



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**PROCESSI DI SALDATURA ALLO STATO SOLIDO DI PIASTRE IN MATERIALE
TERMOPLASTICO OTTENUTE MEDIANTE ADDITIVE MANUFACTURING**

**SOLIDE STATE WELDING PROCESSES OF BLANKS IN THERMOPLASTIC
MATERIAL OBTAINED BY ADDITIVE MANUFACTURING**

RELATORE

Prof.Ing. Archimede Forcellese

CORRELATORE

Prof.ssa Ing. Michela Simoncini

TESI DI LAUREA DI

Lorenzo Pinocchio

A.A. 2020/2021

Sommario

INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1- I MATERIALI TERMOPLASTICI	4
1.1. CENNI STORICI SULLE MATERIE PLASTICHE	4
1.2. TIPOLOGIE DI MATERIE PLASTICHE	6
1.2.1. RESINE TERMOINDURENTI	6
1.2.2. RESINE TERMOPLASTICHE	8
1.2.3. ELASTOMERI	14
1.3. METODI DI PRODUZIONE	14
1.4. IL MATERIALE ABS	17
1.41. PROPRIETÀ MECCANICHE.....	18
1.42. CAMPI DI APPLICAZIONE	20
CAPITOLO 2-LA MANIFATTURA ADDITIVA	23
2.1. GENERALITÀ DEL PROCESSO	23
2.2. FLUSSO DI LAVORO	25
2.3. PRINCIPALI TECNICHE DI ADDITIVE MANUFACTURING PER I MATERIALI POLIMERICI....	27
2.4. IL PROCESSO FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM).....	32
2.41. PARAMETRI DI PROCESSO	36
2.42. ROAD WIDTH.....	39
2.43. LAYER THICKNESS	40
2.44. RASTER ANGLE	40
2.45. AIR GAP.....	41
2.46. BUILD ORIENTATION	41
2.47. VANTAGGI E SVANTAGGI	42
2.48. CONFRONTO CON LO STAMPAGGIO AD INIEZIONE.....	44
CAPITOLO 3-IL PROCESSO FSW	46
3.1. GENERALITÀ SUL PROCESSO	46
3.2 PARAMETRI DI PROCESSO	51
3.21. GEOMETRIA DELL'UTENSILE.....	51
3.22. VELOCITÀ DI ROTAZIONE DELL'UTENSILE	56
3.23. VELOCITÀ DI AVANZAMENTO DELL'UTENSILE O VELOCITÀ DI SALDATURA	57
3.24. PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE DELL'UTENSILE.....	59

3.25. FORZA ASSIALE ESERCITATA DALLA MACCHINA SULL'UTENSILE	59
3.26. ANGOLO DI INCLINAZIONE DELL'UTENSILE	60
3.27. CONCLUSIONI SUI PARAMETRI DI PROCESSO	60
3.28. TECNOLOGIA UTILIZZATA	61
CAPITOLO 4-PROCEDURA SPERIMENTALE	64
4.1. OGGETTO DELLA SPERIMENTAZIONE	64
4.2. PROCESSO DI STAMPA	64
4.3. PROCESSO DI SALDATURA FSW: PARAMETRI SCELTI E MANUFATTI OTTENUTI	68
4.4. ANALISI DELLA TEMPERATURA	74
4.4. PROVINI	75
4.5. PROVE DI PIEGATURA	78
4.6. PROVE DI TRAZIONE	83
4.7. STEREOMICROSCOPIO	85
CAPITOLO 5-RISULTATI	87
5.1. ANALISI DELLA TEMPERATURA	87
5.2. OSSERVAZIONI ALLO STEREOMICROSCOPIO	92
5.3. PROVE DI PIEGATURA: RISULTATI SPERIMENTALI	95
5.31. CONFRONTO TRA I PROVINI DI UNA STESSA PIASTRA	99
5.32. CONFRONTO PROVINI SOTTOPOSTI A PIEGATURA	101
5.33. OSSERVAZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO DEI PROVINI SOTTOPOSTI A PIEGATURA	105
5.4. PROVE DI TRAZIONE: RISULTATI SPERIMENTALI	106
5.41. OSSERVAZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO DEI PROVINI SOTTOPOSTI A TRAZIONE	111
CAPITOLO 6-CONCLUSIONI	113
Bibliografia	115
RINGRAZIAMENTI	117

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la sempre maggior attenzione agli aspetti legati alla sostenibilità ambientale, alle proprietà meccaniche dei manufatti, ai materiali che possono essere lavorati, e la crescita della competizione nel settore dell'industria manifatturiera hanno spinto le industrie di questo settore a effettuare delle continue innovazioni.

