



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**EFFETTO DEI PARAMETRI DI PROCESSO SUL
COMPORTAMENTO MECCANICO DI PIASTRE IN
MATERIALE TERMOPLASTICO OTTENUTE CON
TECNICHE DI MANIFATTURA ADDITIVA SALDATE PER
FRICTION STIR WELDING**

**EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON THE
MECHANICAL BEHAVIOUR OF FRICTION STIR WELDED
SHEETS IN THERMOPLASTIC MATERIAL OBTAINED BY
ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES**

Relatore:

Prof. Ing. Archimede Forcellese

Correlatore:

Prof.ssa Ing. Michela Simoncini

Tesi di Laurea di:
Chiara Mignanelli

A.A. 2019/2020

Alla mia famiglia

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 – FSW (Friction Stir Welding).....	3
1.1. Generalità.....	3
1.2. Parametri.....	6
1.3. Utensile	8
1.4. Materiali.....	12
1.5. Stato attuale della ricerca.....	14
Capitolo 2 – Tecnologie di Manifattura Additiva	18
2.1. Generalità.....	18
2.2. Tecnica FDM	19
2.3. Confronto tra stampa 3D e tecniche tradizionali di stampa...	21

Capitolo 3 – Procedura sperimentale	23
3.1. Oggetto della sperimentazione	23
3.2. Stampante 3D	23
3.3. Processo di FSW	24
3.4. Provini.....	26
3.5. Prove di trazione	28
3.6. Prove di piegatura.....	30
3.7. Stereomicroscopio	34
Capitolo 4 – Risultati e discussioni	36
4.1. Risultati delle prove di trazione.....	36
4.2. Risultati delle prove di piegatura	38
4.2.1. Effetto della velocità di rotazione dell’utensile.....	43
4.2.2. Effetto della velocità di avanzamento dell’utensile	45
4.2.3. Effetto dell’affondamento dell’utensile nel materiale.....	48
4.2.4. Effetto della modalità di stampa.....	51
Bibliografia	56
Sitografia	57
Ringraziamenti	58

Introduzione

Con l'avanzare degli anni, la continua riduzione dei costi della manodopera comporta una crescita della competizione nel settore dell'industria manifatturiera. Per questo motivo, le industrie di questo settore, per poter sopravvivere e rimanere nel mercato, hanno bisogno di effettuare delle continue innovazioni.

Sicuramente un modo per rinnovarsi è dato dalla scelta di realizzare dei prodotti utilizzando delle tecniche di lavorazione moderne che siano anche meno impattanti da un punto di vista ambientale così da ridurre anche il problema legato all'inquinamento che negli ultimi anni risulta essere particolarmente consistente.

Nel 1991, *The Welding Institute* ha brevettato una delle tecniche di saldatura più utilizzate ai giorni d'oggi nel campo dell'industria manifatturiera, la *Friction Stir Welding*. Questa tecnologia viene utilizzata soprattutto in campo aerospaziale (saldatura del serbatoio esterno dello Space Shuttle) e aeronautico (saldatura leghe di alluminio), ma anche in quello automobilistico (Audi R8, Mercedes S1, Ford, Tesla), in quello navale ed in quello ferroviario.

Questa tecnica ha ampiamente sostituito quella di saldatura tradizionale e la differenza sostanziale tra le due è che, nella *Friction Stir Welding* la saldatura avviene allo stato solido senza raggiungere il punto di fusione, mentre nella tecnica tradizionale si verifica un'unione chimico – fisica attraverso la fusione del materiale. Nel primo caso, non essendo prevista una somministrazione di calore dall'esterno, ossia di energia diretta, non si verifica la presenza di radiazioni e di conseguenza non sono prodotti dei gas e dei fumi tossici; per questo motivo si tratta di una tecnica a basso impatto ambientale.

L'utilizzo di questa tecnica per l'unione di piastre in materiale polimerico termoplastico (come l'ABS), ovvero un materiale che può essere riciclato, rilavorato e deformato, rende il processo completamente *green*: abbassa ancora di più l'impatto ambientale rispetto al caso in cui si utilizzassero dei materiali termoindurenti.

Pertanto, si può affermare che la *Friction Stir Welding* applicata all'ABS sia un processo innovativo, sostenibile e sicuramente vantaggioso, ma risulta necessario studiare la sua fattibilità e la qualità del giunto ottenuto dall'unione di due piastre realizzate mediante stampa 3D (tecnica FDM) che costituisce lo scopo di questa tesi.

Anche la scelta dell'utilizzo di una tecnica di manifattura additiva è legata all'innovazione e all'impatto ambientale.

La tecnica FDM, infatti, oltre a ridurre la produzione di sfridi e scarti di materiale consente di ottenere degli oggetti che presentino geometrie particolari difficilmente ottenibili con tecniche di stampa tradizionali, impiegando un basso quantitativo energetico.

Nell'elaborato si discuterà, in primo luogo, del processo e di tutte le attrezzature che occorrono per realizzarlo e delle prove di trazione e di piegatura che sono state effettuate per verificare la qualità del giunto. Successivamente si evidenzieranno le differenze tra i giunti ottenuti a differenti condizioni di processo, ovvero utilizzando valori differenti dei parametri di processo presi in considerazione. Si individueranno, infine, i valori dei parametri che ottimizzano la qualità del giunto.

Capitolo 1 – FSW (Friction Stir Welding)

1.1. Generalità

La *Friction Stir Welding* è un processo di giunzione termomeccanica allo stato solido.

La Figura 1.1. ne fornisce un'illustrazione schematica.

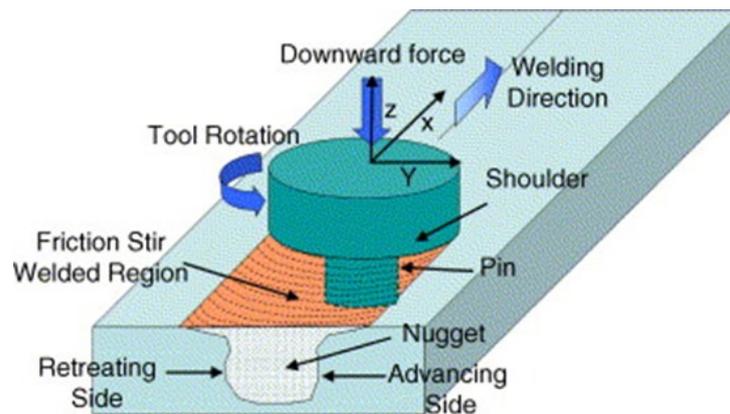


Figura 1.1. Rappresentazione schematica del processo di Friction Stir Welding

Per la realizzazione del processo, in primo luogo, risulta necessario porre ed accostare due piastre su un apposito sostegno inclinato di un angolo compreso tra $1,5^\circ$ e 3° , per agevolare sia lo scorrimento del materiale permettendogli di addensarsi in un solo lato, che la fuoriuscita della bava. Successivamente, un utensile costituito da una spalla cilindrica ed un perno opportunamente sagomato ad essa attaccato, ruota attorno al proprio asse a velocità elevate ed affonda e trasla in corrispondenza dell'interfaccia tra le due piastre. Il moto rotatorio dell'utensile ha una duplice funzione: permette il rimescolamento del materiale intorno al perno rotante, conferendogli una certa uniformità ed un aumento della duttilità fino ad ottenere il rammollimento e genera calore per attrito che si forma tra l'utensile stesso ed il materiale da lavorare. Il moto traslatorio, invece, consente la dissipazione del calore ed inoltre trasporta il materiale agitato per rotazione, dalla parte anteriore a quella posteriore del perno, completando la saldatura ed estendendola per tutta la lunghezza dell'interfaccia tra le due piastre. La combinazione di questi due moti dell'utensile porta al movimento del materiale attorno al perno che, a seconda delle caratteristiche geometriche dell'utensile, potrebbe risultare più o meno complesso. In questo modo si verifica la realizzazione di un

giunto allo stato solido dove è possibile individuare due lati di saldatura differenti: l'*Advancing Side* e il *Retreating Side*.

A causa del moto rotatorio dell'utensile, infatti, sarà possibile notare che in corrispondenza di un lato di saldatura la componente tangenziale della velocità di rotazione risulterà avere lo stesso verso della direzione di avanzamento (*Advancing Side*) provocando maggiori forze di attrito, mentre, in corrispondenza dell'altro lato, la componente tangenziale della velocità di rotazione avrà verso opposto alla direzione di avanzamento del processo, (*Retreating Side*) comportando minori forze di attrito.

Di conseguenza, la temperatura raggiunta nel lato di avanzamento (AS) è maggiore rispetto a quella nel lato di ritiro (RS). Un altro motivo che spiega questa differenza è che il punto in cui il materiale allo stato solido si inizia a trasformare in semisolido e scorre attorno al perno dell'utensile si trova nel lato di avanzamento, mentre il primo punto in cui il materiale inizia a raffreddarsi e quindi a ritirarsi si trova nel lato di ritiro. Quindi, dato che nel lato di avanzamento il materiale ha più natura di stato solido rispetto al lato di ritiro, si dovrebbe generare una maggior sollecitazione per attrito generando a sua volta un maggior quantitativo di calore che comporta un aumento della temperatura.

La temperatura in un determinato punto all'interno del pezzo di lavorazione aumenta all'avvicinarsi della fonte di calore e diminuisce al suo allontanarsi; per questo motivo, il ciclo termico è costituito di due fasi: quella di riscaldamento (nell'AS) e quella di raffreddamento (nell'RS).

Una gran parte del calore generato per attrito, cioè circa il 95%, viene trasferito al pezzo da lavorare, mentre soltanto il restante 5% viene assorbito dall'utensile. Dato che il calore non viene fornito dall'esterno, la temperatura massima di processo non sarà particolarmente elevata e quindi, non si raggiungerà mai il punto di fusione del materiale saldato. La temperatura raggiunta, infatti, assumerà al massimo un valore compreso tra l'80% e il 90% della temperatura di fusione del materiale saldato, in modo tale da ottenere, in corrispondenza della giunzione, uno stato viscoso-plastico del materiale. Dato che l'apporto di calore è basso e non si verifica un susseguirsi di fusione e solidificazione, questo processo comporta numerosi vantaggi rispetto alla saldatura tradizionale [5].

Passando ad un punto di vista microstrutturale, la saldatura per attrito (FSW) presenta tipicamente tre zone principali: un nocciolo di saldatura, una zona termo-meccanicamente alterata (TMAZ) ed una zona alterata soltanto termicamente (HAZ). Tecnicamente, sia il nocciolo di saldatura che il TMAZ sono delle zone colpite termo-meccanicamente, ma sono considerate separatamente perché presentano delle caratteristiche microstrutturali distinte. Il

nocciolo di saldatura subisce una ricristallizzazione dinamica che comporta la formazione di grani fini, mentre il TMAZ no. L'estensione e la composizione microstrutturale di queste zone dipendono dal materiale e dalle condizioni di lavorazione (parametri e progettazione dell'utensile, per esempio) [6]. La Figura 1.2. fornisce un'illustrazione di queste zone.

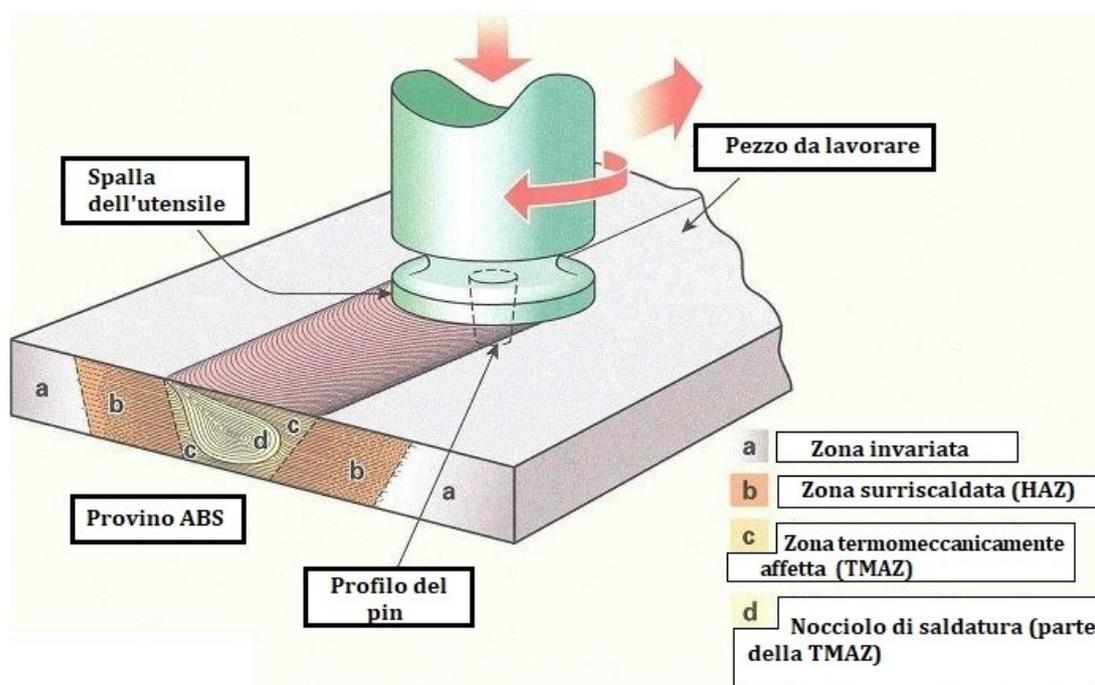


Figura 1.2. Rappresentazione delle zone di materiale interessate dalla saldatura

Utilizzare questa tecnologia significa ottenere, attraverso un certo risparmio energetico, dei giunti saldati che, grazie alla loro microstruttura fine, presentano elevate proprietà meccaniche.

Dato che questo tipo di saldatura non richiede il raggiungimento del punto di fusione, non si verificano tutte quelle problematiche come porosità, inclusioni di gas e formazione di cricche da solidificazione, quindi il materiale presenta una struttura molto omogenea. Ciò fa sì che le strutture realizzate abbiano delle proprietà meccaniche migliori ed una vita a fatica maggiore rispetto a quelle ottenute con la saldatura tradizionale e non solo; infatti, in termini di resistenza meccanica, saldature effettuate con questa tecnica, permettono un miglioramento del 15-20 % rispetto anche a processi più avanzati come, ad esempio, il laser. Il fatto che non si verifichi la fusione fa sì che non debbano essere presenti stazioni con gas di protezione e che non si creino eventuali schizzi, spruzzi, fumi e gas nocivi di scarico: si tratta, quindi, di un processo con un'elevata compatibilità ambientale.

Infine, essendo un processo completamente automatizzato e robotizzato, una volta avviato, è sicuramente ripetibile e stabile e si ha la completa sicurezza che tutti i cordoni di saldatura

avranno qualità ed uniformità identiche. L'efficienza è ottima anche da un punto di vista energetico, infatti, l'energia utilizzata è inferiore del 30-40% rispetto alle saldature tradizionali [7].

1.2. Parametri

Si è visto ampiamente come il processo di *Friction Stir Welding* differisca dalle tradizionali tecniche di saldatura, in quanto prevede un procedimento puramente termo-meccanico.

Per ottenere un giunto privo di difetti e che presenti le proprietà meccaniche richieste, è necessario individuare i corretti valori da utilizzare dei parametri che influenzano il processo.

I parametri più importanti sono:

- le caratteristiche geometriche dell'utensile (diametro e forma dello *shoulder*; diametro, lunghezza e forma del *pin*);
- la velocità di rotazione dell'utensile (ω , rpm);
- la velocità di avanzamento dell'utensile, o velocità di saldatura (v , mm/min);
- l'affondamento dell'utensile nel materiale;
- la forza verticale esercitata dalla macchina sull'utensile;
- l'angolo di inclinazione dell'utensile ("*tilt angle*").

Fra tutti i parametri elencati, sicuramente il meno intuitivo risulta essere l'angolo d'inclinazione. Infatti, si potrebbe pensare, che l'affondamento dell'utensile nel materiale in direzione perpendicolare rispetto alla superficie dei pezzi da unire ed il suo avanzamento siano sufficienti.

In queste condizioni di saldatura, però, si sono riscontrati dei problemi come l'elevato valore della forza con cui il materiale plasticizzato si oppone all'avanzamento dell'utensile, dovuto all'accumulo di materiale davanti alla spalla, e la fuoriuscita continua di una bava di materiale plasticizzato dal *Retreating Side* a causa dell'elevata pressione esercitata dallo *shoulder*.

Per questo motivo, per la risoluzione di questi problemi, si è visto necessario ricorrere all'inclinazione di un angolo di pochi gradi ($1,5^\circ$ - 3°) dell'asse dell'utensile, in modo tale che lo *shoulder* riuscisse a trattenere il materiale e a spostarlo in modo efficace dalla parte anteriore alla parte posteriore del perno; solitamente però risulta più semplice da un punto di vista puramente esecutivo inclinare il sostegno, piuttosto che l'utensile.

Il parametro di saldatura più influente è la velocità di rotazione dell'utensile, in quanto è responsabile sia della quantità di calore prodotto per attrito fra la spalla ed il pezzo da saldare, sia dei fenomeni di ricristallizzazione dinamica che danno origine ad una struttura a grani fini e quindi con proprietà meccaniche elevate. Velocità di rotazione elevate generano una temperatura elevata a causa dell'elevato riscaldamento per attrito e provocano un'agitazione ed una miscelazione più intensa del materiale. Tutti gli altri parametri vengono scelti in funzione di questo.

Per far sì che l'utensile penetri fino al vertice del giunto, risulta importante determinare la lunghezza esatta del pin, tenendo conto sia dello spessore del pezzo da saldare sia dell'estensione della zona in cui il materiale plasticizza che risulta essere lievemente maggiore (qualche decimo di millimetro).

Di conseguenza, il pin non dovrà essere né troppo lungo, per evitare che il pezzo venga saldato con il sostegno, né troppo corto per evitare il rischio di avere una mancata penetrazione, che comporterebbe la presenza di un intaglio sul rovescio del giunto.

Anche la velocità di avanzamento influenza le caratteristiche dei giunti, infatti, se si mantenesse costante la velocità di rotazione dell'utensile, una variazione della velocità di saldatura comporterebbe la realizzazione di due tipologie di giunti differenti: i giunti "freddi" ed i giunti "caldi".

I primi si verificano quando la velocità di saldatura è piuttosto elevata ed il calore generato per attrito non è sufficiente a plasticizzare il materiale; per questo motivo, l'utensile risulterà essere piuttosto sollecitato, in quanto il materiale freddo gli oppone resistenza, comportando possibili fenomeni di rottura.

Si è in presenza di giunti "caldi", invece, se la velocità di saldatura è relativamente bassa, per cui il calore generato per attrito è elevato a tal punto da alterare la microstruttura del materiale, soprattutto nella ZTA (zona termicamente alterata).

Infine, per quanto riguarda la forza verticale, essa è funzione della velocità di rotazione e di avanzamento dell'utensile, per cui la quantità del calore generato per attrito dipende da questa.

