità. Oltre ai giunti saldati sono stati sottoposti a verifica anche due giunti non saldati con due differenti modalità di stampa come già descritto precedentemente nel capitolo 4.2. Il diagramma Tensione-Deformazione flessionale relativo a tutti i provini sottoposti a studio è definito dal grafico 5.8:

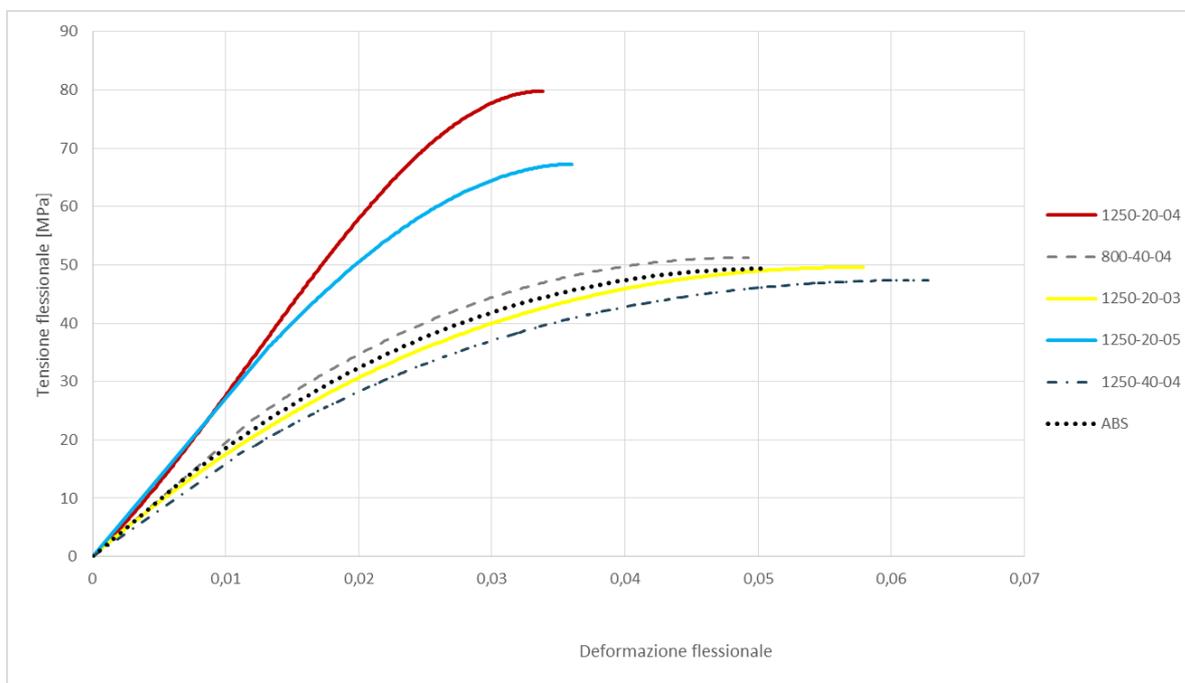


Grafico 5.8 – Confronto delle curve tensione-deformazione tra tutti i provini saldati sottoposti a piegatura e un provino in ABS non sottoposto a saldatura.

Tutti i provini presi in considerazione sono stati realizzati con la seconda modalità di stampa, ovvero effettuando la stratificazione di materiale occupando un'area coincidente allo spessore del provino, la quale si concluderà quando sarà raggiunta un'altezza pari alla larghezza del provino stesso. È stata scelta questa seconda modalità di stampa in quanto presenta una maggiore resistenza a flessione rispetto ad un provino realizzato con la prima modalità di stampa, come si può osservare nel grafico 5.9.