La scelta di realizzare prodotti utilizzando materiali e tecniche di lavorazione sempre più moderni e aggiornati è sicuramente un contributo notevole che le aziende possono dare per la tutela dell'ambiente.

È in questo contesto che stanno prendendo sempre più campo i processi di additive manufacturing di materiali polimerici che, mediante un processo di stampa 3D, consentono di ottenere oggetti con geometrie particolari, difficilmente ottenibili con lavorazioni tradizionali, impiegando un basso quantitativo energetico e riducendo la produzione di sfridi e scarti di lavorazione. Tuttavia, una limitazione che presenta la stampante 3D è il volume di stampa limitato, ovvero quello spazio entro il quale il dispositivo può produrre oggetti. Un modo per ovviare a questo problema è quello di

dividere il modello in più parti da stampare ed unirle poi successivamente con colle, incastri o saldature.

In questo lavoro si pone l'attenzione sul processo di saldatura denominato *Friction Stir Welding* (FSW), un processo emergente di giunzione allo stato solido in cui il materiale viene unito senza fusione e senza produrre fumi o gas tossici dovuti ad archi elettrici. Questa innovativa tecnica di saldatura si va così a configurare come una tecnica di produzione ecologica in virtù della sua efficienza energetica e compatibilità ambientale e risulta essere una valida alternativa alle colle e agli incastri in quanto le prime sono più impattanti da un punto di vista ambientale e meno precise in fatto di tolleranze, mentre gli incastri richiedono spesso un redesign della parte e quindi costi e tempi maggiori per la stampa. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è pertanto quello di investigare sui diversi parametri di processo della saldatura FSW di piastre in ABS stampate mediante tecnica 3D al fine di analizzare le caratteristiche meccaniche ottenute e massimizzare le prestazioni dei materiali al variare dei parametri. In laboratorio, quindi, sono state condotte prove di saldatura variando i tre parametri fondamentali, ovvero la velocità di rotazione e di traslazione dell'utensile e l'affondamento dello stesso all'interno del materiale per ottenere diversi provini che sono poi stati sottoposti a prove di trazione e flessione secondo le normative prestabilite. In entrambi i test si è arrivati a rottura del provino e si sono estratte le curve caratteristiche del diagramma tensione-deformazione. Infine, sono stati valutati e confrontati i risultati ottenuti ed è stata condotta un'analisi allo stereomicroscopio per osservare la microstruttura dei diversi provini.

CAPITOLO 1- I MATERIALI TERMOPLASTICI

1.1. CENNI STORICI SULLE MATERIE PLASTICHE

La storia della plastica può essere fatta partire dai tempi più remoti. Sin dall'antichità, infatti l'uomo ha utilizzato dei veri e propri "polimeri naturali", come l'ambra, il guscio di tartaruga o il corno.

I primi studi sulla plastica risalgono al XIX° secolo, quando tra il 1861 e il 1862, l'inglese Alexander Parkes, sviluppando delle indagini sul nitrato di cellulosa, isola e brevetta il primo materiale plastico semisintetico, che battezza con il nome di Parkesine. Si tratta di un primo tipo di cellulose utilizzato per la produzione di manici e scatole, ma anche di manufatti flessibili come i polsini e i colletti delle camicie. La prima vera affermazione del nuovo materiale si ha però qualche anno dopo, quando nel 1870 i fratelli americani Hyatt brevettano la formula della cellulose, avendo l'obiettivo di sostituire il costoso e raro avorio nella produzione delle palle da biliardo. Dal punto di vista chimico, la cellulose era ancora nitrato di cellulosa ed era inadatto a

essere lavorato con tecniche di stampaggio ad alta temperatura in quanto molto infiammabile. Questo problema fu superato con l'avvento del nuovo secolo, quando fu sviluppato l'acetato di cellulosa, che era sufficientemente ignifugo per rinforzare e impermeabilizzare le ali e le fusoliere dei primi aeroplani o per produrre le pellicole cinematografiche.