Talvolta, risulta essere un fattore di processo anche il preriscaldamento o il raffreddamento. Infatti, per materiali che presentano un elevato punto di fusione o un'elevata conducibilità, il calore prodotto per attrito potrebbe non risultare sufficiente per ammorbidire il materiale intorno al perno rotante, per cui potrebbe risultare difficile realizzare dei giunti di saldatura privi di difetti.

In questi casi, il preriscaldamento o comunque una fonte di riscaldamento esterna potrebbe aiutare il flusso del materiale e migliorare la riuscita del processo [1].

1.3. Utensile

Tra i principali fattori che influiscono sulle qualità di un giunto saldato per FSW vi è la geometria dell'utensile utilizzato.

Questa, infatti, ricopre un ruolo importante nel flusso del materiale e governa la velocità di avanzamento alla quale la FSW può essere effettuata.

Generalmente un utensile è progettato in modo tale da avere una spalla (*shoulder*) ed un perno (*pin*), come mostrato in modo schematico nella Figura 1.3.

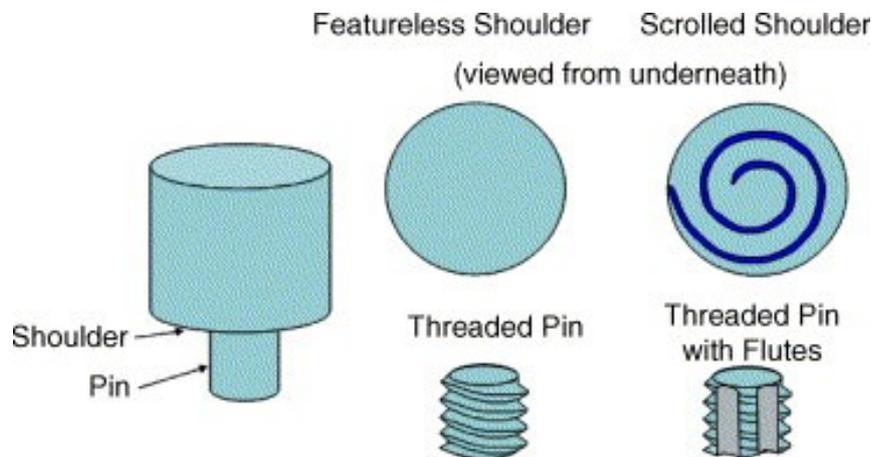


Figura 1.3. Rappresentazione schematica di un'utensile generico

Durante il processo di saldatura, l'utensile ricopre due funzioni principali: il riscaldamento localizzato del materiale ed il rimescolamento del materiale. Nella fase iniziale del processo, dove è prevista una prima immersione dell'utensile, il riscaldamento ottenuto deriva principalmente dall'attrito che si genera tra il perno ed il pezzo in lavorazione; successivamente si verificano degli ulteriori riscaldamenti che, però, derivano dalla deformazione plastica del materiale stesso. L'immersione dell'utensile procede fino a quando la superficie inferiore della spalla non tocca la superficie superiore del pezzo in lavorazione. L'attrito generato dal contatto tra la spalla e il pezzo rappresenta la maggior componente del calore prodotto. Dal punto di vista del riscaldamento, a parte le dimensioni di spalla e perno, tutte le caratteristiche di progettazione non risultano essere critiche. Dato

che la funzione dell'utensile è quella di mescolare e muovere il materiale, anche l'uniformità della microstruttura e delle proprietà, così come i carichi di processo, sono regolati dalla geometria dell'utensile. Generalmente si usa un utensile che presenta una spalla concava ed un perno cilindrico filettato.

Esistono tre differenti tipologie di utensili impiegati nel processo: a pin fisso, regolabili e "self-reacting".

L'utensile a pin fisso è costituito da un'unica struttura comprendente sia la spalla che il perno e può saldare soltanto un pezzo che presenti uno spessore costante, poiché il perno ha una lunghezza fissa. Utilizzare un utensile di questo tipo risulta particolarmente conveniente da un punto di vista economico, in quanto presenta un prezzo di vendita basso, ma allo stesso tempo, se il pin si usurasse in modo significativo o si rompesse, deve essere sostituito l'intero utensile: cosa che non accade nel caso di utensili regolabili.

L'utensile regolabile è costituito dall'accoppiamento di pin e *shoulder* e, dato che la lunghezza del pin non è fissa, risulta possibile saldare dei pezzi che presentino degli spessori differenti. Un ulteriore vantaggio che comporta l'utilizzo di un utensile di questo genere è che, se si verificasse la rottura del pin o dello *shoulder*, non deve essere sostituito l'intero utensile, ma soltanto il pezzo danneggiato. È ovvio che acquistare un utensile regolabile comporterebbe dei costi sicuramente maggiori rispetto a quelli di un utensile a pin fisso.

Infine, l'utensile *self-reacting* presenta una geometria sicuramente più complessa degli altri due precedentemente descritti. Esso, infatti, è costituito da due spalle rotanti: una sopra ed una sotto il pezzo in lavorazione. In questo caso, un albero filettato sporge dalla punta del perno fino a oltre la superficie inferiore del pezzo e la spalla inferiore è tenuta in posizione assiale tramite un dado posto sull'albero filettato. I costi relativi ad un utensile di questo tipo sono sicuramente elevati.

Le tre differenti tipologie di utensile sono illustrate nella Figura 1.4 [5].

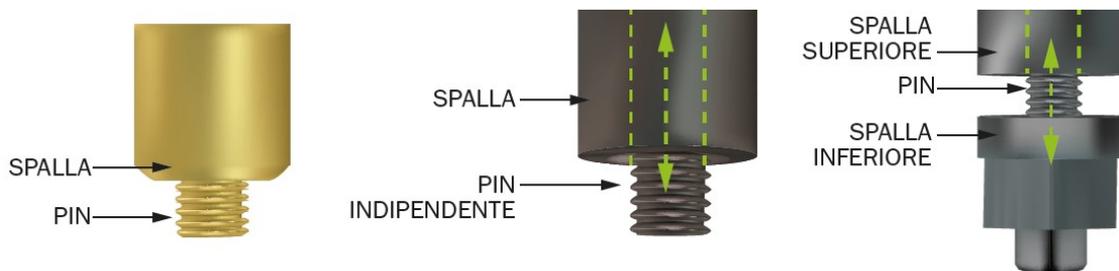


Figura 1.4. Rappresentazione di un utensile a pin fisso, regolabile e self-reacting

Il continuo progresso e la crescente esperienza nello studio degli utensili utilizzati nella FSW ha comportato un certo miglioramento nella comprensione del flusso dei materiali e per questo motivo, la geometria dell'utensile si è evoluta in modo significativo: sono stati ideati degli utensili con delle geometrie innovative, atte a migliorare le prestazioni del processo. Queste innovazioni sono frutto della ricerca effettuata da TWI (*The Welding Institute*), in modo particolare, che ha analizzato quali fossero i parametri che si adattassero in modo migliore a dei materiali e a degli spessori di interesse. Fra questi, risulta di notevole importanza, la scelta accurata della geometria dell'utensile.

Ad esempio, per effettuare una saldatura di testa ed ottenere un efficace rimescolamento del materiale risulta sicuramente migliore utilizzare un utensile conico, invece che cilindrico, in quanto prevede un incremento del flusso lungo la componente verticale comportando un flusso di materiale privo di difetti *swirl* (simili a dei piccoli graffi). Per questo motivo, l'utensile e nello specifico il pin, vengono progettati in modo da avere una spinta verticale massima così da ottenere dei giunti di elevata qualità. Un altro esempio, notato nello studio effettuato da R.S. Mishra et al. [2], è dato dagli utensili Whorl™ e MX Triflute™ sviluppati da TWI che presentano dei perni con una forma tronco conica in grado di spostare un minor quantitativo di materiale rispetto ad un utensile cilindrico con lo stesso diametro di radice. Generalmente, il Whorl™ provoca una riduzione del 60% circa del volume spostato, mentre l'MX Triflute™ provoca una riduzione del 70% circa del volume spostato. Si ritiene che le caratteristiche di progettazione dell'utensile Whorl™ e dell'utensile MX Triflute™ riducano la forza di saldatura, permettano un flusso di materiale più semplice, facilitino l'effetto "trivella" verso il basso ed aumentino l'interfaccia tra il perno ed il materiale, provocando un aumento del calore generato. È stato provato che è possibile saldare in FSW con successo delle lamiere di alluminio con uno spessore fino a 50 mm in una sola passata usando questi due utensili. Lo studio effettuato da R.S. Mishra et al.[2] afferma, inoltre, che il fattore principale che determina la superiorità dei perni tronco conici a spirale rispetto a quelli cilindrici convenzionali è il rapporto tra il volume spazzato durante la rotazione del perno ed il volume che occupa il perno stesso, cioè un rapporto tra il "volume dinamico e il volume statico" che è fondamentale per fornire un adeguato percorso di flusso. Solitamente, questo rapporto per perni con diametri di radice e lunghezza del perno simili, nel caso di saldatura di una piastra di 25 mm 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™. Un esempio di utensile con perno a spirale tronco conico è rappresentato nella Figura 1.5.

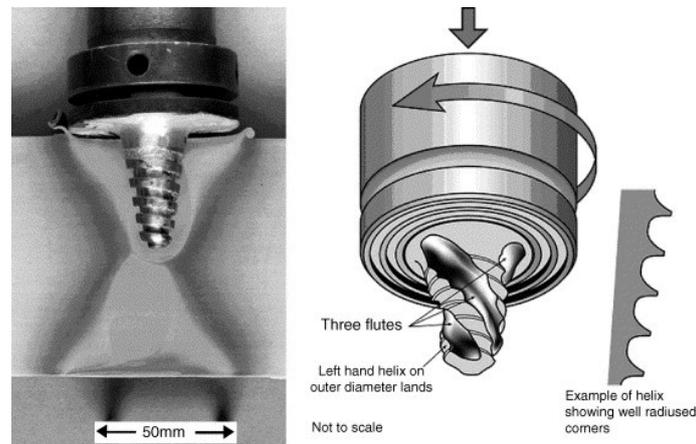


Figura 1.5. Rappresentazione di un utensile a pin trono conico a spirale

Per quanto riguarda la saldatura a giro, invece, il perno cilindrico convenzionale filettato ha comportato un eccessivo assottigliamento della lamiera superiore, comportando una rilevante riduzione delle proprietà di piegatura. È risultato necessario, quindi, effettuare degli studi che portassero all'utilizzo di un utensile che presentasse una geometria tale da ottimizzare le qualità del giunto saldato in questo modo. Recentemente sono state sviluppate due nuove geometrie di perni dal Flared-Trifute™ e dall'A-skew™ che presentano delle caratteristiche di progettazione tali da: aumentare il rapporto tra il volume spazzato e il volume statico del perno migliorando il percorso del flusso intorno e sotto il perno, allargare la regione di saldatura, fornire una migliore azione di miscelazione per la frammentazione dell'ossido e la dispersione all'interfaccia di saldatura e fornire un'azione di forgiatura orbitale alla radice della saldatura migliorando la qualità della saldatura in questa regione. Rispetto al perno filettato convenzionale, quindi, l'utilizzo dei perni Flared-Trifute™ e A-skew™ ha comportato un miglioramento di oltre il 100% della velocità di saldatura, una riduzione del 20% circa della forza assiale, un importante ampliamento della regione di saldatura ed una riduzione dell'assottigliamento della piastra superiore. Perni di questo tipo sono sicuramente adatti per saldature a giro, a T e simili, ovvero saldature in cui l'interfaccia di giunzione risulta essere verticale rispetto all'asse della macchina.

Inoltre, TWI si è occupato anche della progettazione di spalle di utensili che si potessero adattare a diversi materiali e condizioni. Queste differenti geometrie di spalla (Figura 1.6.)

sono state studiate per migliorare l'accoppiamento tra la stessa spalla dell'utensile ed i pezzi in lavorazione, in modo tale da intrappolare il materiale all'interno di particolari rientranze.

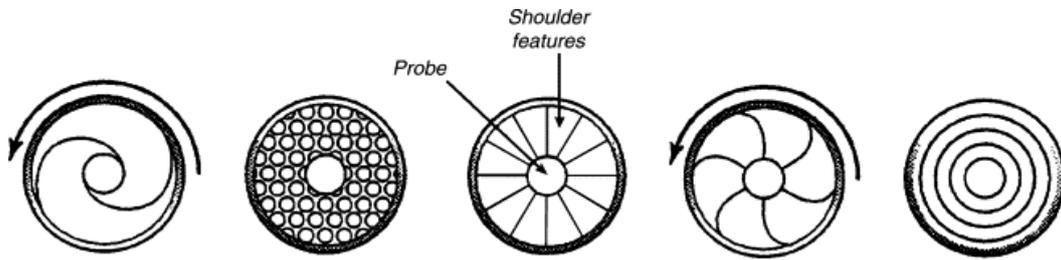


Figura 1.6. Rappresentazione delle differenti geometrie di spalla

1.4. Materiali

La tecnologia di saldatura per FSW è nata come metodo innovativo per saldare materiali metallici. Inizialmente è stata ampiamente utilizzata nell'industria per unire leghe di alluminio di tutti i tipi e, data l'elevata efficienza del processo, successivamente è stato approvato il suo utilizzo anche in materiali differenti come titanio, magnesio e rame. Ne è risultato che questa tecnica presenta un'elevata capacità di saldare leghe leggere, cosa che non accade per le tecniche di saldatura per fusione tradizionali. È proprio per questo motivo che, nel corso del tempo, l'utilizzo di questa tecnologia ha sovrastato l'utilizzo della saldatura tradizionale.

Alla luce di questo, è risultato opportuno esplorare anche il campo delle materie plastiche e dei compositi a matrice metallica (MMC) e si è visto come fosse possibile saldare anche materiali differenti tra loro.

Focalizzando l'attenzione sulle materie plastiche, un materiale largamente utilizzato in questo tipo di lavorazione è sicuramente l'ABS. Si tratta di un materiale polimerico termoplastico ovvero un materiale costituito di polimeri formati da catene lineari, o poco ramificate, non legate l'una con l'altra; per cui, per portarlo ad uno stato viscoso, risulta sufficiente aumentare la temperatura: se riscaldato si ammorbidisce fino a liquefarsi e, se sottoposto ad un successivo raffreddamento, s'indurisce.

Può essere lavorato sulla maggior parte dei macchinari standard: può essere stampato ad iniezione, soffiato o estruso, ma grazie alla bassa temperatura di fusione che possiede, è adatto ad essere lavorato anche mediante stampa 3D.

Si tratta di un materiale ideale per varie applicazioni strutturali grazie alle proprietà fisiche che possiede, ovvero:

- 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 (meccanicamente forte e stabile nel tempo)
- Elevata luminosità superficiale ed eccellente aspetto superficiale

Oltre che buone proprietà fisiche, l'ABS presenta anche ottime proprietà meccaniche: è duro e resistente in natura, pertanto offre un'ottima resistenza agli urti; presenta un'elevata qualità superficiale e delle buone proprietà di isolamento elettrico. L'ABS può essere utilizzato sia in modo rinforzato che non; nel primo caso risulta opportuno apportargli delle modifiche ricorrendo all'aggiunta di additivi o alla variazione del rapporto dei tre monomeri che lo costituiscono: acrilonitrile, butadiene e stirene. In queste condizioni, si potrà parlare di un ABS elettroplaccabile, con un'elevata resistenza al calore e con un elevato impatto.

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

Si può notare, quindi, che le limitazioni non vanno ad influire negativamente sul processo di FSW, pertanto si tratta di un materiale che si presta molto bene a questo tipo di lavorazione.

1.5. Stato attuale della ricerca

Come si è visto nel paragrafo 1.4., la *Friction Stir Welding* negli ultimi decenni, è stata largamente utilizzata per la saldatura di materiali metallici, ma recentemente il campo d'impiego si sta estendendo anche ai materiali polimerici termoplastici.

Uno degli studi più recenti di questa tecnica applicata a delle piastre di ABS ottenute con tecniche di stampa tradizionali è stato effettuato da Reza Bagherian Azhiri et al. [3] e ha previsto l'aggiunta di particelle di nano silice in corrispondenza del giunto di saldatura per rinforzarlo e, quindi, aumentare la sua resistenza a rottura.

Lo studio di questa tecnologia si è basato sull'analisi di esperimenti realizzati a valori differenti di parametri di processo: la velocità di rotazione del perno, la velocità di avanzamento e la variazione del numero di passaggi di saldatura. In questo modo è risultato chiaro come ognuno di questi parametri influisse sulla qualità del giunto finale e come fossero relazionati con le proprietà del materiale quali, resistenza a trazione e durezza.

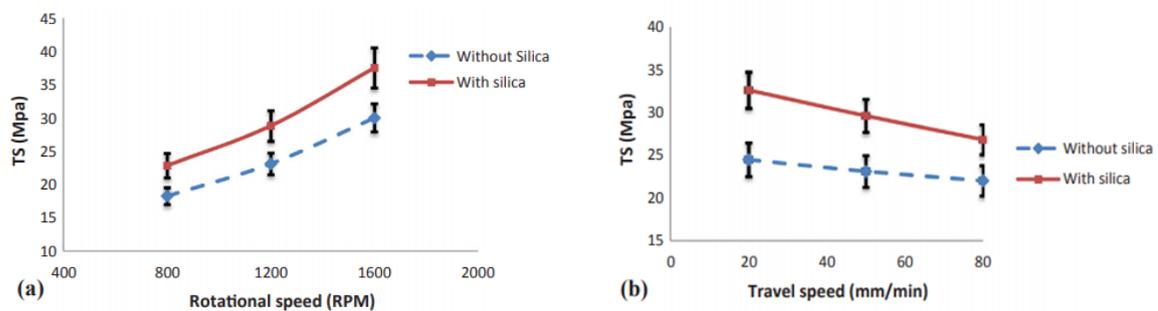
Dai risultati delle prove di trazione è emerso che giunti privi di difetti con caratteristiche ed efficienza volute sono stati realizzati effettuando una saldatura a doppio lato utilizzando una velocità di avanzamento di 20 mm/min e una velocità di rotazione di 1600 rpm, ma si è anche riscontrato che l'aggiunta di un rinforzo in nano silice aumenterebbe del 25,2% la resistenza del giunto. Inoltre, dalle analisi XRD e SEM si evince che, incrementando il numero di passaggi di saldatura da uno a due, si otterrà una distribuzione uniforme della nano silice nella zona interessata dalla saldatura dando origine ad una struttura molto simile ad un composito che aumenta l'efficienza del giunto fino al 98%. Il motivo della scelta di utilizzare la nano silice come nano polvere per migliorare le proprietà meccaniche del giunto è dato dall'elevato valore del modulo di elasticità e dalla buona resistenza, combinazione ottima per l'ABS.

Gli esperimenti di saldatura sono stati effettuati utilizzando una macchina con una potenza massima di 20 CV ed un utensile che presenta una forma cilindrica AISI H13, una spalla con un diametro di 20 mm, un pin filettato con un diametro di 6 mm e mantenendo costanti i valori della profondità e dell'inclinazione del piano, rispettivamente pari a 0,15 mm e 2°.