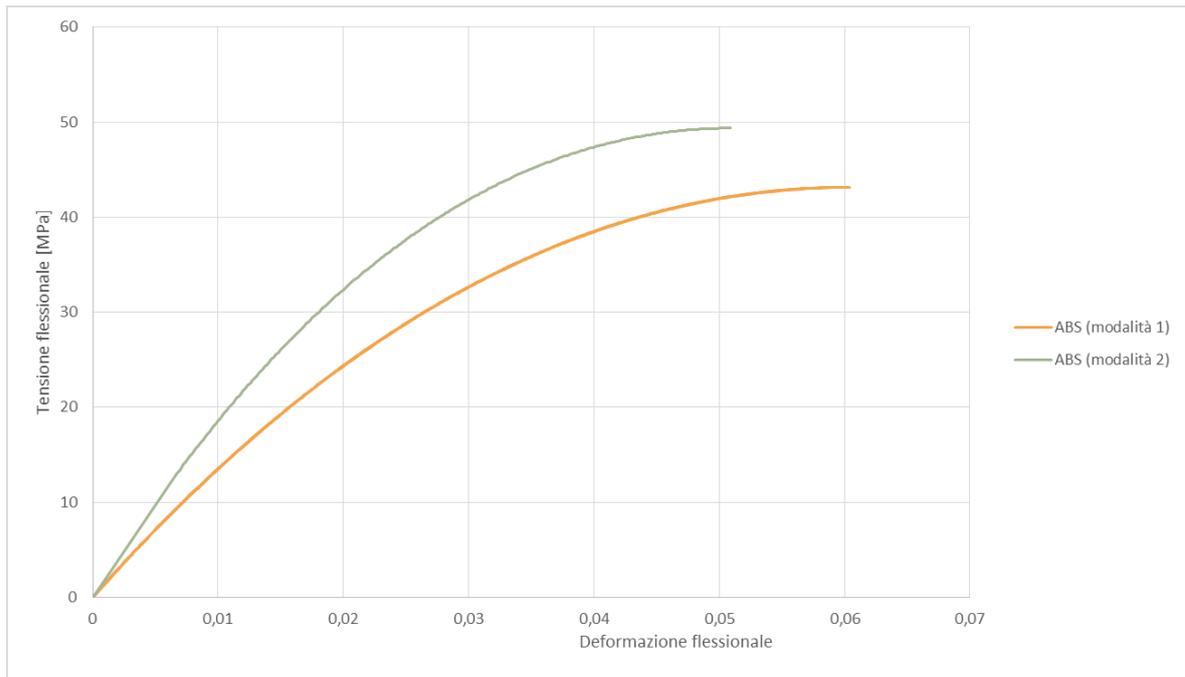


Grafico 5.9 – Confronto delle curve tensione-deformazione di due provini non saldati realizzati attraverso differenti modalità di stampa.

I valori di tensione massima raggiunta in MPa e la deformazione massima raggiunta sono riassunti nella seguente tabella 5.2.

Tabella 5.2 – Risultati di tensione massima e deformazione massima raggiunta dai provini a seguito della prova di trazione.

Nome provino	Tensione massima [MPa]	Deformazione massima
800-40-04	51,28	0,049
1250-20-03	49,62	0,058
1250-20-04	79,84	0,034
1250-20-05	67,32	0,036
1250-40-04	47,42	0,063
ABS (modalità 1)	43,14	0,06
ABS (modalità 2)	49,37	0,051

Dalle prove effettuate si possono definire i seguenti risultati:

- La tensione massima a flessione e la deformazione massima variano in maniera indipendente in quanto ad un aumento di tensione non corrisponde un aumento della deformazione.
- L'affondamento non varia in maniera lineare in quanto la tensione massima a flessione assume il valore maggiore fra i tre in corrispondenza dell'affondamento intermedio e quello minore in corrispondenza del valore minimo. Ne consegue che il provino più resistente a flessione risulta essere quello saldato alle condizioni di affondamento pari a 0,4 mm.
- All'aumentare della velocità di rotazione, invece, si nota una minima riduzione della tensione massima a flessione ma un aumento considerevole della deformazione massima a flessione. Utilizzando valori maggiori di velocità di rotazione si contribuisce quindi all'aumento della qualità del giunto.
- All'aumentare della velocità di avanzamento si nota un netto aumento della deformazione massima raggiungibile ma allo stesso tempo una consistente riduzione della tensione flessionale. Pertanto per massimizzare le qualità del giunto è opportuno utilizzare una minore velocità di avanzamento.
- Utilizzare un provino realizzato con la seconda modalità di stampa comporta una maggior resistenza a flessione rispetto ad un provino realizzato con la prima modalità di stampa. Per questo motivo tutti i provini sottoposti a saldatura sono stati realizzati con la seconda modalità di stampa.
- Il provino che presenta maggiore resistenza a flessione risulta essere il 1250-20-04, mentre il provino che presenta una maggiore flessibilità risulta essere il 1250-40-04.