Il secolo della plastica è dunque il 900; infatti nel 1907 il chimico belga Leo Baekeland ottiene per condensazione tra fenolo e formaldeide la prima resina termoindurente di origine sintetica, che brevetterà nel 1910 con il nome di Bakelite. Questo nuovo materiale ha un successo travolgente e la Bakelite diviene in breve e per molti anni la materia plastica più diffusa e utilizzata. Nel 1912 invece il chimico tedesco Friz Klatte scopre il processo per la produzione del polivinilcloruro (PVC), che avrà grandissimi sviluppi industriali solo molti anni dopo.

Con questi ricercatori termina la fase "artigianale" dello sviluppo di materiali polimerici, in quanto nel 1928 Du Point negli Stati Uniti lancia un programma per la messa a punto di nuove resine, programma che, sotto la guida di Wallace Carothers, porterà alla formulazione del *nylon*. Nel 1932 la ICI inglese avvia una ricerca che avrà come esito la scoperta del *polietilene*, utilizzato inizialmente come isolante per cavi elettrici. Il brevetto del *polistirene* (più comunemente noto come *polistirolo*) è del 1937. Fra il 1938 ed il 1950 si riscontrano notevoli sviluppi nel campo dei materiali elastomerici di sintesi, nati per sostituire la gomma naturale il cui approvvigionamento, specialmente nei periodi della Seconda Guerra Mondiale, presentava gravi problemi soprattutto per la Germania e gli Stati Uniti.

Gli anni '60 vedono il definitivo affermarsi della plastica come strumento della vita quotidiana e come "nuova frontiera" anche nel campo della moda, del design e dell'arte. Il "nuovo" materiale irrompe nel quotidiano e nell'immaginario di milioni di persone, permettendo a masse sempre più vaste di accedere a beni di consumo prima riservati a pochi privilegiati, semplificando un'infinità di gesti quotidiani, rivoluzionando abitudini consolidate da secoli e contribuendo a creare lo "stile di vita moderno".

I decenni successivi sono quelli della progressiva affermazione per applicazioni sempre più sofisticate, grazie allo sviluppo dei “tecnopolimeri”, come per esempio il polimetilpentene (TPX) utilizzato soprattutto per la produzione di articoli per i laboratori clinici in quanto resistente alla sterilizzazione e con una perfetta trasparenza o le poliimmidi, resine termoindurenti che non si alterano se sottoposte per periodi anche molto lunghi a temperature di 300°C e che per questo vengono utilizzate nell’industria automobilistica per componenti del motore. I tecnopolimeri hanno queste caratteristiche di resistenza sia termica che meccanica da renderli spesso superiori ai metalli speciali o alla ceramica, tanto che vengono utilizzati nella produzione di palette per turbine e di altre componenti dei motori come, per esempio, nei pistoni o nelle fasce elastiche. Nelle successive sezioni verranno presentate le tipologie di materie plastiche, dando una maggiore enfasi alle resine termoindurenti, in quanto a questa categoria appartiene il nostro materiale di studio, cioè *l’Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS)*.

1.2. TIPOLOGIE DI MATERIE PLASTICHE

I materiali plastici, essendo costituiti da un insieme di catene complesse formate da uno o più monomeri, vengono chiamati anche materiali polimerici. Questi appartengono alla categoria dei materiali organici, come il legno e la carta, il cui elemento di base è il carbonio.

Le materie plastiche solitamente vengono suddivise sulla base di come reagiscono al calore e del modo in cui vengono modellate ed eventualmente riutilizzate; è infatti possibile effettuare una distinzione tra materie plastiche **termoindurenti**, **termoplastiche** ed **elastomeri**.

1.2.1. RESINE TERMOINDURENTI

Sono polimeri che a temperatura ambiente si trovano in fase liquida e si induriscono quando sottoposti a calore. Il processo di solidificazione della resina è attivato dalla temperatura che prima fluidifica il materiale per renderlo plastico e poi ne innesca la

reticolazione che lo riporta allo stato solido. Questo processo è irreversibile: una volta indurita la resina, essa non può più subire cambiamenti di forma in quanto sono intervenute reazioni chimiche che hanno modificato in modo irreversibile la struttura e, se venisse sottoposta nuovamente a temperature troppo elevate, anziché sciogliersi rischierebbe di carbonizzarsi. Nella tabella 1.2.1 vengono riportati alcuni dati relativi alle resine termoindurenti.