Lo studio realizzato può essere suddiviso in due fasi principali: nella prima sono stati effettuati degli esperimenti senza l'aggiunta di nano silice ad un solo passaggio di saldatura a differenti valori di velocità di rotazione dell'utensile (800, 1200 e 1600 rpm) e di velocità di avanzamento dell'utensile (20, 50 e 80 mm/min). In seguito, è stato ripetuto lo stesso

numero di esperimenti agli stessi valori di velocità di rotazione e di avanzamento dell'utensile del caso precedente ad un solo passaggio di saldatura, ma con l'aggiunta di polveri di nano silice. In questo modo è stato possibile scoprire come i parametri di processo e l'aggiunta di nano silice abbiano influenzato la resistenza a trazione del giunto. Dai Grafici 1.1. (a) e (b), emerge che l'aggiunta di nano silice aumenta la resistenza meccanica del giunto. Da un punto di vista sperimentale, è da una micrografia SEM della sezione trasversale del giunto che si notano le differenze tra un giunto di ABS saldato con presenza di particelle di nano silice ed uno con assenza di queste polveri.

Nel primo caso si forma una vera e propria struttura composita: si ottiene un modello a strati che provoca un aumento della resistenza a trazione.



Grafici 1.1. Andamento della tensione in funzione della velocità di rotazione dell'utensile (a) e della velocità di avanzamento dell'utensile (b) in assenza ed in presenza di particelle di nano silice nella matrice di ABS

Dopo aver trovato i valori di velocità di rotazione e di traslazione dell'utensile che massimizzavano la resistenza a trazione e quindi ottimizzavano le qualità del giunto, lo studio è progredito con la seconda fase: utilizzando i parametri ottimali, sono stati effettuati degli esperimenti dove la saldatura veniva effettuata a differenti valori di numero di passaggi (1-2-3), con lo scopo di comprendere quale fosse quello che ottimizzasse la qualità del giunto ottenuto.

Da questo secondo studio si è ricavato che realizzando un solo passaggio di saldatura il risultato ottimale si è ottenuto utilizzando un angolo di inclinazione del piano pari a $4,1^\circ$. Effettuando due passaggi di saldatura, invece, la struttura risultava essere molto più uniforme. Per un numero di passaggi pari a 3, invece, il risultato ottimale ottenuto si è verificato in corrispondenza di un valore dell'angolo d'inclinazione del piano pari a $3,2^\circ$. Da un'analisi XRD si è ottenuto che, in quest'ultimo caso, a causa di un eccessivo stress meccanico e termico, si è verificata la presenza di porosità nella matrice ABS che ha distrutto l'uniformità della dispersione di silice. Nel caso di utilizzo di 1 o 2 passaggi, invece, si è notata una dispersione desiderata di nano silice nella matrice; ma dato che nel caso di una

saldatura ad un solo passaggio non si hanno delle caratteristiche uniformi del giunto, la soluzione ottimale risulta essere quella di effettuare una saldatura a due passaggi dove la struttura stratificata è, invece, uniforme. Nel Grafico 1.2. sono rappresentate tutte le curve forza – angolo di inclinazione del sostegno relative ai differenti numeri di passaggi di saldatura effettuati.

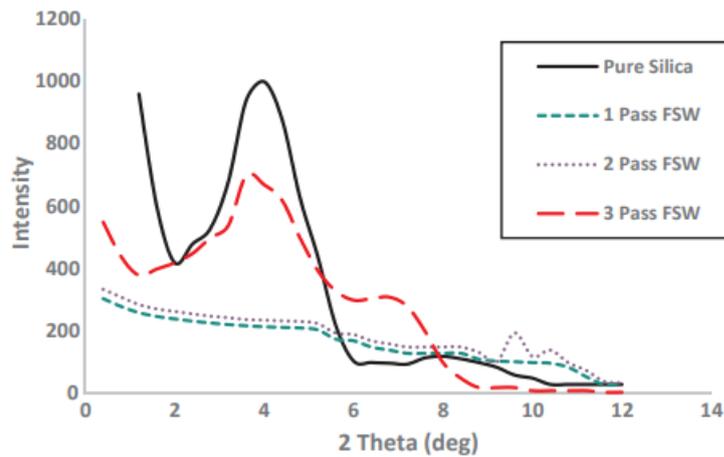


Grafico 1.2. Andamento dei valori ottimali raggiungibili in relazione all'angolo d'inclinazione del supporto al variare del numero di passaggi di saldatura

Confrontando le curve tensione-deformazione dei giunti ottenuti (Grafico 1.3.), si nota che l'efficienza dei giunti ottenuti senza l'aggiunta delle nano polveri è all'incirca pari al 71% di quella del materiale base, mentre quella dei giunti ottenuti con saldatura a doppio passaggio ed aggiunta di nano silice è molto più elevata, in quanto raggiunge valori pari al 98% dell'efficienza totale del materiale base.

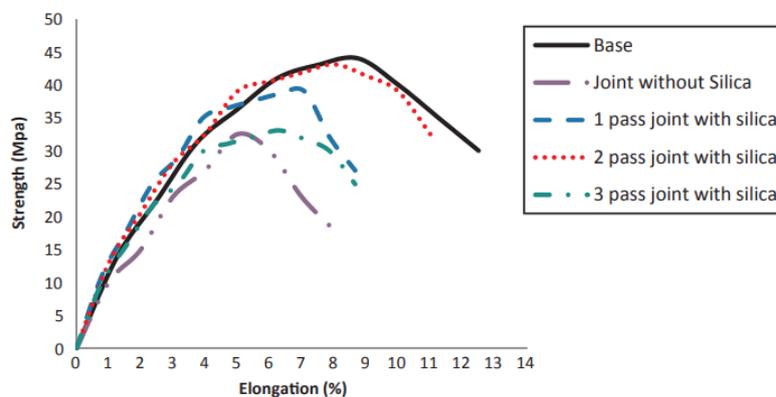


Grafico 1.3. Confronto delle curve tensione-deformazione nelle varie condizioni di saldatura

L'aggiunta di nano silice, inoltre, è considerata come un fattore positivo anche in termini di durezza, in quanto, concorre all'abbassamento della porosità aumentando la durezza. Il Grafico 1.4. illustra il valore che la durezza assume in corrispondenza delle varie condizioni di saldatura.

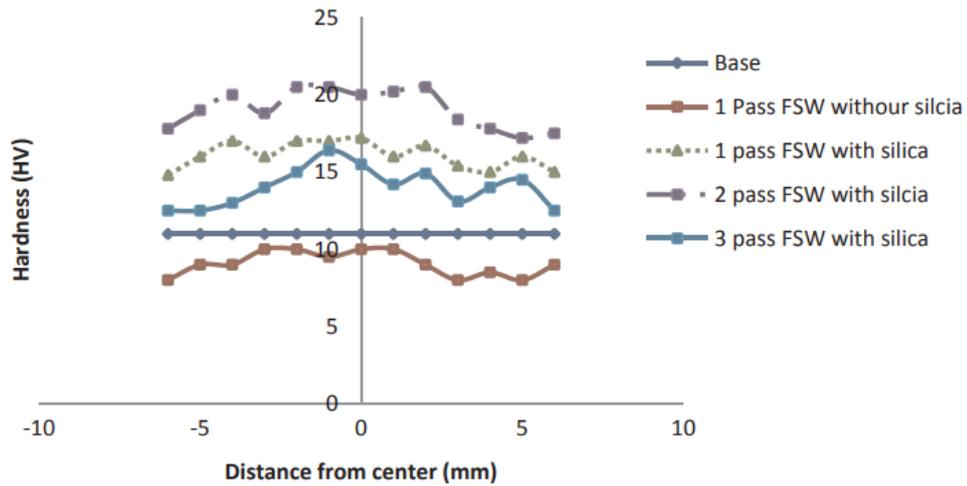


Grafico 1.4. Confronto della durezza dei provini ottenuti nelle varie condizioni di saldatura in relazione alla distanza dal centro del giunto

Capitolo 2 – Tecnologie di Manifattura Additiva

2.1. Generalità

L' *Additive Manufacturing* (AM), conosciuta anche come Manifattura Additiva o stampa 3D, è una tecnologia di produzione innovativa studiata e sviluppata per oltre vent'anni.

Essa racchiude un insieme di tecniche produttive differenti che basano il proprio principio di funzionamento sulla deposizione progressiva di strati di materiale in direzione verticale.

Il vantaggio principale dell'utilizzo di questa tecnologia è quello di riuscire a realizzare degli oggetti che presentino un'elevata complessità geometrica che non potrebbe essere ottenuta tramite delle tecnologie di produzione sottrattive.

Le tecnologie di produzione additiva si discostano da quelle tradizionali, note come *Subtractive Manufacturing*, in quanto non è prevista alcuna rimozione del materiale a partire dal pezzo grezzo: l'oggetto viene realizzato depositando e solidificando soltanto il materiale necessario; questo comporta sicuramente un minor spreco di materiale in quanto scarti o sfridi sono minimi se non nulli.

Con l'introduzione dell'AM è nata la comunicazione tra computer e macchine di lavoro, ottenendo una digitalizzazione e innovazione della manifattura stessa.

Il processo di produzione additiva ha come punto di partenza la realizzazione di un modello 3D dell'oggetto da produrre in un qualsiasi programma CAD che, in seguito, viene convertito in un file STL leggibile dalla stampante 3D. Successivamente, attraverso un software di modellazione, viene effettuata la suddivisione in strati (*layer*) dell'oggetto che possano essere stampati. A questo punto si procede con il processo di stampa e, infine, a seconda dell'utilizzo del prodotto potranno essere effettuate su di esso delle lavorazioni di finitura superficiale.

I processi di AM, ai giorni d'oggi, vengono utilizzati in moltissimi campi come quello aerospaziale, automobilistico, biomedico, energetico, e molti altri.

L'*ASTM International Technical Committee F42*, organismo di normalizzazione statunitense, ha individuato le 7 principali tecniche di AM classificandole in base al tipo di materiale utilizzato, al metodo di deposizione di materiale adottato ed alla modalità di fusione e solidificazione del materiale.

Queste sono:

- VAT POLYMERISATION
- MATERIAL EXTRUSION
- MATERIAL JETTING
- BINDER JETTING
- POWDER BED FUSION
- DIRECT ENERGY DEPOSITION
- SHEET LAMINATION

I materiali che si prestano al meglio a lavorazioni di questo tipo sono i metalli e i polimeri. I primi consentono di ottenere dei prodotti con delle proprietà meccaniche sicuramente molto elevate, ma richiedono delle attrezzature molto più costose; mentre i secondi sono per lo più materiali termoplastici che richiedono sicuramente costi inferiori. Fra i materiali polimerici più utilizzati per queste applicazioni sono presenti l'acido polilattico (PLA), l'acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), il Nylon, il polietilene (HDPE) e l'alcool polivinilico (PVA).

I principali vantaggi che comporta l'utilizzo della manifattura additiva sono: la totale libertà in sede progettuale in quanto non sono imposti limiti alla complessità geometrica del prodotto da realizzare, la rapida realizzazione, l'elevata leggerezza del prodotto, dei costi molto bassi poiché non sono previsti né costi per la realizzazione di stampi o utensili né tantomeno costi aggiuntivi legati alla complessità geometrica ed infine la totale assenza di sfridi.

Gli svantaggi fondamentali che rendono l'oggetto ottenuto non utilizzabile come prodotto finito, ma come prototipo sono: la mancanza di proprietà di utilizzo finale come stabilità termica e chimica e resistenza, la porosità del materiale e l'elevata rugosità. Altri svantaggi sono dati dalla possibilità di realizzare soltanto oggetti di piccole dimensioni e bassi volumi di produzione [4].

2.2. Tecnica FDM

Tra le varie tecnologie di *Additive Manufacturing*, la FDM (*Fused Deposition Modeling*) basa il proprio funzionamento sulla deposizione, strato per strato, di una resina termoplastica malleabile in uno stato semi-solido, estrusa attraverso un apposito ugello di estrusione.

Con questa tecnica, inventata da Scott Trump, fondatore di Stratasys, possono essere realizzati oggetti con qualsiasi geometria e con una precisione estremamente accurata: gli strati possono presentare degli spessori fino a 0,050 mm.

Per la realizzazione di un oggetto mediante questa tecnica risulta necessario l'utilizzo di un ugello riscaldato che rilasci strati di materiale fuso su una struttura di supporto che ha il compito di evitare il collasso del materiale e che alla fine del processo viene rimossa.

Un filamento plastico o un filo metallico srotolato da una bobina fornisce il materiale da estrarre all'ugello. Esso ha il compito di regolare il flusso del materiale e viene riscaldato attraverso degli appositi radiatori che riescono a mantenere la temperatura al di sopra di quella di fusione in modo tale che il materiale riesca a fuoriuscire senza intoppi. Questo può essere traslato sia in direzione orizzontale che verticale da un meccanismo di controllo numerico che segue in modo diretto un software CAM (computer-aided manufacturing).

Il processo inizia con l'estrusione della materia prima sotto forma di un filamento, attraverso l'ugello riscaldato, che viene depositato nella parte inferiore della piattaforma della stampante e solidifica. Successivamente viene estruso un altro filamento di materiale che si deposita sullo strato sottostante fondendosi, per poi solidificare. Procedendo in questo modo, si costruisce l'oggetto strato per strato dal basso verso l'alto.

Utilizzare stampanti 3D specializzate che funzionano grazie alla tecnica FDM e lavorano materiali termoplastici, consente di ottenere prodotti resistenti, durevoli e dimensionalmente stabili con un'elevata ripetibilità ed accuratezza ed un'ottima qualità.

L'utilizzo di questa tecnica comporta dei vantaggi come: costi bassi, facilità d'uso, l'utilizzo di un'ampia gamma di materiali, un'elevata velocità di produzione ed accessibilità.

Tra i principali limiti, invece, vi è la difficoltà nel realizzare oggetti cavi se non tramite l'utilizzo di appositi supporti ed il fatto che, a fine lavorazione, l'oggetto presenti una finitura superficiale grezza con evidenti strati dei filamenti; pertanto, per effettuare miglioramenti saranno necessari procedimenti di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura.

La tecnologia *Fused Deposition Modeling* permette l'utilizzo di materiali speciali come l'Ultem (polietereimmide) per prodotti e attrezzature avanzate per i settori medicale, automobilistico, aerospaziale ed alimentare. Inoltre, risulta essere la tecnica più indicata e, quindi, la più utilizzata per la realizzazione di oggetti in plastica ABS resistente.

La semplicità, affidabilità e convenienza del processo FDM hanno reso la tecnologia di produzione additiva ampiamente riconosciuta e adottata dall'industria, dal mondo accademico e dai consumatori [8].

La figura 2.1. illustra in modo schematico il processo di stampa 3D tramite la tecnica FDM.

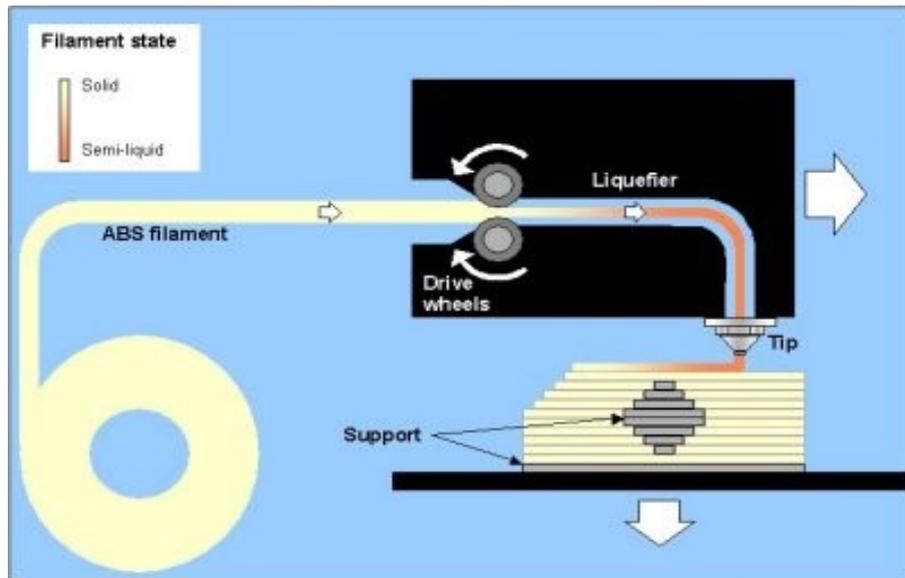


Figura 2.1. Rappresentazione schematica del processo di stampa 3D mediante tecnica FDM

2.3. Confronto tra stampa 3D e tecniche tradizionali di stampa

Le tecnologie di stampa 3D hanno ottenuto uno spazio ormai in tutti i settori produttivi, sostituendo le tecniche di stampa tradizionali come, ad esempio lo stampaggio ad iniezione, comportando importanti vantaggi alle imprese.

Solitamente il settore manifatturiero, per la realizzazione dei suoi prodotti, si è sempre affidato alla tecnica di stampaggio ad iniezione, ovvero una tecnica che prevede l'iniezione di materiale fuso all'interno di uno stampo metallico chiuso che, non appena raffreddato, viene estratto come solido. La difficoltà di questo processo sta nel riuscire a mantenere la temperatura costante per tutta l'estensione dello stampo e nel minimizzare il ciclo produttivo. Le principali differenze tra queste due tecnologie si notano in termini di volume di produzione, costo, velocità e tempistiche.

Per quanto riguarda il volume di produzione, lo stampaggio ad iniezione viene generalmente impiegato per produrre grandi quantità di uno stesso pezzo, infatti lo stesso stampo viene utilizzato più volte per realizzare lo stesso oggetto. In questo modo si avrà una riduzione del volume di parti, un aumento dei costi ed una riduzione della praticità del processo.

La stampa 3D, invece, consente di realizzare un numero ridotto di oggetti indipendentemente dalla geometria che presentano: possono anche essere tutti diversi.

Per quanto riguarda i costi relativi ai processi, lo stampaggio ad iniezione richiede un elevato investimento iniziale per realizzare lo stampo che però potrà essere utilizzato per produrre

migliaia di parti: la dimensione dello stampo e la qualità del materiale utilizzato per ottenerlo influiscono sul costo.

Nel caso di stampa 3D, non è previsto effettuare questa spesa, in quanto l'utilizzo di uno stampo iniziale è sostituito da un file digitale.

Ciò costituisce un grande vantaggio sia economico che produttivo, infatti, una piccola modifica della geometria dell'oggetto da realizzare, nel caso di stampaggio ad iniezione richiede l'utilizzo e quindi l'acquisto di un nuovo stampo, mentre nella stampa 3D è un problema che non sussiste in quanto basta modificare il file.

Inoltre, a differenza dello stampaggio ad iniezione, la stampa 3D di piccoli lotti di produzione non prevede un aumento dei costi.

Per quanto riguarda i tempi e le velocità di produzione, sono degli aspetti di fondamentale importanza per le imprese del settore manifatturiero e non solo.