Confrontando le curve tensione-deformazione dei vari provini sottoposti a saldatura si può notare che tre di essi, ovvero il 1250-20-04, 1250-20-05 e 800-40-04, presentano una maggiore resistenza a flessione rispetto al provino non saldato. Questo fenomeno potrebbe essere giustificato dal fatto che il calore generato durante il processo di saldatura conferisce una maggiore compattazione del materiale riuscendo a riempire i vuoti presenti nella struttura dei provini conferita dalla modalità di stampa 3D. Risulta essere però solo un'ipotesi che merita un maggior approfondimento di studio.

5.4. Analisi allo stereomicroscopio

A seguito delle prove di trazione e di piegatura, oltre a risultati numerici sono stati ricavati ulteriori risultati attraverso l'utilizzo dello stereomicroscopio. Sono state ricavate immagini relative alle strutture interne ed esterne dei provini sottoposti a prova di trazione e di piegatura, effettuando osservazioni interessanti riguardo i provini arrivati a punto di rottura:

- Nella figura 5.4 si può osservare la struttura interna dei provini 1250-20-03, 1250-20-04 e il 1250-20-05 a seguito della prova di trazione. Nella prima immagine la saldatura ha interessato all'incirca il 50% dello spessore, nella seconda immagine all'incirca il 60% dello spessore ed infine nella terza immagine circa il 75% dello spessore. Con questa osservazione si può quindi affermare che è possibile aumentare l'affondamento dell'utensile o utilizzarne uno con la presenza del pin così da poter coinvolgere tutto lo spessore del provino all'effetto della saldatura.

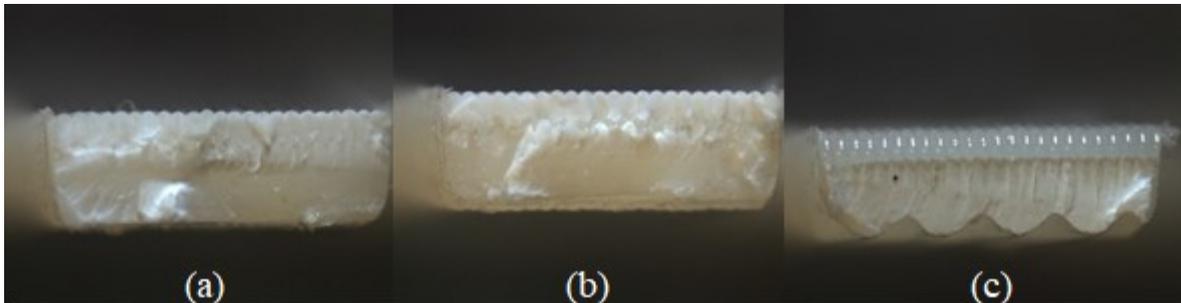


Figura 5.4 – Immagine ricavata dallo stereomicroscopio della struttura interna di provini 1250-20-03 (a), 1250-20-04 (b) e 1250-20-05 (c) a seguito della prova di trazione

- Nella figura 5.5 si può osservare invece la struttura esterna del provino 800-40-04 a seguito della prova di piegatura. L'immagine è stata ricavata poggiando il provino sul proprio fianco per poter osservarlo lateralmente. Si può notare come vengano a formarsi due punti di rottura: uno in mezzeria ed uno in corrispondenza del cordolo di saldatura. Sarebbe interessante andare ad osservare attraverso un maggior approfondimento di studi il motivo della nascita di questo fenomeno, ovvero se entrambe si innescano assieme o se una cricca risulta essere la conseguenza dell'altra.