Resine di base con cariche o rinforzi fibrosi	Simbolo ISO	Intervallo di fusione [°C]	Ritiro di stampaggio [%]
Fenolica + farina di legno	PF	70 – 100	0.3 – 0.7
Fenolica + fibra di vetro	PF	70 - 100	0.1 – 0.3
Ureica + cellulosa	UF	70 - 100	0.4 – 0.8
Alchidica + fibre di vetro	PDAP	70 – 100	0.2 – 0.7
Allilica + fibre di vetro	PDAP	70 – 100	0.2 – 0.5
Epossidica + fibre di vetro	EP	60 - 90	0.1 – 0.4
Poliestere insatura + fibre di vetro	UP	70 – 100	0.3 – 0.8
Poliestere insatura + fibre di vetro (pasta BMC)	UP-BMC	60 - 90	0.1 – 0.3

Tabella 1.2.1- Dati relativi ad alcune resine termoindurenti^[1]

Da questa tabella si evince come le resine termoindurenti siano caratterizzate da un intervallo di fusione ampio una trentina di gradi centigradi nel quale si completa la plasticizzazione del materiale. Nella tabella è riportato anche il ritiro di stampaggio, cioè la contrazione che la resina termoindurente subisce nel passare dalla temperatura alla quale è stata plasmata a quella ambiente e solitamente questo valore si attesta intorno all'1%.

1.2.2. RESINE TERMOPLASTICHE

Le resine termoplastiche sono solide a temperatura ambiente e tendono a diventare fluide quando vengono riscaldate. Si tratta quindi di resine che teoricamente diventano formabili ogni volta che la temperatura raggiunge un determinato valore poiché il processo di indurimento è un processo reversibile in quanto si tratta di un semplice cambiamento di stato. Ad ogni ciclo di riscaldamento però decadono le prestazioni del materiale e questo comporta che, dopo ogni ciclo di trasformazione, il polimero verrà utilizzato in applicazioni sempre meno esigenti. A seguito di un raffreddamento, poiché le catene polimeriche sono molto aggrovigliate, generalmente i polimeri termoplastici non cristallizzano facilmente e quindi, queste, prendono il nome di **resine amorphe**. I polimeri termoplastici che invece riescono a cristallizzare non formano mai dei materiali perfettamente cristallini, ma sono caratterizzati da zone cristalline e zone amorphe e per questo vengono chiamate **resine semicristalline**. Le regioni cristalline di questi materiali sono caratterizzate dalla loro temperatura di fusione T_m (*melting temperature*).

Le resine amorphe, e le regioni amorphe delle resine parzialmente cristalline, sono invece caratterizzate dalla temperatura di transizione vetrosa T_g (*glass transition temperature*), temperatura alla quale si trasformano bruscamente dallo stato vetroso (molto rigido) a quello gommoso (molto più morbido). Questa transizione coincide con l'attivazione di alcuni moti delle macromolecole che compongono il materiale, mentre al di sotto della T_g le catene polimeriche hanno difficoltà a muoversi e le loro posizioni risultano fisse. Sia la temperatura di fusione che quella di transizione vetrosa aumentano all'aumentare

della rigidità delle catene che compongono il materiale e all'aumentare delle forze di interazione intermolecolari.

Nella tabella 1.2.2(a) sono riportati alcuni dati relativi alla temperatura di transizione vetrosa e alla temperatura di fusione di alcune resine termoplastiche, mentre nella tabella 1.2.2(b) sono riportati l'intervallo di fusione (o la temperatura di fusione nel caso delle resine semicristalline) e il ritiro di stampaggio di alcune resine termoplastiche.