La realizzazione di un prodotto mediante stampaggio ad iniezione prevede tempistiche variabili.

Infatti, il processo prevede la produzione di un prototipo, lo sviluppo dello stampo e diversi processi di pre-produzione che potrebbero richiedere molto tempo, mentre l'effettivo stampaggio ad iniezione avviene molto rapidamente.

La stampa 3D, invece, ha la capacità di produrre una quantità di parti *just-in-time*, ovvero in tempi brevi.

In modo particolare, la tecnologia di stampa 3D MFJ di HP sta cercando di ridurre i tempi di stampa producendo degli oggetti con velocità dieci volte maggiori rispetto a dei processi di stampa tradizionali.

Di conseguenza si vede una riduzione anche del *time to market*, ovvero il tempo che intercorre fra l'inizio del processo di sviluppo di un nuovo prodotto e la sua commercializzazione [9].

Capitolo 3 – Procedura sperimentale

3.1. Oggetto della sperimentazione

L'oggetto su cui è stato focalizzato lo studio sperimentale è il giunto di saldatura ottenuto per FSW di piastre in ABS realizzate mediante stampa 3D. L'obiettivo da raggiungere nell'esecuzione delle varie prove di saldatura è quello di ottenere un giunto che abbia uno spessore circa pari a quello delle lamine di partenza (2 mm), mentre lo scopo dello studio è quello di valutare l'effetto dei parametri di processo (velocità di rotazione e di avanzamento dell'utensile ed affondamento dell'utensile nel materiale) sulla qualità del giunto.

3.2. Stampante 3D

Le piastre saldate per FSW sono state ottenute tramite stampa 3D e la stampante utilizzata è una Fortus 250mc di Stratasys (Figura 3.1.). Si tratta di una stampante di medie dimensioni con la capacità di realizzare parti complesse in modo efficiente ed efficace attraverso la tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling).

Inoltre, i sistemi di stampa Fortus, grazie alla loro agilità, sono in grado di lavorare 10 materiali differenti e sono dotati di interfacce e controlli software facilmente utilizzabili.

Produrre degli oggetti complessi che abbiano elevate proprietà significa poter includere in modo semplice degli hardware, dei circuiti ed altri materiali non termoplastici nei componenti prodotti, con delle minime interruzioni per le varie operazioni di configurazione.



Figura 3.1. Stampante 3D Fortus 250 mc di Stratasys

È possibile riassumere le caratteristiche principali della stampante utilizzata nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1. Elenco delle principali caratteristiche della stampante 3D utilizzata

Materiali modello	ABS Plus-P430
Materiali supporto	Solubile
Camera di lavoro	254*254*305 mm
Dimensioni macchina	838 x 737 x 1.143 mm

3.3. Processo di FSW

Lo studio effettuato, in un primo momento, ha previsto la realizzazione di 10 prove di saldatura con 5 condizioni differenti ottenute variando i parametri principali sui quali si basa questo processo, ovvero le velocità di rotazione (ω) e di avanzamento (v) dell'utensile, l'affondamento dell'utensile nel materiale ed il *dwelling time*.

Il processo di saldatura ha previsto l'utilizzo di un utensile *pin-less* ovvero senza pin. Ciò significa che è costituito soltanto da un cilindro (*shoulder*) di diametro pari a 15 mm che ruota, trasla e penetra nel materiale da saldare che è fissato su un sostegno inclinato di un angolo pari a 2° grazie a degli appositi sistemi di bloccaggio. Il motivo di questa scelta è dato dal fatto che lo spessore delle lamine è molto ridotto (2 mm), quindi 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 all'utilizzo del pin, in quanto il suo effetto sarebbe trascurabile. All'aumentare del diametro dello *shoulder*, l'area di contatto con le piastre aumenta, per cui l'attrito che si genererà sarà maggiore e di conseguenza aumenterà anche il calore prodotto. 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 anche perché si evitano elevati scarti di materiale e problemi legati all'usura.

L'utensile, durante il processo, grazie alla combinazione di moto rotatorio e traslatorio, lascerà delle impronte semicircolari che avranno dimensioni minori dell'utensile stesso in quanto la parte più grande va inserita all'interno del mandrino della macchina e quella più piccola entra a contatto con il materiale.

Si riesce sempre a capire ad occhio nudo quale sia la direzione di saldatura e quindi ad individuare il punto iniziale e quello finale per un semplice motivo: se fosse presente il pin, in corrispondenza del punto finale è sempre presente un buco, se invece non fosse presente, come in questo caso, c'è un'impronta circolare completa.

La prima prova di saldatura è stata effettuata utilizzando una velocità di rotazione dell'utensile pari ad 800 rpm, una velocità di avanzamento dell'utensile pari a 40 mm/min, un affondamento di 0,4 mm ed un *dwellling time* pari a 10 s. Le prove successive sono state eseguite variando i valori della velocità di rotazione o di avanzamento dell'utensile e l'affondamento, mentre il *dwellling time* ovvero il tempo iniziale in cui l'utensile viene fatto ruotare ma non affondare permettendo al materiale di riscaldarsi è rimasto costante. Da questa prima prova si è ottenuto un giunto di spessore pari a 1,92 mm: risultato sicuramente positivo in quanto si discosta dal valore dello spessore delle piastre di una misura pari a soltanto 0,08 mm. È chiaro che per notare al meglio gli effetti dei vari parametri sulle proprietà del giunto occorre effettuare più prove dove tutti i parametri rimangono costanti tranne uno e ripetere la stessa cosa per tutti.

La Tabella 3.2. riporta le condizioni in cui sono state effettuate le varie prove.

Tabella 3.2. Valori dei parametri di processo utilizzati per ogni prova di saldatura effettuata

<i>Prove</i>	ω [rpm]	v $\left[\frac{mm}{min}\right]$	<i>Affondamento</i> [mm]	<i>Dwellling time</i> [s]
1	800	40	0,4	10
2	1250	20	0,3	10
3	1250	20	0,4	10
4	1250	20	0,5	10
5	1250	40	0,4	10

In questo modo, confrontando la prova effettuata nella prima condizione e quella nell'ultima è stato possibile vedere l'influenza della velocità di rotazione sulla qualità del giunto; per

notare come influisse la velocità di avanzamento, invece, è risultato opportuno confrontare la prova di saldatura effettuata nella terza condizione con quella effettuata nell'ultima condizione. Infine, per verificare l'influenza dell'affondamento sono state confrontate le prove di saldatura effettuate nella seconda, nella terza e nella quarta condizione sopraelencate.

Per ottenere un giunto di elevata qualità occorre utilizzare una pressione dell'utensile sulle piastre elevata che provoca un affondamento dell'utensile nel materiale maggiore. Si dovrà prestare attenzione però a non utilizzare valori di pressione e affondamento troppo elevati perché si potrebbe creare un gradino in cui si addenseranno le sollecitazioni e ciò potrebbe comportare la formazione di cricche.

3.4. Provini

Dalle piastre saldate nelle varie condizioni, sono stati ricavati dei provini tramite una tecnica di taglio a getto d'acqua. In questo modo è stato possibile ottenere più provini per ogni condizione di saldatura, così da poterli sottoporre sia a prove di trazione che a prove di piegatura.

Le dimensioni dei provini si attengono alle normative utilizzate per le verifiche effettuate, rispettivamente la ISO 527-1/2 per la trazione e la ISO 178 per la piegatura.

Solitamente i provini di trazione possono presentare due geometrie differenti: quella ad osso di cane o quella classica (Figura 3.2.).

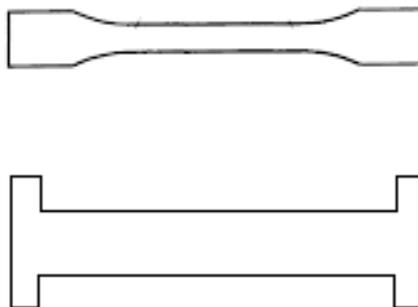


Figura 3.2. Provini di trazione: geometria classica (sopra) e geometria ad osso di cane (sotto)

In questo caso, sono stati utilizzati dei provini a geometria classica dove soltanto la parte centrale è interessata dalla saldatura, quindi piuttosto che utilizzare un provino di elevate dimensioni, è stato utilizzato un provino di dimensioni minori dove il giunto saldato

ricopriva un'area maggiore in relazione alle dimensioni del provino stesso, pertanto si è riusciti a notare meglio il comportamento del giunto saldato.

Risulta essere di fondamentale importanza sapere quale sia la posizione del provino in relazione al giunto poiché le parti iniziale e finale del giunto, essendo delle zone di transizione, potranno non essere prese in considerazione.

La Figura 3.3. mostra la saldatura realizzata nelle condizioni di 1250-20-04 e i 3 provini di trazione da essa ricavati: i provini A e C si trovano rispettivamente nelle zone di inizio e fine saldatura, mentre il provino B, su cui si focalizzerà lo studio, si trova in corrispondenza della zona centrale del giunto.

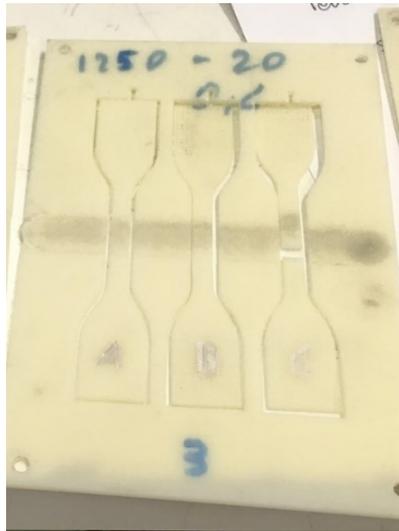


Figura 3.3. Rappresentazione della saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-04 e dei provini da essa ricavati

Oltre ai provini ricavati dalle saldature, è stato sottoposto a prova di trazione un provino in ABS realizzato mediante la stampa 3D, ma non saldato.

I provini sottoposti a piegatura, invece, presentano una geometria rettangolare e la saldatura è collocata in posizione centrale. Anche in questo caso, oltre ai provini ricavati dalle saldature, sono stati sottoposti a piegatura dei provini non saldati, ma stampati in due modi differenti che possono essere distinti in provino “piatto” e provino “lungo”.

Ciò che cambia fra i due è il metodo di deposizione dei vari strati di materiale durante il processo di stampa 3D: nel provino “piatto” ogni strato di materiale occupa un'area che corrisponde con la superficie maggiore del provino stesso e la deposizione degli strati termina quando si raggiunge un valore di altezza pari allo spessore del provino.

Nella stampa del provino “lungo”, invece, il materiale depositato occupa un’area che coincide con lo spessore del provino e la deposizione dei vari strati di materiale si verifica fino a che non si raggiunge un’altezza pari alla larghezza del provino.

Quest’ultimo metodo è stato adottato per la realizzazione di tutte le piastre.

Le Figure 3.4. e 3.5. mostrano le differenze tra il provino “piatto” e quello “lungo” da un punto di vista strutturale.

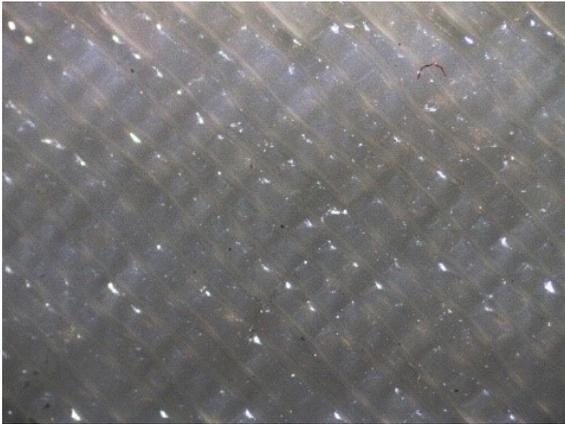


Figura 3.4. Struttura del provino in ABS “piatto”

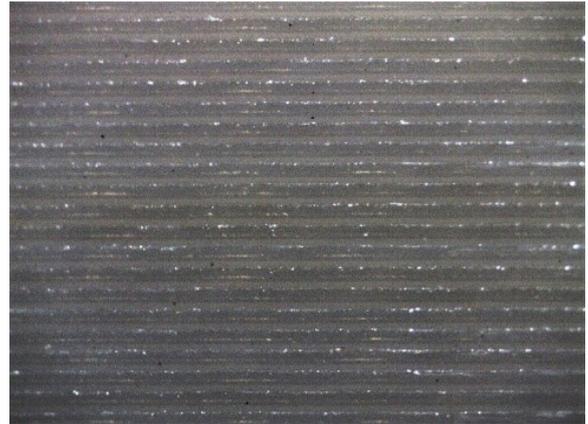


Figura 3.5. Struttura del provino in ABS “lungo”

3.5. Prove di trazione

Una volta ottenuti, i provini sono stati sottoposti sia a delle prove di verifica a trazione che a piegatura, focalizzando l’attenzione sulle seconde.

Generalmente la prova di trazione, oltre a caratterizzare il materiale, fornisce una descrizione qualitativa del comportamento al flusso plastico.

Durante questa prova, il provino subisce l’azione di un carico mono assiale che aumenta sempre di più, innescando un processo di deformazione che si sviluppa attraverso le seguenti fasi: comportamento elastico, snervamento (formazione di micro-cricche), comportamento plastico, strizione (riduzione sezione) e rottura; in questo modo sarà possibile misurare la resistenza a rottura del materiale [10].

Nel caso specifico analizzato, dalle prove di trazione effettuate sui provini saldati nelle varie condizioni, è stato possibile notare come i differenti valori di velocità di rotazione dell’utensile, velocità di avanzamento dell’utensile e affondamento dell’utensile nel materiale influissero sulle qualità del giunto in termini di tensione e deformazione.

Per passare dai valori di forza applicata sul provino ed allungamento del provino a valori di tensione e deformazione è stato necessario avvalersi delle relazioni indicate nella normativa

utilizzata come riferimento per l'esecuzione delle prove, ovvero la Normativa ISO 527-1 (o ASTM D638) per prove standard che verificano le proprietà di trazione delle materie plastiche.

Le relazioni sono le seguenti:

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

con,

- ε_t deformazione a trazione
- σ_t tensione a trazione

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

La realizzazione delle prove ha richiesto l'utilizzo di una macchina di prova universale MTS 810 con allestimento per la verifica a trazione (Figura 3.6.). Si tratta di una macchina costituita da due strutture: una fissa ed una mobile. Esse presentano degli appositi morsetti necessari per afferrare il provino che viene posto in direzione verticale. La struttura superiore è fissa, mentre quella inferiore è mobile e trasla verso il basso provocando un allungamento del provino fino a che non si verifica la rottura.



Figura 3.6. Rappresentazione della macchina MTS 810 utilizzata per la verifica dei provini a trazione

Le prime prove di trazione sono state effettuate utilizzando una velocità di traslazione della struttura mobile pari a 0,02 mm/s e si è notato che la durata delle prove fosse ridotta poiché i provini raggiungevano quasi immediatamente il punto di rottura.

Dopo aver ottenuto questo risultato, le prove successive sono state realizzate utilizzando dei valori di velocità di prova inferiori, in modo tale da poter notare meglio il comportamento del provino prima che si verificasse la rottura.

Complessivamente sono stati sottoposti a prova di trazione dieci provini: i provini B e C per ogni saldatura ad eccezione di una ed un provino in ABS stampato ma non saldato.

Grazie al collegamento del macchinario ad una scheda di acquisizione a sua volta collegata ad un computer, è stato possibile acquisire un elevato numero di dati per ogni prova, in seguito utilizzato per costruire un grafico $\sigma - \varepsilon$ su Excel e studiare il comportamento dei vari provini.

Si è potuto osservare, quindi, quale fosse il valore massimo di tensione raggiunto da ogni provino ed il relativo valore di deformazione massima.

3.6. Prove di piegatura

La piegatura è uno dei processi più comuni e maggiormente utilizzati per ottenere delle variazioni di geometria soprattutto nei materiali metallici. Questa modifica della forma di una lamiera viene realizzata attraverso un'azione di flessione che origina delle deformazioni permanenti. Si tratta di un processo realizzabile su lamiere di materiali che presentano un comportamento plastico tale da non determinare evidenti rotture in corrispondenza della piega. Grazie a questo processo risulta possibile realizzare sia delle geometrie semplici che molto complesse non soltanto su lamiere metalliche ma anche su semilavorati di vario tipo. La teoria su cui si basa questo processo prevede la presenza di un asse neutro al centro della lamiera che si deforma senza allungarsi né contrarsi. Ciò, però, vale soltanto per valori del rapporto tra raggio interno di piegatura e spessore di lamiera elevati. La metà dello spessore della lamiera che entra a contatto con il punzone è sottoposta ad una compressione, mentre l'altra metà è sottoposta ad una trazione.

Il processo di piegatura a V, nello specifico, prevede l'utilizzo di una matrice ed un punzone: la lamiera viene appoggiata sulla matrice che presenta un'apposita cavità all'interno della quale sarà costretta la lamiera nel momento in cui si verifica la corsa dall'alto verso il basso del punzone.

Durante la piegatura si possono distinguere due fasi: la piegatura in aria che termina nel momento in cui le ali della lamiera sono tangenti alle facce della matrice e la coniatura dove si verifica un contatto punzone-lamiera-matrice esteso a tutta la superficie esterna ed interna della lamiera.

La Figura 3.7. mostra in modo schematico il processo di piegatura e le due fasi principali [4].

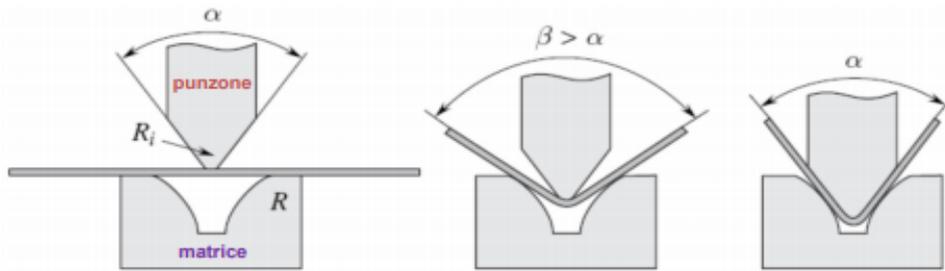


Figura 3.7. Schema del processo di piegatura, piegatura in aria, coniatura

Anche se questo processo sembrerebbe particolarmente semplice, in realtà potrebbe comportare dei problemi legati allo stato di sollecitazione che si crea all'interno dei componenti piegati come: il ritorno elastico, l'angolo finale di piegatura, i limiti di formabilità del materiale, l'influenza delle lavorazioni effettuate precedentemente per deformazione plastica del materiale da piegare e conseguentemente anche il comportamento del materiale da un punto di vista meccanico e metallurgico.

Le prove di piegatura, invece, sono delle prove sperimentali che vengono realizzate con la stessa procedura utilizzata nella tecnica di piegatura, ma con lo scopo di studiare la duttilità di un materiale o di una saldatura e come le caratteristiche o i parametri di processo influiscano su di essa.

Nel caso specifico di studio del comportamento meccanico di giunti saldati in FSW di piastre in ABS, sono state effettuate delle prove di piegatura "a tre punti".