Figura 5.5 – Immagine ricavata dallo stereomicroscopio della struttura esterna del provino 800-40-04 a seguito della prova di piegatura

Capitolo 6 – Conclusioni

Lo scopo perseguito nel presente lavoro è stato quello di valutare la fattibilità della saldatura allo stato solido su piastre in ABS realizzate mediante stampa 3D. Per effettuare il totale processo sono state realizzate piastre tramite tecnica FDM, saldate attraverso FSW per poterne poi ricavare i provini sottoposti a saldatura. Osservando i risultati ottenuti, sia numerici che dalle immagini ricavate dallo stereomicroscopio, dalle prove di trazione e di piegatura effettuate si può affermare che la variazione dei parametri di saldatura presi in considerazione comporta notevoli diversità riguardo la qualità dei giunti. Le condizioni investigate dimostrano che il giunto del provino saldato presenta caratteristiche ottimali se:

- La velocità di rotazione dell'utensile risulta essere elevata così da poter generare un'elevata quantità di calore durante il processo;
- La velocità di traslazione dell'utensile risulta essere bassa, così da poter dissipare più lentamente il calore lungo la linea di saldatura;
- L'affondamento dell'utensile nel materiale risulta essere moderato, in quanto se assumesse valori troppo bassi non riuscirebbe ad interessare uno spessore sufficiente, mentre se fosse troppo elevato andrebbe a generare un gradino in corrispondenza del cordolo di saldatura comportando addensamento di tensioni.

Lo studio di fattibilità del processo merita però un maggior approfondimento per poter sfruttare a pieno le sue peculiarità. Risulta necessario infatti applicare maggiori diversificazioni dei parametri osservati ed effettuare variazioni di altri aspetti, come ad esempio la geometria dell'utensile o mutare il valore del dwelling time. Inoltre, si potrebbe introdurre l'utilizzo della *hotshoe*, ovvero un sostegno riscaldante impiegato per aumentare la temperatura iniziale delle piastre, in quanto per la letteratura risulta essere molto performante.

Bibliografia

- [1] Reza Bagherian Azhiria, Ramin Mehdizad Tekiyehb, Ebrahim Zeynalic, Masoud Ahmadniab, Farid Javidpour, *Measurement and evaluation of joint properties in friction stir welding of ABS sheets reinforced by nanosilica addition*, Elsevier Ltd., 2018, 198 – 204.
- [2] Arvin Bagheri, Taher Azdast, Ali Doniavi, *An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets*, Elsevier Ltd., 2012, 402 – 409.
- [3] Archimede Forcellese, *Slide del corso di Tecnologia Meccanica*, A.A. 2019/2020.

Sitografia

[4] <https://www.twi-global.com>

[5] <https://www.sciencedirect.com>

[6] <https://www.meccanicanews.com>

[7] <https://stirweld.com>

Ringraziamenti

Prima di tutto vorrei ringraziare il mio relatore Prof. Archimede Forcellese per avermi garantito questa opportunità. Un ringraziamento particolare va alla correlatrice Prof.ssa Michela Simoncini per la sua disponibilità ed estrema cordialità ad ogni evenienza, ma anche a Tommaso Mancia e a Luciano Greco per essermi stati a fianco durante l'attività di tirocinio. Vorrei ringraziare la mia famiglia e Mattia per la forza ed il sostegno che mi hanno dato. In particolare grazie a mia madre che rappresenta per me la chiave dei miei successi, perché crede in me incondizionatamente, e al mio futuro nipote Edoardo, il quale, anche se ancora non è fra noi, è già dentro al mio cuore.

Ringrazio i miei compagni di corso, in particolar modo Chiara per essermi stata sempre vicino durante questo percorso ed essersi resa disponibile in ogni occasione, ma anche Mauro, Michele e Sebastiano per avermi fatto vivere questa esperienza con più spensieratezza.

Per ultimi ma non meno importanti tutti i miei amici per avermi sostenuto ed aver ascoltato tutti i miei sfoghi, grazie per tutti i momenti di felicità.