Polimero	Tipo	T_f [°C]	T_g [°C]
PP	C	168	-35/+26
LDPE	C	141	-78
HDPE	C	138	-110
PTFE	C	330	-115
PA-6	C	220	50
PA-66	C	265	50
PA-11	C	194	46
PET	C	200	69
PEEK	A	335	144
ABS	A	218	102
PS	A	240	90
PMMA (1)	A	160	45
PMMA (2)	A	>200	105
PC	A	220	150

UPVC	A	212	90
C: Semicristallino A: Amorfo (1) : Isotattico (2): sindiotattico			

Tabella 1.2.2(a)-Temperatura di transizione vetrosa e temperatura di fusione di alcune resine termoplastiche ^[1]

Termoplastici a struttura amorfa	Simbolo ISO	Intervallo di fusione [°C]	Ritiro di stampaggio [%]
Copolimero ABS	ABS	170 - 200	0.4 – 0.7
Polistirene	PS	130 - 160	0.3 – 0.6
Polistirene antiurto	SB	130 - 160	0.3 – 0.6
Stirene acrilonitrile	SAN	140 - 170	0.4 – 0.6
Acetato di cellulosa	CA	130 - 170	0.3 - 0.7
Acetobutirrato di cellulosa	CAB	130 - 170	0.3 – 0.7
Propionato di cellulosa	CP	130 - 170	0.3 – 0.7
Policarbonato	PC	220 - 260	0.5 – 0.8
Polimetilmetacrilato	PMMA	150 - 180	0.4 – 0.8
Polifenilenossido modificato	PPO	240 - 270	0.5 – 0.8
Policloruro di vinile rigido	PVC	130 - 160	0.4 – 0.8
Termoplastici a struttura semicristallina	Simbolo ISO	Punto di fusione [°C]	Ritiro di stampaggio [%]
Polietilene a bassa densità	PE	~110	1 – 3

Polietilene ad alta densità	PE	~130	1.5 – 4
Polipropilene	PP	~165	1 – 2.5
Poliammide 66	PA66	~255	1.2 – 2.5
Poliammide 6	PA6	~220	0.8 – 2
Poliammide 610	PA610	~220	0.8 – 2
Poliacetale (omopolimero)	POM	~175	1.5 – 3.5
Poliacetale (copolimero)	POM	~165	1.5 – 3.5
Polibutilentereftalato	PBTP	~225	1.2 – 2.8
Polietilentereftalato	PETP	~255	1.2 – 2
Copolimero fluoroetilene- propilene	FEP	~270	3.5 – 5
Copolimero etilene- tetrafluoroetilene	ETFE	~270	3.5 - 5
Nota: i valori del ritiro di stampaggio si riferiscono a polimeri senza rinforzi fibrosi né cariche.			

Tabella 1.2.2(b)-Intervallo di fusione/punto di fusione e ritiro di stampaggio di alcune resine termoplastiche. ^[1]

Come si può notare, le resine semicristalline hanno una temperatura di fusione sufficientemente definita, ad eccezione dell'influenza della percentuale di amorfo, mentre le resine amorfe sono caratterizzate da un intervallo di temperature entro il quale avviene il rammollimento progressivo della materia plastica. Questo intervallo di rammollimento si mantiene di solito nell'ordine dei 30-40°C, mentre il livello della temperatura cambia a seconda del materiale termoplastico.

La tabella mette in evidenza anche come la struttura amorfa sia caratterizzata da un valore molto contenuto (inferiore all'1%) del ritiro di stampaggio, mentre la semicristallina questo valore può arrivare fino al 5% a causa della formazione di cristalliti e del conseguente aumento della massa volumica del materiale.

Per capire come le resine termoplastiche si deformino a seguito dell'applicazione di una forza dall'esterno è utile osservare la tipica curva tensione-deformazione di questa tipologia di materiali (grafico 1.1).