Si tratta di una tecnica che, per essere effettuata, richiede l'utilizzo di una macchina di prova universale MTS 810 allestita per verifiche a piegatura. È costituita da una struttura fissa ed una mobile: due cilindri distanti 32 mm vengono attaccati alla matrice (struttura inferiore mobile) in corrispondenza della parte superiore, mentre in corrispondenza della parte inferiore della struttura superiore è attaccato un solo cilindro posto a metà tra gli altri due: questi tre cilindri (con diametro di sezione < 10 mm) rappresentano i tre punti che danno il nome alla tipologia di piegatura.

La Figura 3.8. mostra la macchina utilizzata per verificare a piegatura i provini.



Figura 3.8. Rappresentazione della macchina di prova universale MTS 810 utilizzata per la verifica dei provini a piegatura

In primo luogo, il provino viene appoggiato sui due rulli rivolgendo il lato che è stato a contatto con lo *shoulder* verso il basso mantenendo il cordone di saldatura in posizione centrale: in questo modo, l'altro lato del provino, che durante la saldatura non è stato a contatto con l'utensile, e che presenta quindi una luce, entra a contatto con il punzone in quanto deve essere sottoposto a compressione. Il lato che presenta il giunto saldato sarà invece sottoposto a trazione.

Successivamente, mantenendo il punzone fisso ad una determinata altezza, viene fatta traslare la matrice verso l'alto e raggiunta una certa quota, si nota che il provino è compreso fra i 3 cilindri; quindi, facendo traslare ulteriormente la matrice, si ottiene la piegatura del provino fino ad arrivare al punto di rottura.

Le Figure 3.9. e 3.10. rappresentano rispettivamente l'inizio e la fine del processo di piegatura.

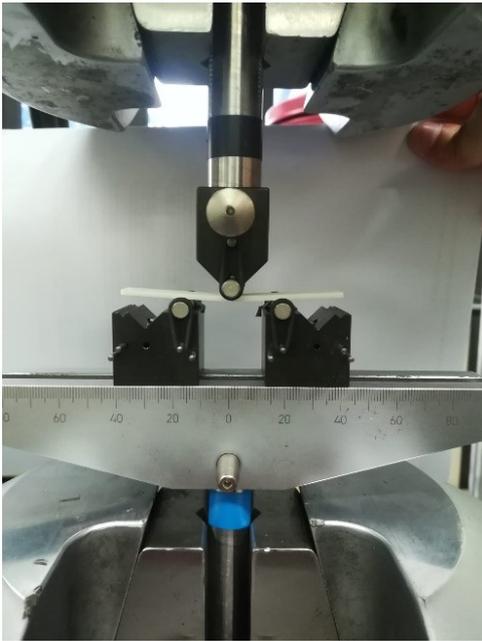
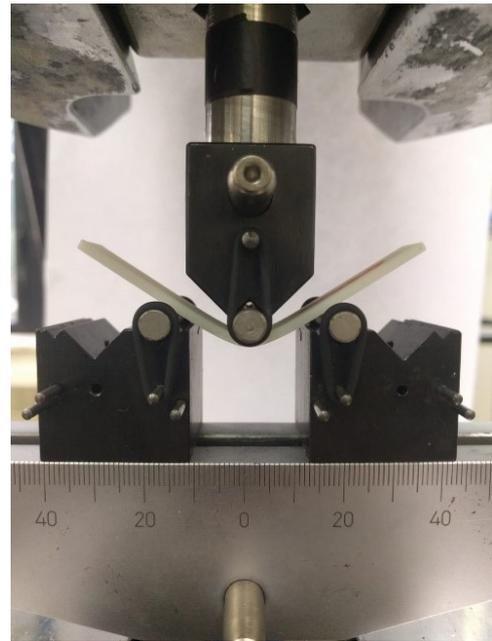


Figura 3.9. Inizio della prova di piegatura



3.10. Fine della prova di piegatura

Collegando la macchina che ha eseguito la piegatura ad una scheda di acquisizione a sua volta collegata ad un computer, attraverso un apposito software, è stato possibile effettuare un elevato numero di acquisizioni durante le prove per poi riportare i dati ad esse associati in un grafico Excel Forza-Spostamento dove la forza considerata è quella esercitata dal punzone sul provino, mentre lo spostamento considerato rappresenta la corsa del punzone. Per studiare il comportamento del materiale in termini di tensione e deformazione, è stato opportuno trasformare il grafico Forza – Spostamento in un grafico $\sigma - \varepsilon$ attraverso delle relazioni imposte dalla normativa utilizzata.

Si tratta della Normativa ISO 178 (o ASTM D790) per prove standard che verificano le proprietà flessionali di materie plastiche rinforzate e non e dei materiali isolanti elettrici: non è, quindi, specifica per i giunti saldati, ma per l'ABS monolitica.

Le relazioni utilizzate sono le seguenti:

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

con,

- ε_f deformazione flessionale
- σ_f tensione flessionale

Per poterle applicare è risultato necessario conoscere la distanza tra i due cilindri L , lo spessore d e la lunghezza b del provino, la forza P e lo spostamento D .

L'obiettivo dello studio è stato quello di misurare la corsa del punzone prima che si verificasse la rottura.

In questo modo, è stato possibile determinare come questi parametri influissero sulle proprietà del giunto saldato in termini di tensione e deformazione massima a flessione e quindi sulla corsa del punzone e quali fossero le condizioni di saldatura ottimali.

Oltre ai provini saldati, sono stati sottoposti a prove di piegatura due provini non saldati, ma ottenuti con la stampante 3D tramite due differenti modalità di stratificazioni del materiale, come specificato nel paragrafo 4.3.

Di conseguenza, si è riusciti a notare come anche questo influisse sulle proprietà meccaniche del materiale consentendo di stabilire quale, fra i due, fosse quello con prestazioni migliori.

3.7. Stereomicroscopio

Dopo aver effettuato le verifiche a trazione e piegatura, i provini sono stati osservati ed analizzati allo stereomicroscopio per notarne al meglio tutte le caratteristiche strutturali e superficiali soprattutto in corrispondenza del giunto e dei punti di rottura.

Lo stereomicroscopio utilizzato è un Leica EZ4 D (Figura 3.11.). Si tratta di uno stereomicroscopio che offre uno zoom 4,4:1 ad elevata qualità, una brillante illuminazione a LED della durata di oltre venti anni che permetterà di risparmiare tempo e denaro nella sostituzione di lampadine.

I 7 LED presenti forniscono una luce sia incidente che obliqua trasmessa per illuminazione e contrasto di elevata qualità.

Inoltre, è integrata allo stereomicroscopio una fotocamera digitale che consente la ripresa rapida di un video in tempo reale su uno schermo di un computer o su una televisione analogica, grazie al trasferimento da stereo a microscopio USB.

Il software utilizzato, compatibile con lo stereomicroscopio Leica EZ4 D, è il Leica LAS EZ. Esso guida l'utente attraverso le impostazioni della fotocamera e nelle impostazioni dell'offuscamento affinché si possano acquisire delle immagini di elevata qualità e per effettuare facilmente delle misurazioni di base e delle eventuali annotazioni. Offre, inoltre, una piattaforma di facile utilizzo per applicazioni nel campo dell'istruzione di base, dell'industria e delle scienze biologiche.



Figura 3.11. Stereomicroscopio Leica EZ4 D

Capitolo 4 – Risultati e discussioni

4.1. Risultati delle prove di trazione

Una volta effettuate le prove di trazione, mettendo a confronto le curve $\sigma - \varepsilon$ ottenute, e quindi i valori di tensione e deformazione massima, è stato possibile notare l'effetto dei parametri di processo sulla qualità del giunto.

Inoltre, dato che per ogni saldatura sono stati sottoposti a trazione i provini B e C, si è notato come variassero le proprietà del giunto a seconda della zona di saldatura considerata (centrale o transitoria). Infatti, uno dei risultati ottenuti è che il provino B, corrispondente alla zona centrale del giunto, abbia risentito molto meno dell'effetto bordo dato dalle numerose variazioni termiche rispetto al provino C.

Nella Tabella 4.1. sono riportati tutti i valori numerici di tensione massima e deformazione massima raggiunta nelle prove di trazione dai vari provini.

Tabella 4.1. Valori numerici relativi a tensione massima a trazione e deformazione massima dei provini sottoposti a verifica

Nome provino	ε_{max}	σ_{max} [MPa]
800-40-04 B	0,01823	14,101
800-40-04 C	0,01548	10,578
1250-20-03 C	0,01804	17,062
1250-20-04 B	0,02868	30,049
1250-20-04 C	0,02342	24,404
1250-20-05 B	0,0203	19,581
1250-20-05 C	0,01853	17,900
1250-40-04 B	0,01931	18,871
1250-40-04 C	0,01921	18,868
Provino ABS	0,0395	30,65

Dai risultati ottenuti, è possibile notare che il provino C di ogni prova presenti un valore di tensione massima a trazione e di deformazione massima sensibilmente inferiori rispetto agli stessi valori relativi al provino B: ciò significa che la saldatura in corrispondenza della zona centrale presenta una resistenza a rottura maggiore rispetto a quella raggiunta in corrispondenza della zona di transizione.

Altro risultato che non va sicuramente trascurato è il fatto che il provino B ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-04 è quello che presenta una resistenza a rottura quasi pari a quella del provino in ABS non saldato, per cui si può parlare di un giunto di elevata qualità. Invece, in termini di deformazione, nessun provino presenta un valore di deformazione massima e quindi di flessibilità confrontabile a quello del provino non saldato. È possibile confrontare tutte le curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai vari provini nel Grafico 4.1.

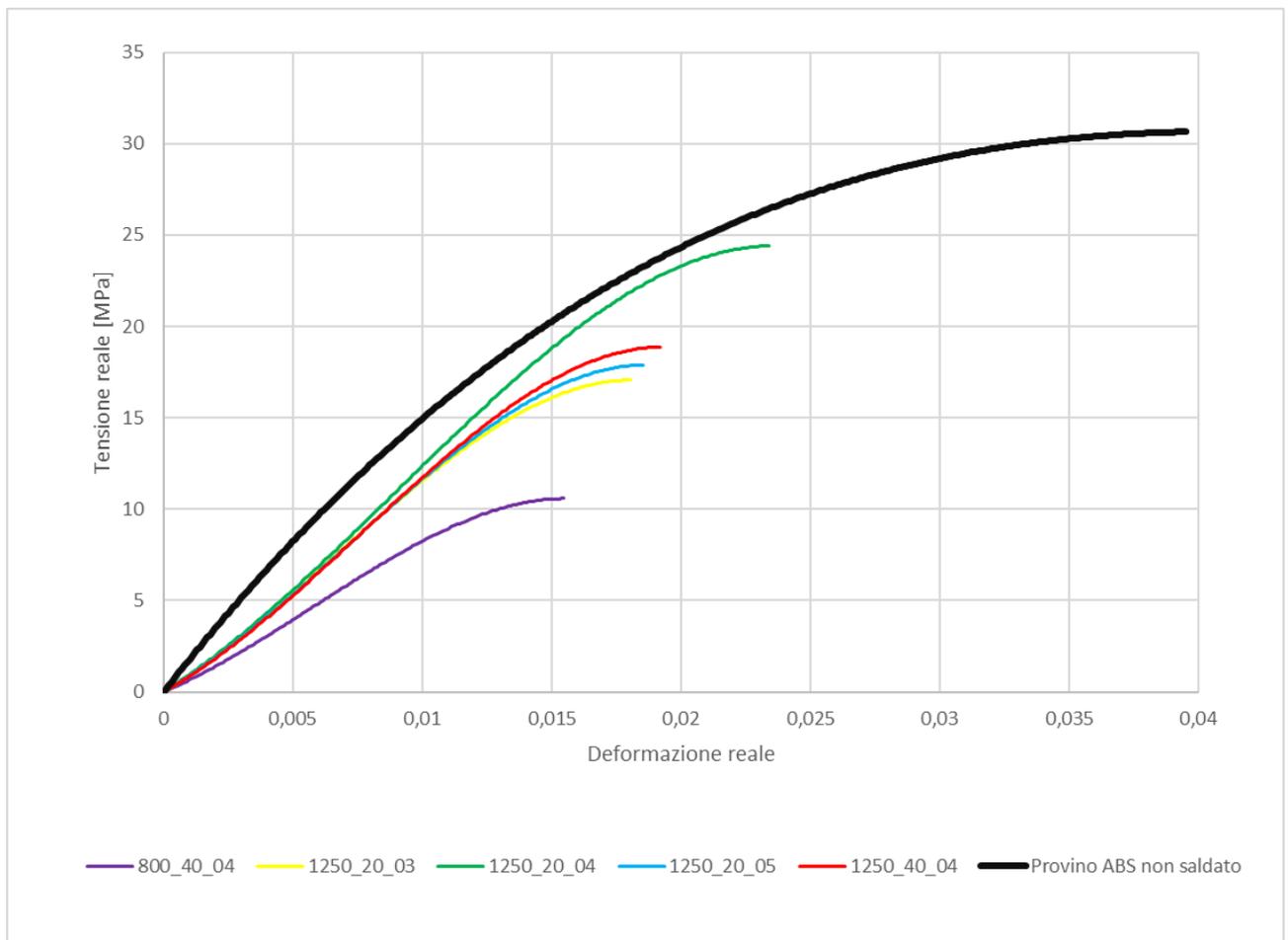


Grafico 4.1. Confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini C ricavati dalle saldature effettuate nelle 5 condizioni e al provino in ABS non saldato

Dai risultati riportati nella Tabella 4.1. e dal confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ nel Grafico 4.1., è possibile individuare come i parametri di processo influiscano sulle qualità del giunto.

- Per quanto riguarda la *velocità di rotazione* dell'utensile, confrontando la prima e l'ultima prova si verifica che un suo aumento provoca l'aumento della resistenza a rottura del provino con conseguente maggior flessibilità.
- Confrontando la terza e l'ultima prova, invece, si riesce a notare come una diminuzione della *velocità di avanzamento* dell'utensile comporti un giunto di qualità maggiori in quanto sia la resistenza a rottura che la sua flessibilità risultano essere maggiori.
- Infine, il valore di *affondamento* che massimizza la resistenza a rottura e la flessibilità del giunto è di 0,4 mm, ovvero il valore intermedio fra i tre utilizzati. Questo risultato è stato ottenuto confrontando la seconda, la terza e la quarta prova.

Un affondamento di 0,3 mm comporta una saldatura che interessa una minima parte dello spessore, mentre un affondamento di 0,5 mm prevede la presenza di un gradino in corrispondenza del quale si potrebbe verificare un addensamento delle tensioni comportando la formazione di eventuali cricche.

Da questi risultati è possibile individuare la condizione di saldatura che ottimizza le qualità del giunto e risulta essere la 1250-20-04 in quanto la velocità di rotazione dell'utensile è elevata, la velocità di avanzamento dell'utensile è bassa e l'affondamento è intermedio. Si tratta della cosiddetta “fase più calda” in quanto, a causa dell'elevata velocità di rotazione il quantitativo di calore prodotto è elevato e, per il basso valore di velocità di avanzamento, viene dissipato lentamente per cui il calore riesce ad interessare una gran parte dello spessore del provino.

4.2. Risultati delle prove di piegatura

Per avere una visione completa delle caratteristiche del giunto saldato è stato opportuno conoscere anche i risultati ottenuti dalle prove di trazione, ma l'attenzione dello studio è stata focalizzata sulle prove di piegatura e sui risultati da esse ottenuti.

In un primo momento, con i dati acquisiti, sono stati realizzati dei grafici Excel Forza-Spostamento dove la forza considerata è quella esercitata dal punzone sul provino e lo

spostamento coincide con la corsa del punzone. In questo modo, è stato possibile misurare la corsa effettuata dal punzone prima che si verificasse la rottura.

I risultati ottenuti da queste prove in termini numerici sono riportati nella Tabella 4.2.

Tabella 4.2. Valori numerici relativi alla forza esercitata dal punzone e alla corsa effettuata dal punzone prima che si verifichi la rottura per tutti i provini sottoposti a verifica

<i>Nome provino</i>	<i>Spostamento massimo [mm]</i>	<i>Forza massima [kN]</i>
800-40-04	4,548	0,0453
1250-20-03	5,342	0,0439
1250-20-04	3,123	0,0710
1250-20-05	3,249	0,0333
1250-40-04	5,784	0,0423
ABS "piatto"	4,674	0,0552
ABS "lungo"	4,451	0,0500

A contrario della prova di trazione, in questo caso soltanto un provino per ogni saldatura è stato sottoposto a verifica, per cui non si possono notare eventuali differenze riguardo il comportamento del giunto nelle varie zone di saldatura (zona centrale e zona di transizione). Risulta possibile, però, confrontare le proprietà di un provino ricavato dalla saldatura con quelle di un provino non saldato, ma stampato in due modi differenti.

Dalla Tabella 4.2., si evince che le grandezze Forza e Spostamento non variano in maniera correlata fra loro, ma totalmente indipendente.

In primo luogo, si nota che le condizioni di saldatura che massimizzano la corsa del punzone e quindi la resistenza del provino sono: una velocità di rotazione dell'utensile pari a 1250 rpm, una velocità di avanzamento dell'utensile pari a 40 mm/min ed un affondamento dell'utensile nel materiale pari a 0,4 mm. In corrispondenza di questa condizione, però, non si è raggiunto il valore massimo di forza del punzone applicata al provino.

Dal Grafico 4.2. è possibile confrontare tutti gli andamenti delle curve F – S dei provini ottenuti nelle varie condizioni di saldatura e di quelli non saldati.

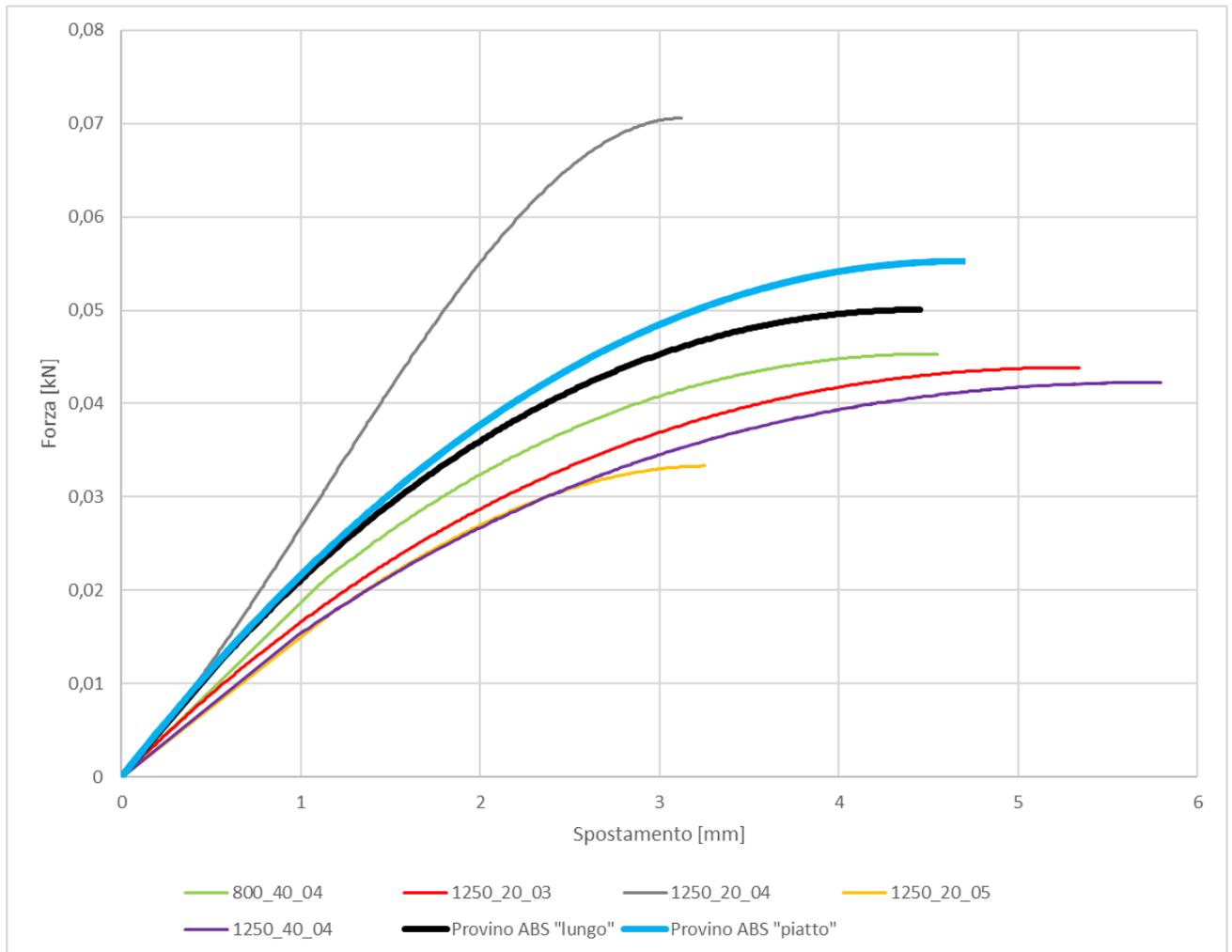


Grafico 4.2. Confronto delle curve F-S relative ai provini ricavati dalle saldature effettuate nelle 5 condizioni e ai provini in ABS non saldati e stampati in due modalità differenti

Tutte le curve presentano un andamento molto simile, in termini geometrici, a parte quella relativa al provino saldato nelle condizioni di 1250-20-04 che presenta una forza massima cui è sottoposta molto più elevata.

Infatti, il valore maggiore di forza massima viene raggiunto proprio da questo provino a cui corrisponde, però, un valore di corsa del punzone inferiore rispetto a quello massimo raggiunto. In altre parole, alcune piastre saldate possono essere sottoposte ad una curvatura maggiore ma con l'applicazione di una forza minore.

A questo punto, risulta opportuno confrontare le varie prove in termini di tensione massima a flessione e deformazione massima flessionale. Sicuramente, dato che i valori di σ_f ed ε_f dipendono linearmente da quelli di F ed S, presenteranno degli andamenti molto simili.

Tutti i risultati ottenuti in termini numerici di tensione e deformazione sono riportati nella Tabella 4.3.

Tabella 4.3. Valori massimi relativi alla tensione a flessione ed alla deformazione di tutti i provini studiati

Nome provino	ϵ_{max}	σ_{max} [MPa]
800-40-04	0,049	51,28
1250-20-03	0,058	49,62
1250-20-04	0,034	79,84
1250-20-05	0,036	67,32
1250-40-04	0,063	47,42
ABS "piatto"	0,060	43,14
ABS "lungo"	0,051	49,37

Come prima cosa si può notare che il provino che presenta la tensione massima a flessione maggiore è quello ricavato dalla saldatura nelle condizioni di velocità di rotazione dell'utensile di 1250 rpm, di velocità di avanzamento dell'utensile di 20 mm/min e di affondamento pari a 0,4 mm.

A questo valore di tensione, però, non corrisponde il valore massimo di deformazione a flessione, per cui si tratta di un provino con elevata resistenza a flessione, ma con bassa flessibilità.

Questo provino e quelli ricavati dalle saldature effettuate nelle condizioni di 800-40-04 e 1250-20-05, presentano una resistenza a flessione addirittura superiore a quella dei provini in ABS non saldati. Ciò probabilmente deriva dal fatto che il calore fornito dall'utensile durante il processo compatti maggiormente il materiale riempiendo i vuoti presenti nelle piastre lasciati dalla stampa 3D, conferendogli un'elevata resistenza. Si tratta, però, di un aspetto che necessita di essere ulteriormente investigato.

Nel Grafico 4.3. è possibile valutare le differenze dei comportamenti dei provini ottenuti dalle saldature effettuate in termini di tensione flessionale e deformazione flessionale.

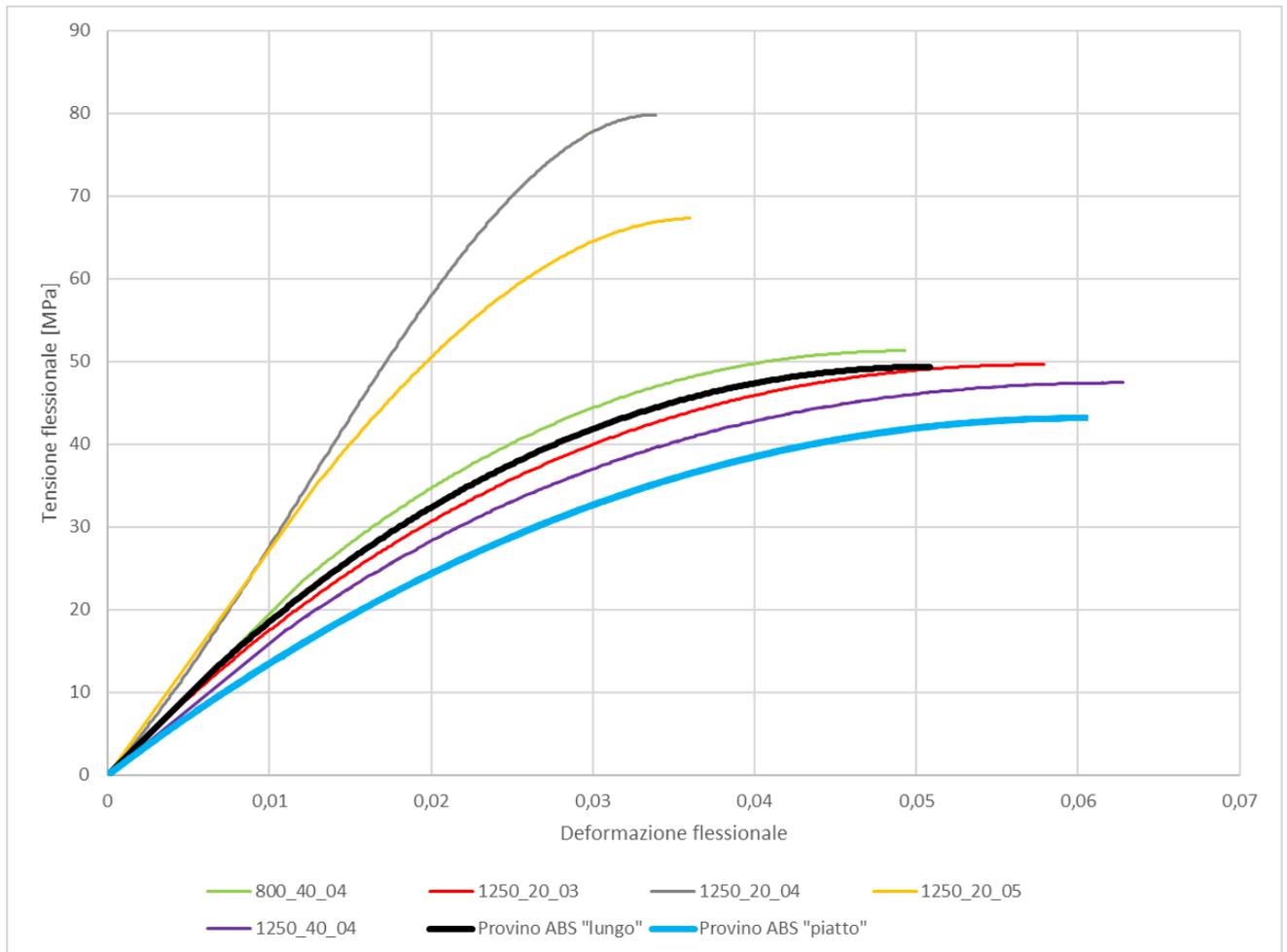


Grafico 4.3. Confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini ricavati dalle saldature effettuate nelle 5 condizioni differenti e ai provini non saldati e stampati in due modalità differenti

Anche in questo caso, come per il grafico Forza-Spostamento tutte le curve presentano un andamento molto simile a parte quella relativa al provino ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-04 che presenta la tensione massima a flessione decisamente superiore rispetto alle altre.

Inoltre, si può notare che non ci sia molta differenza tra l'andamento delle curve $\sigma - \varepsilon$ e quelle F-S relative agli stessi provini; ciò deriva dal fatto che le prime grandezze dipendono linearmente dalle seconde, come precisato in precedenza.

A questo punto, risulta opportuno vedere come ogni parametro di processo influenzi le qualità del giunto anche in termini di valori di corsa del punzone e di tensione massima raggiunti.

4.2.1. Effetto della velocità di rotazione dell'utensile

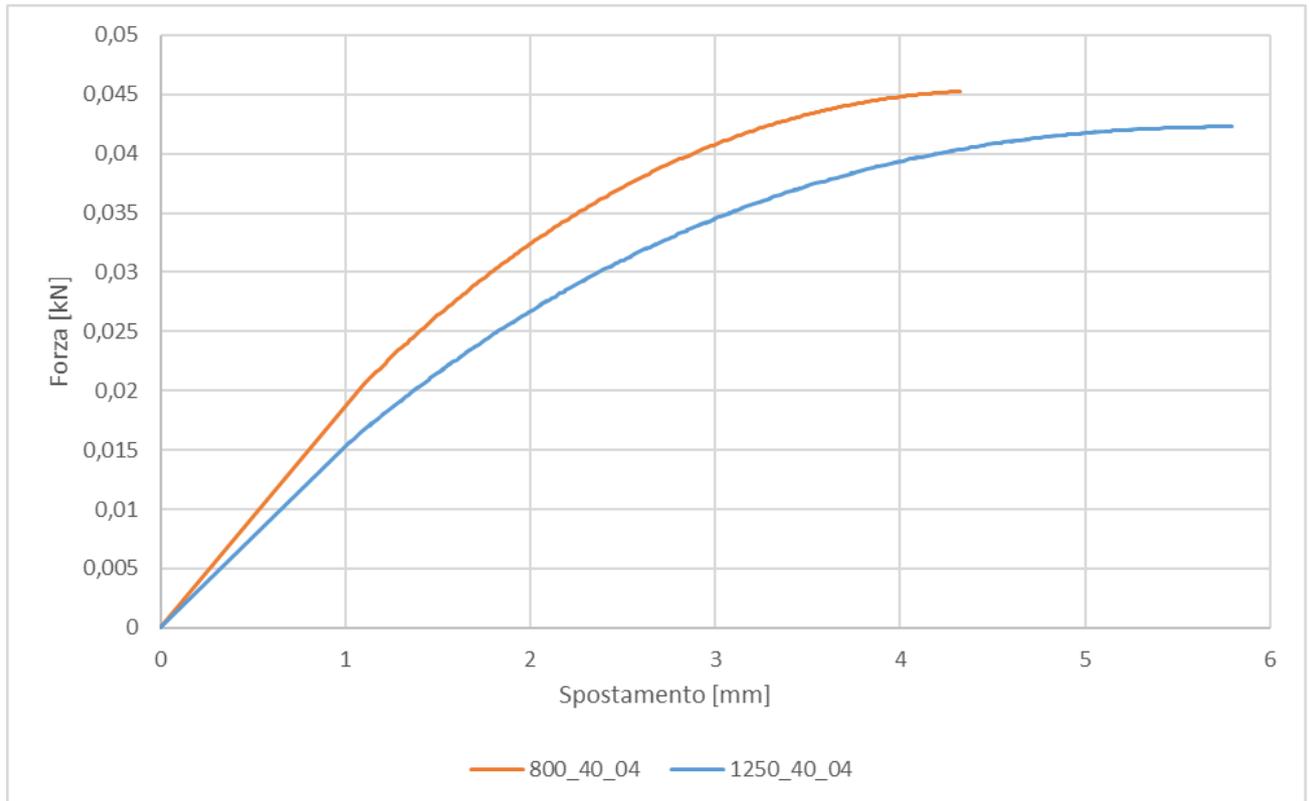


Grafico 4.4. Confronto delle curve F-S dei provini ricavati dalle saldature effettuate nelle condizioni di 1250-40-04 e 800-40-04

Dal grafico 4.4. emerge che il provino ottenuto dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-40-04 resiste per una corsa del punzone maggiore rispetto a quello ottenuto dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 800-40-04, però è sottoposto ad una forza sensibilmente inferiore. Pertanto, si può affermare che un aumento della velocità di rotazione comporta una resistenza maggiore del provino in quanto arriva a rottura in seguito ad una corsa del punzone maggiore.

Per valutare la resistenza a flessione, invece, si dovrà analizzare il Grafico 4.5.

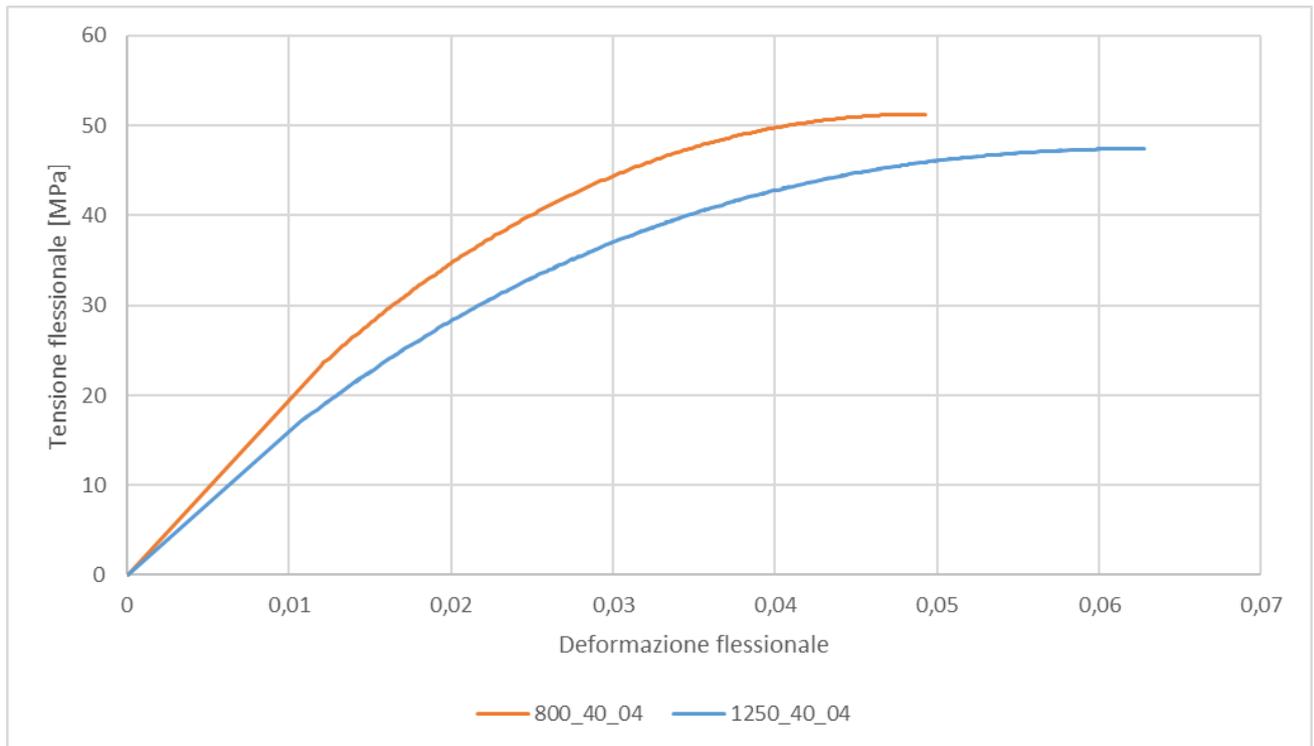


Grafico 4.5. Confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini ricavati dalle prove di saldatura effettuate nelle condizioni di 800-40-04 e 1250-40-04

È sicuramente nota la somiglianza tra gli andamenti rappresentati nei Grafici 4.4. e 4.5.; in questo caso, però, il provino ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-40-04, raggiungendo un valore di tensione massima a flessione inferiore rispetto a quello ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 800-40-04, resiste meno a flessione, pur essendo maggiormente flessibile.

Da ciò ne consegue che un aumento della velocità di rotazione dell'utensile comporta un aumento del valore di deformazione massima e quindi una maggior flessibilità, ma allo stesso tempo prevede una riduzione minima, e quindi trascurabile della tensione massima a flessione. Pertanto, il valore di questo parametro che ottimizza la qualità del giunto risulta essere comunque quello maggiore (1250 rpm).

Osservando allo stereomicroscopio i provini studiati, è stato possibile notare le loro differenze anche in termini geometrici e di finitura superficiale. Nelle Figure 4.1. e 4.2. sono rappresentati rispettivamente i provini ottenuti dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 800-40-04 e da quella nelle condizioni di 1250-40-04 sottoposti a prova di piegatura.



Figura 4.1. Immagine acquisita allo stereomicroscopio del provino ricavato dalla saldatura nelle condizioni di 800-40-04 con lo zoom di 16x



Figura 4.2. Immagine acquisita allo stereomicroscopio del provino ricavato dalla saldatura nelle condizioni di 1250-40-04 con lo zoom di 25x

Nella prima immagine è possibile notare che il provino presenta due punti di rottura: uno in corrispondenza della parte centrale della saldatura (a destra) e l'altro in corrispondenza dell'estremità della saldatura, al confine fra la parte saldata e quella non saldata (a sinistra). Nella seconda invece è presente un unico punto di rottura in corrispondenza della zona centrale di saldatura.

4.2.2. Effetto della velocità di avanzamento dell'utensile

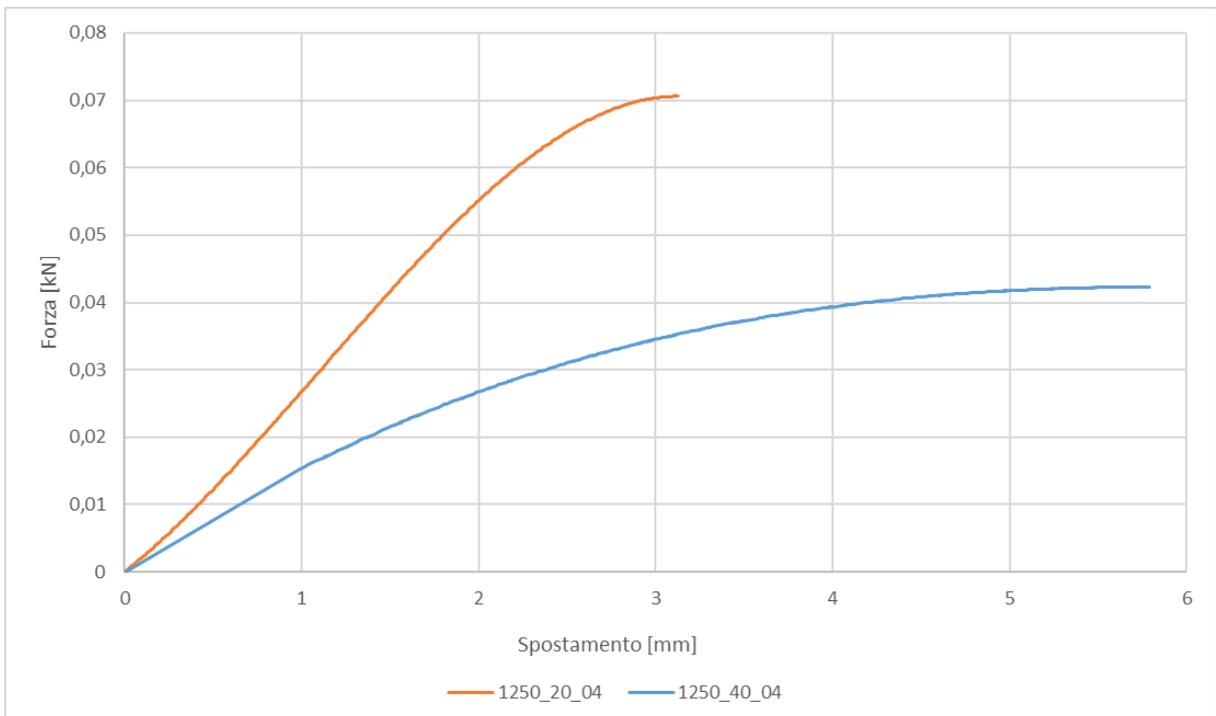


Grafico 4.6. Confronto delle curve F-S relative ai provini ricavati dalle prove di saldatura effettuate nelle condizioni di 1250-20-04 e 1250-40-04

Dal Grafico 4.6. si evince che il provino ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-04 resiste per una corsa del punzone inferiore rispetto a quello ottenuto dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-40-04. Però, dato che è sottoposto ad una forza molto più elevata, non è possibile affermare che un aumento della velocità di avanzamento comporta una maggior resistenza del provino.

Per valutare l'effetto di questo parametro sulla tensione e sulla deformazione a flessione è opportuno confrontare le curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini ottenuti dalle saldature effettuate nelle condizioni specificate sopra (Grafico 4.7.).

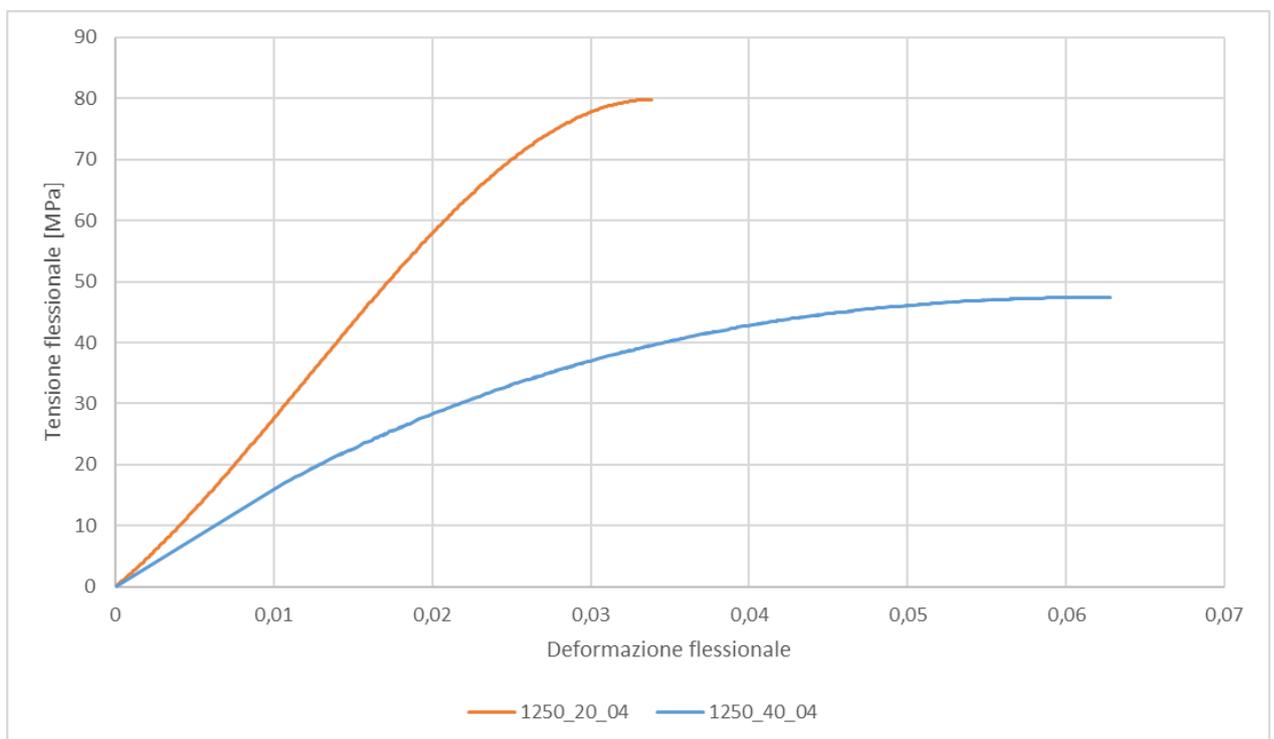


Grafico 4.7. Confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini ricavati dalle saldature effettuate nelle condizioni di 1250-20-04 e 1250-40-04

Come per la velocità di rotazione dell'utensile, anche in questo caso le curve $\sigma - \varepsilon$ presentano un andamento pressoché uguale a quello delle curve F-S. Pertanto, si può notare che il provino ottenuto dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-04 resiste maggiormente a flessione rispetto all'altro.

Ne consegue che un aumento della velocità di avanzamento dell'utensile comporta una minor resistenza a flessione del provino.

Anche in questo caso i provini analizzati sono stati osservati al microscopio per notare eventuali differenze da un punto di vista della geometria e della finitura superficiale.

Dalle Figure 4.3. e 4.4. è possibile notare che aumentando la velocità di avanzamento le impronte lasciate dall'utensile sulla superficie delle piastre sono più evidenti.

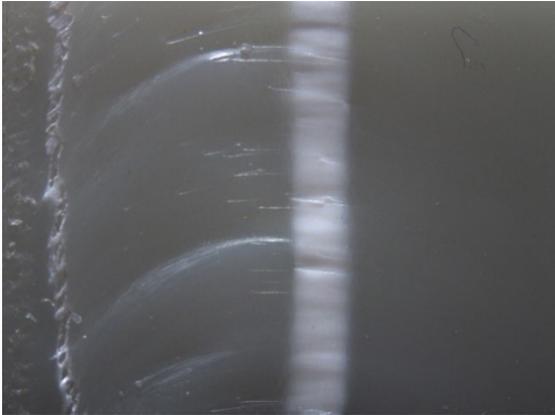


Figura 4.3. Superficie del giunto saldato nelle condizioni di 1250-20-04



Figura 4.4. Superficie del giunto saldato nelle condizioni di 1250-40-04

Le Figure 4.5. e 4.6., invece, mostrano i punti di rottura dei provini sottoposti a piegatura.



Figura 4.5. Rottura del provino ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-20-04, immagine acquisita allo stereomicroscopio con uno zoom di 20x



Figura 4.6. Rottura del provino ricavato dalla saldatura effettuata nelle condizioni di 1250-40-04, immagine acquisita allo stereomicroscopio con uno zoom di 25x

4.2.3. Effetto dell'affondamento dell'utensile nel materiale

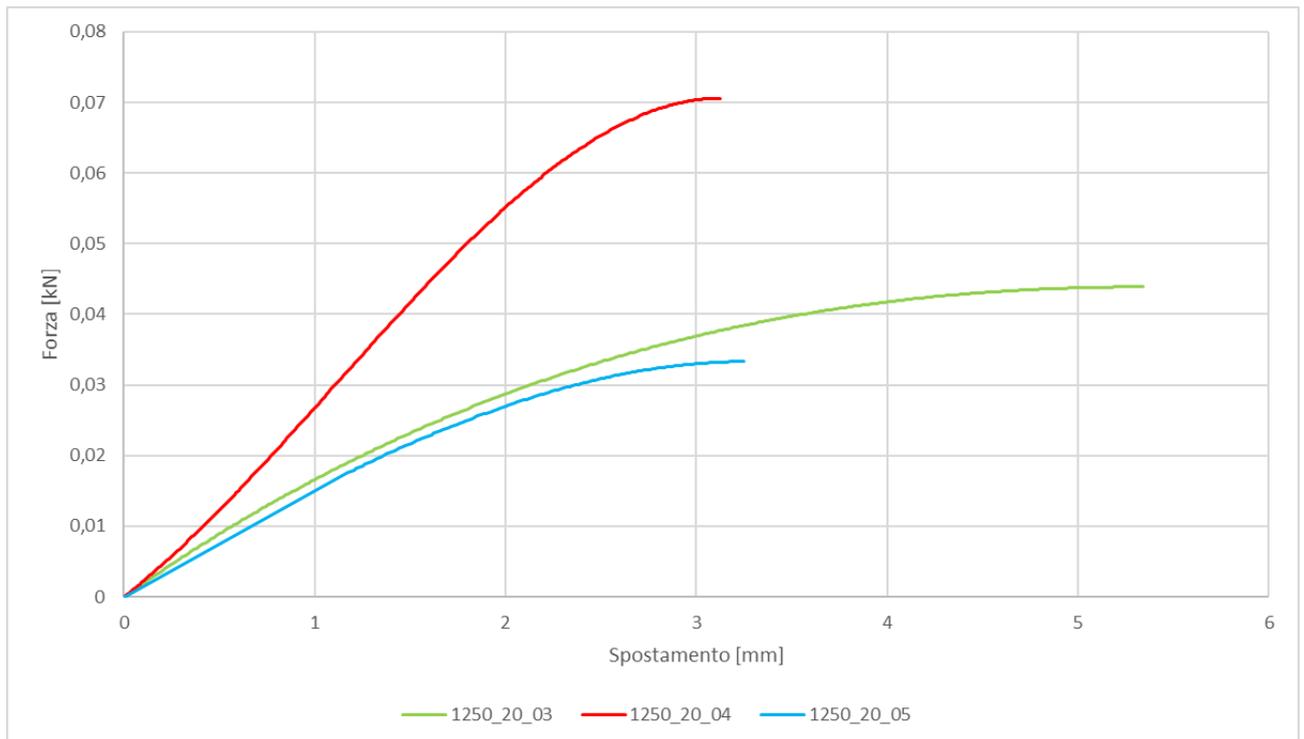


Grafico 4.8. Confronto delle curve F-S relative ai provini ricavati dalle saldature effettuate nelle condizioni di 1250-20-03, 1250-20-04 e 1250-20-05

Osservando il Grafico 4.8. è possibile notare che per un valore di affondamento minimo la corsa effettuata dal punzone prima che si verifichi la rottura è massima, ma la forza applicata sul provino assume un valore intermedio.

Per un valore di affondamento massimo, invece, la corsa del punzone effettuata prima che si verifichi la rottura assume un valore intermedio, mentre la forza applicata sul provino è minima.

In corrispondenza di un valore di affondamento intermedio, invece, la corsa effettuata dal punzone prima che si verifichi la rottura è minima rispetto ai valori che assume per affondamenti di 0,3 mm e 0,5 mm, però la forza applicata sul provino è massima.

Pertanto, si deduce che all'aumentare dell'affondamento, la corsa effettuata dal punzone prima che si verifichi la rottura diminuisce fino a raggiungere un valore minimo per un affondamento intermedio per poi aumentare sensibilmente in corrispondenza dell'affondamento massimo.

La forza esercitata dal punzone sul provino, invece, è massima per un valore di affondamento intermedio e minima per un valore di affondamento massimo.

A questo punto, è possibile valutare come questo parametro influenzi le qualità del giunto saldato in termini di valori di tensione massima a flessione e deformazione a flessione confrontando le curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini studiati (Grafico 4.9.).

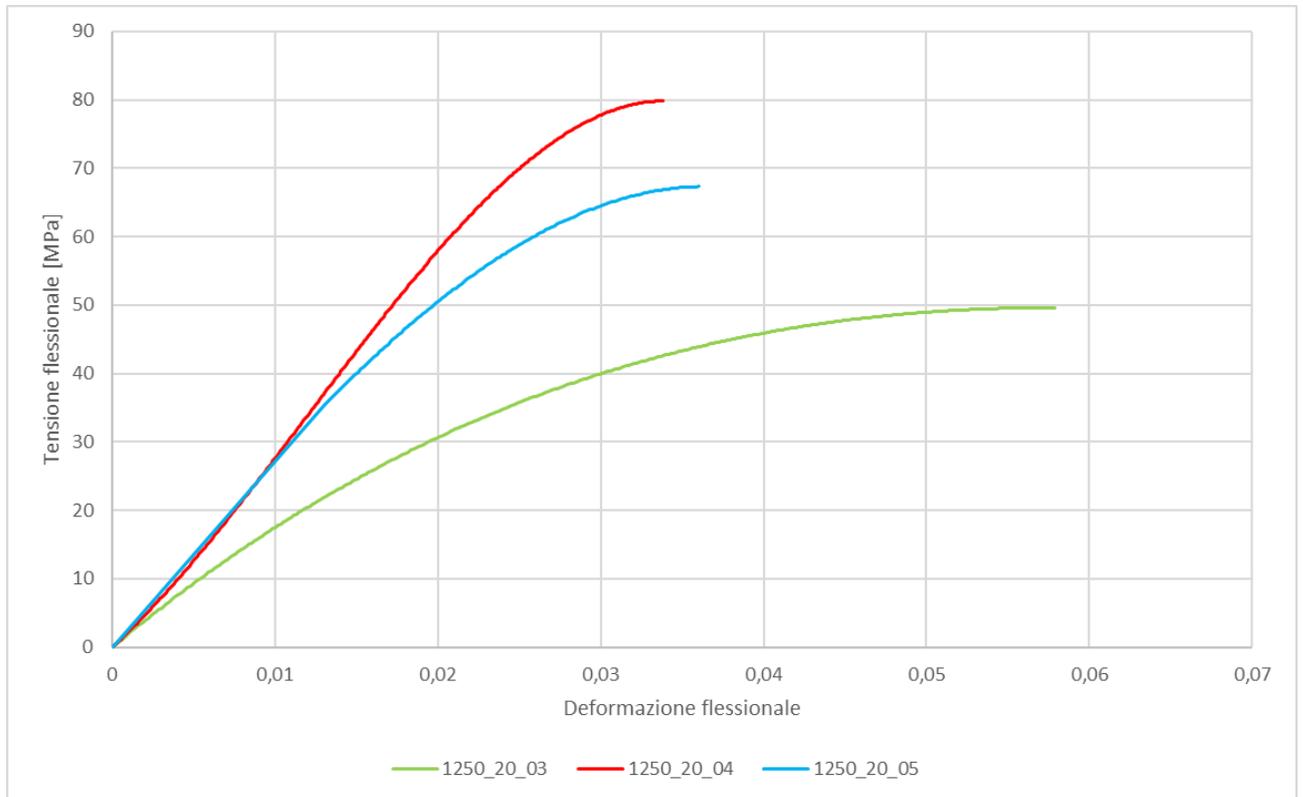


Grafico 4.9. Confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini ricavati dalle saldature effettuate nelle condizioni di 1250-20-03, 1250-20-04 e 1250-20-05

Anche in questo caso, come per gli altri parametri, le curve $\sigma - \varepsilon$ assumono un andamento molto simile a quello delle curve F-S.

Utilizzare un valore di affondamento massimo (0,5 mm) conferisce al giunto saldato una resistenza a flessione intermedia ed una bassa deformazione a flessione, ovvero una bassa flessibilità.

Un valore minimo di affondamento (0,3 mm), invece, conferisce al giunto una resistenza a flessione minima ed una flessibilità massima.

In corrispondenza di un affondamento pari a 0,4 mm, la resistenza a flessione del provino è massima, mentre la deformazione flessionale è minima.

Da ciò si deduce che a partire da un valore di affondamento minimo si verifica un aumento di tensione massima a flessione fino a raggiungere un valore massimo in corrispondenza di un affondamento intermedio per poi diminuire per valori di affondamento maggiori. Per

quanto riguarda la flessibilità, invece, è massima per un affondamento minimo, minima per un affondamento intermedio e intermedia per un valore di affondamento massimo.

Pertanto, la tensione massima a flessione in funzione dell'affondamento presenta un andamento simile a quello parabolico, come rappresentato nel Grafico 4.10.

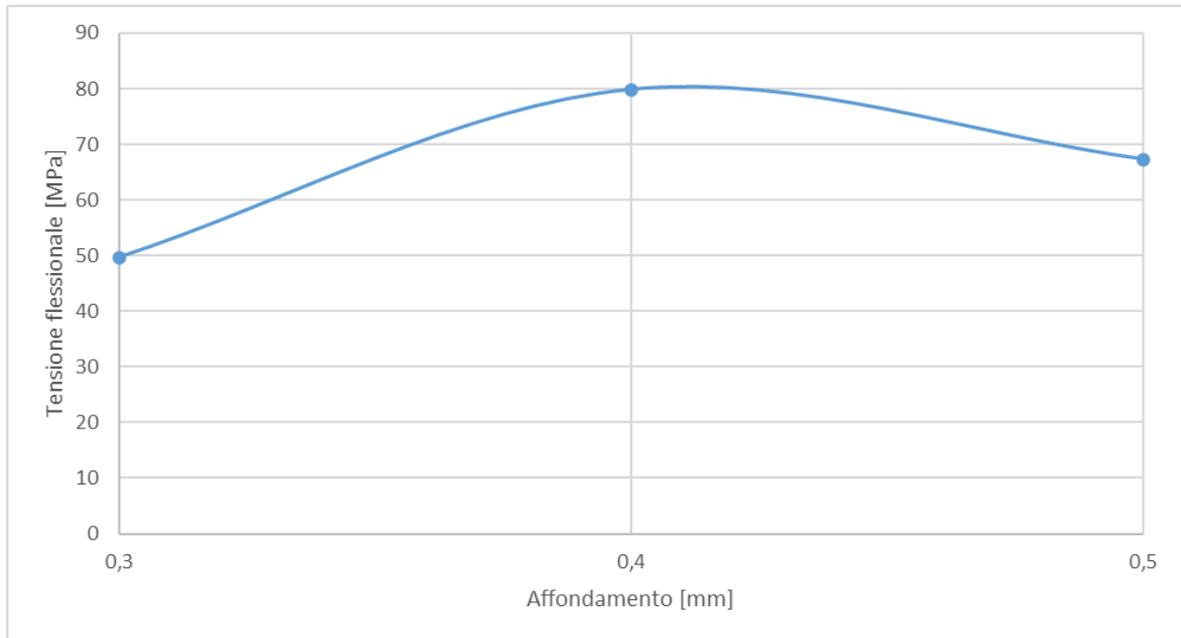


Grafico 4.10. Andamento della tensione massima a flessione per i 3 valori di affondamento utilizzati nelle prove

Anche in questo caso i provini sottoposti a verifica sono stati osservati allo stereomicroscopio; pertanto, è stato possibile notare come questo parametro abbia influito sulle qualità del giunto in termini di finitura superficiale.

La Figure 4.7., 4.8. e 4.9. mostrano che per un affondamento minimo la finitura superficiale è molto bassa, mentre per un affondamento massimo è sicuramente più elevata e sono molto evidenti le impronte rilasciate dall'utensile.

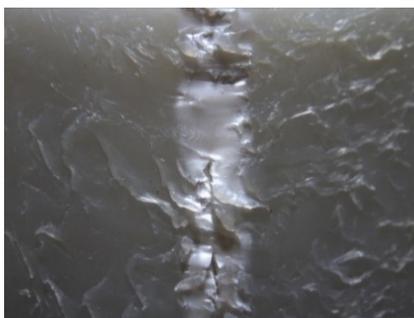


Figura 4.7. Superficie del giunto saldato nelle condizioni di 1250-20-03

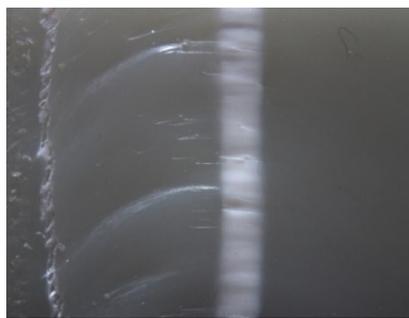


Figura 4.8. Superficie del giunto saldato nelle condizioni di 1250-20-04

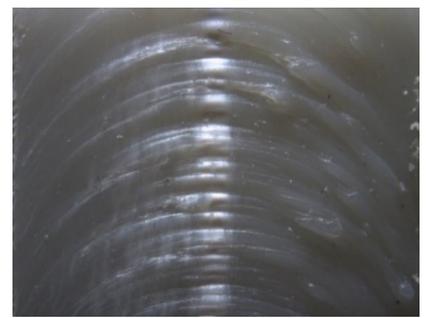


Figura 4.9. Superficie del giunto saldato nelle condizioni di 1250-20-05

4.2.4. Effetto della modalità di stampa

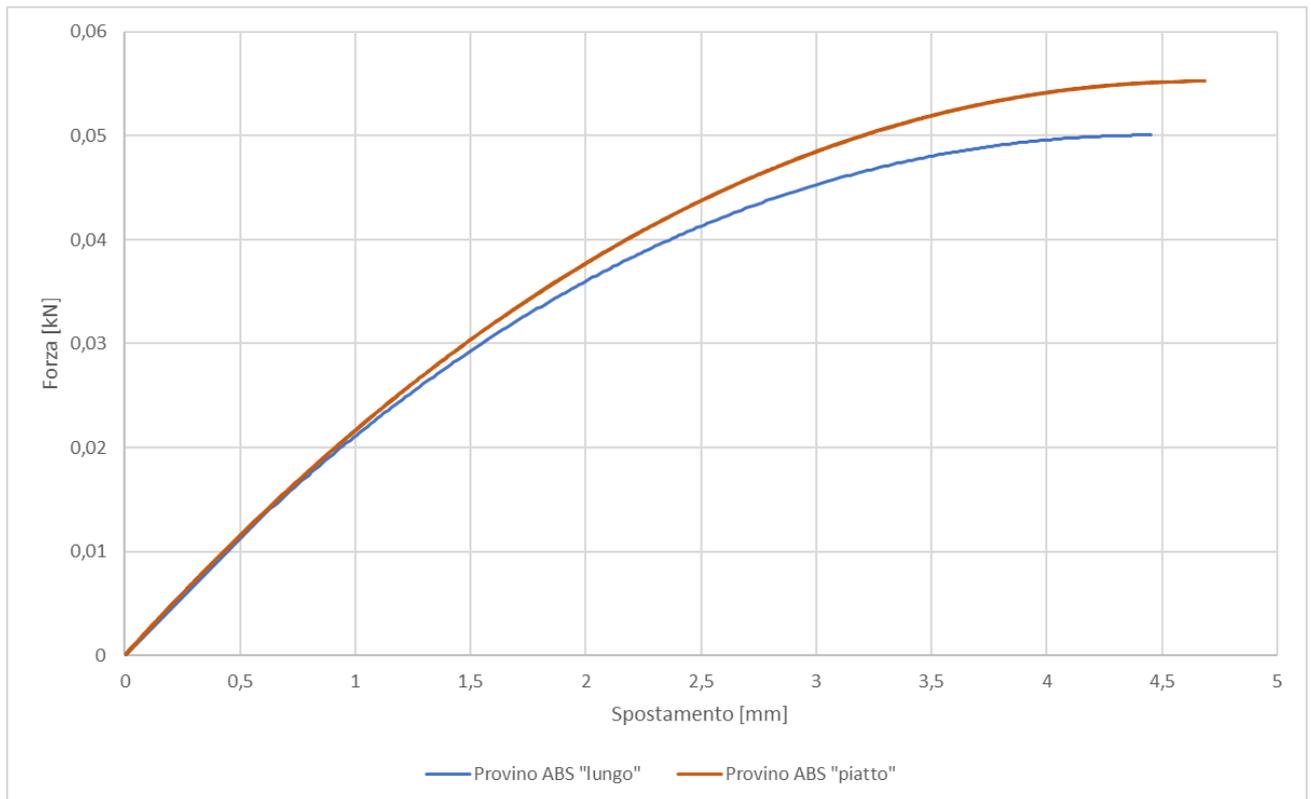


Grafico 4.11. Confronto delle curve F-S relative ai provini in ABS non saldati

Come precisato in precedenza, in questo studio è stato analizzato anche come influisce la modalità di stampa utilizzata nella realizzazione dei provini sulle proprietà del provino stesso.

Dal Grafico 4.11. si può notare che il provino “piatto” resiste maggiormente a rottura rispetto a quello “lungo”, infatti la corsa effettuata dal punzone prima che si verifichi la rottura è maggiore rispetto a quella relativa al provino “lungo” nonostante sia sottoposto ad una forza maggiore.

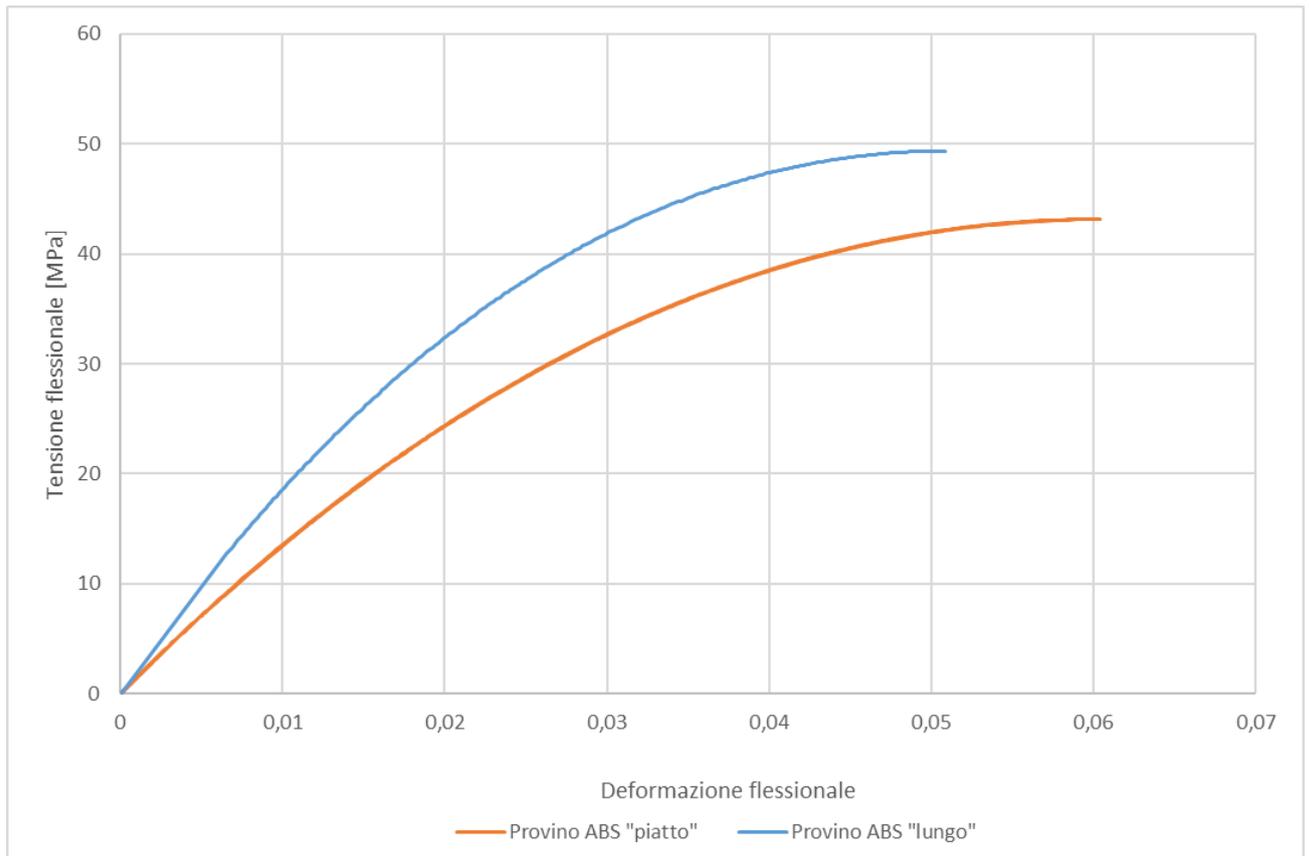


Grafico 4.12. Confronto delle curve $\sigma - \varepsilon$ relative ai provini in ABS non saldati

Da un punto di vista di tensione e deformazione a flessione, invece, come mostra il Grafico 4.12., si può notare che la situazione è invertita rispetto al caso di forza e spostamento. Infatti, il provino lungo resiste maggiormente a flessione rispetto a quello piatto anche se presenta una flessibilità minore.

Pertanto, dato che tutte le piastre saldate sono state stampate con lo stesso metodo utilizzato per la realizzazione del provino lungo, in seguito a questo studio è possibile affermare che la scelta effettuata è stata corretta.

Anche in questo caso, i provini sono stati osservati allo stereomicroscopio così da poterne notare le caratteristiche fisiche.

Le foto 4.10. e 4.11. rappresentano il lato dei provini piegati, rispettivamente quello piatto e quello lungo.

Oltre a notare la differente geometria causata dalla differente modalità di deposito del materiale, si può verificare che il provino piatto presenta una rottura molto più profonda del provino lungo dove la rottura è appena accennata.

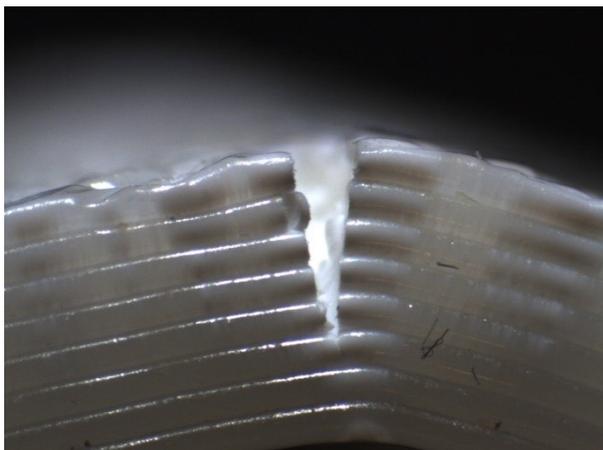


Figura 4.10. Rottura del provino “piatto”, immagine acquisita allo stereomicroscopio con uno zoom di 25x



Figura 4.11. Rottura del provino “lungo”, immagine acquisita allo stereomicroscopio con uno zoom di 20x

Capitolo 5 – Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato quello di valutare la fattibilità del processo di FSW applicato a delle piastre in ABS ottenute mediante stampa 3D con tecnica FDM. Dalle saldature effettuate nelle varie condizioni, sono stati ricavati dei provini successivamente sottoposti a prove di verifica a trazione e a piegatura. Infine, per poter notare le qualità del giunto anche a livello superficiale, i provini sono stati analizzati allo stereomicroscopio.

Dagli studi effettuati e dai risultati ottenuti, è possibile affermare che la qualità del cordone di saldatura dipende dai valori dei parametri utilizzati durante il processo. Dalle prove di verifica a trazione e piegatura è emerso che le condizioni di saldatura che massimizzano la resistenza del giunto e ne aumentano le qualità sono:

- un'elevata velocità di rotazione dell'utensile poiché genera un elevato quantitativo di calore per attrito;
- una bassa velocità di avanzamento dell'utensile poiché consente di ottenere un lento smaltimento del calore permettendogli di invadere quasi tutto lo spessore delle piastre;
- un affondamento dell'utensile nel materiale intermedio poiché, se fosse troppo basso non interesserebbe tutto lo spessore delle piastre, se invece fosse troppo elevato si potrebbe verificare la formazione di un gradino comportando un addensamento delle tensioni e quindi la formazione di cricche.

Per avere una visione completa del processo e della sua fattibilità, però, risulta necessario effettuare degli ulteriori studi in cui si tiene conto di altri parametri ed altre condizioni di processo. Ad esempio, aumentando il range di valori dei parametri utilizzati si può avere sicuramente una visione più ampia di come questi possano influenzare le qualità del giunto. Inoltre, sarebbe opportuno realizzare delle prove di saldatura utilizzando un utensile con pin per notare come la geometria dell'utensile influisca sulle qualità del giunto; oppure un “*hot shoe*”, ovvero una piastra riscaldata su cui viene posto il materiale da lavorare per preriscaldarlo e, tenendo monitorata la temperatura delle piastre attraverso una termocoppia, è possibile verificare se un preriscaldamento possa migliorare o meno le qualità del giunto saldato.

Non tenere in considerazione queste condizioni precluderebbe la possibilità di sfruttare a pieno le potenzialità del processo, cosa che verrà sicuramente fatta effettuando delle analisi più approfondite.

Bibliografia

- [1] Carla Gambaro, Enrico Lertora, Chiara Mandolino, *Friction Stir Welding: definizione di condizioni standard di prova su impianti “on site” per il rilievo dell’efficienza di saldatura e dell’efficacia di processo per le leghe di alluminio*, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti dell’Università di Genova, 2016
- [2] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, Mater SciEng, 2005, 1 – 78
- [3] Reza Bagherian Azhiri, Masoud Ahmadnia, *Measurement and evaluation of joint properties in friction stir welding of ABS sheets reinforced by nanosilica addition*, Elsevier, 2018, 198 – 204
- [4] Archimede Forcellese, *Slide del corso di Tecnologia Meccanica*, A.A. 2019/2020

Sitografia

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

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

[7] <https://www.industriaitaliana.it/>

[8] <https://prototek.it/>

[9] <https://www.selltek.it/>

[10] <https://www.amse.it/>

Ringraziamenti

Arrivata a questo punto, credo mi sia doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato a tutte le persone che hanno contribuito, con il loro instancabile supporto, alla realizzazione dello stesso.

In primis, un ringraziamento speciale va al professor Archimede Forcellese per avermi dato la possibilità di svolgere questo tirocinio nonostante la situazione difficile attraversata in questi mesi. Più che tirocinio potrei definirlo come una vera e propria esperienza in quanto mi ha formato sia a livello personale che professionale.

Un secondo grazie va sicuramente alla Prof.ssa Ing. Michela Simoncini che con la sua estrema gentilezza, professionalità e competenza mi ha seguito in tutto il percorso. Ringrazio lei come Tommaso e Luciano per la loro disponibilità ed i consigli dati.

Ora è giunto il momento di ringraziare le persone più care.

Innanzitutto, ringrazio i miei genitori per avermi dato la possibilità economica per seguire questo percorso e per essere state le uniche persone a “subire” tutti i vari “retroscena” sia della mia vita universitaria che non.

Grazie per aver creduto in me da sempre, ma soprattutto per avermi fatto credere in me, per avermi sostenuto in ogni momento brutto e bello e per avermi fatta diventare quella che sono.

Grazie a mia sorella Laura che, nonostante le migliaia di chilometri che ci separano, è stata sempre presente e mi ha sostenuto più di chiunque altro per quanto le fosse possibile, grazie per aver fatto sempre il tifo per me e per il supporto dato in ogni occasione.

Un ringraziamento particolare va sicuramente ai miei nonni per tutto quello che hanno fatto per me e che continuano ancora a fare. Grazie a nonno per i milioni di “in bocca al lupo” fatti prima di ogni esame che avranno sicuramente influito sull’esito, grazie a nonna per gli “auguri per tutte le cose de tutte le sorte” fatti in ogni occasione e grazie all’altra nonna per i continui “auguri di bene” validi per compleanno, Natale, esami riusciti e chi più ne ha più ne metta.

Un grazie speciale va ai miei fratelli acquisiti Valentina, Michele e Davide.

Grazie Michi e Vale per le nostre chiacchierate, per tutti i consigli che mi avete dato in ogni campo e grazie per non aver mai smesso di credere in me.

Grazie Davi per i continui scherzi e prese in giro che da sempre fanno da contorno, grazie per le riflessioni fatte insieme e, anche a te, grazie per avermi dato fiducia.

Inoltre, voglio ringraziare i miei compagni di corso per aver alleviato questi tre anni di università, in modo particolare Matteo, Michele e Mauro.

Grazie soprattutto a Matteo per avermi accompagnato in tutto questo percorso sopportandomi e supportandomi in ogni momento.

Grazie ai miei amici che in un modo o nell'altro mi sono sempre stati vicini, in modo particolare Margherita e Francesco.

Grazie a Margherita per esserci sempre stata sia nei momenti brutti che in quelli belli, per non aver mai smesso di farmi credere di più in me stessa e per avermi sempre sostenuta.

Grazie a Francesco che, nonostante ci trascorra poco tempo, non ha mai smesso di essermi vicino, né tantomeno di credere in quello che facevo.

Infine, grazie a tutti i miei parenti, soprattutto a Giorgio e Luca, e a tutte quelle persone che mi sono state vicine e mi hanno sostenuto durante questo percorso e che, in un modo o nell'altro, sono state costruttive sia per la mia crescita personale che per quella professionale.