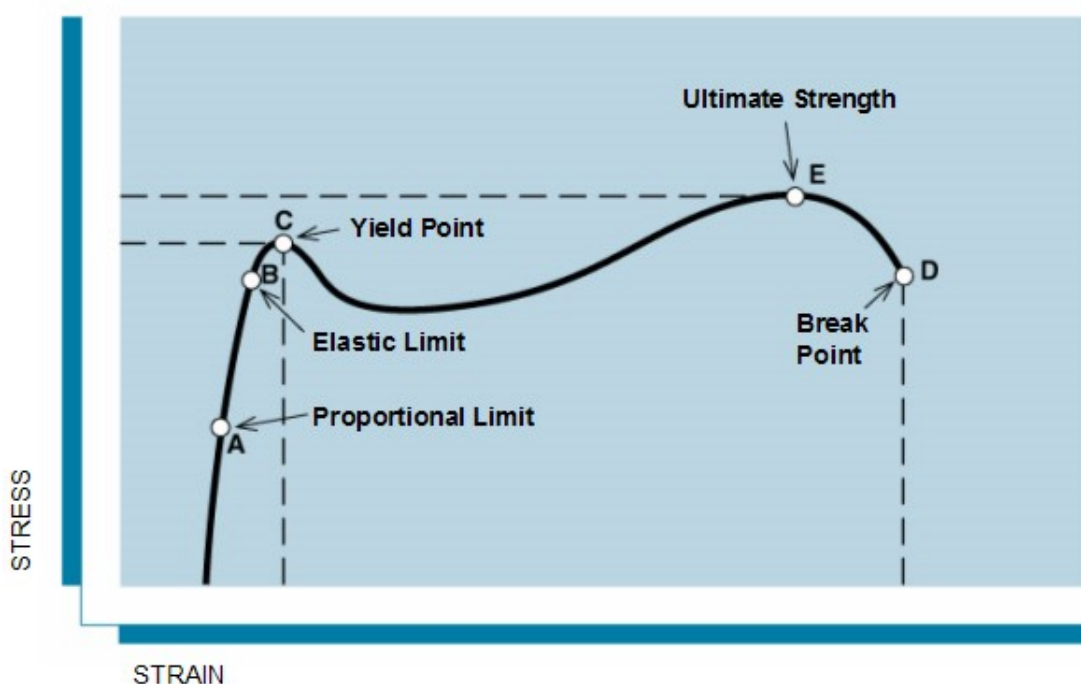


Grafico 1.1-Curva tensione-deformazione caratteristica dei materiali polimerici termoplastici

Il comportamento del materiale dipende dal modo in cui le catene polimeriche si muovono l'una rispetto all'altra durante le condizioni di sforzo; nel primo tratto della curva si può notare un andamento lineare che denota un comportamento elastico, ovvero non appena la forza applicata si annulla, le catene ritornano alla loro posizione originaria, come mostrato in figura 1.1.

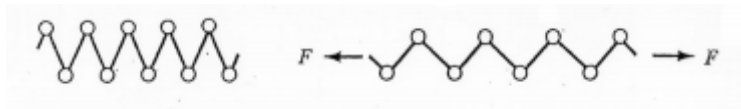


Figura 1.1-meccanismo di deformazione nel tratto elastico ^[2]

Nel secondo tratto della curva è presente un comportamento elastico non lineare, qui infatti, l'applicazione di uno sforzo maggiore può portare alla deformazione di interi segmenti di catena e quando lo sforzo finisce essi ritornano nella loro posizione originaria ma in tempi lunghi che vanno da alcune ore a diversi mesi; questo meccanismo prende il nome di deformazione elastica ritardata (figura 1.2).

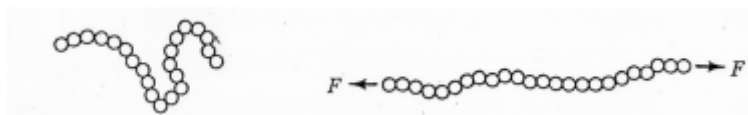


Figura1.2-Meccanismo di deformazione elastica ritardata ^[2]

Infine, nel terzo ed ultimo tratto si ha una deformazione plastica per scorrimento delle catene nella quale vi è un allungamento irreversibile dei baricentri delle catene ed inoltre in questo tratto si può notare una risalita della curva in quanto le macromolecole si allungano lungo la direzione di trazione assumendo una struttura fibrillare come mostrato in figura 1.3.

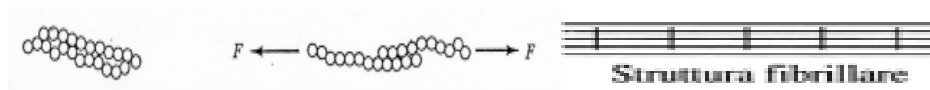


Figura 1.3-Meccanismo di deformazione plastica per scorrimento delle catene e struttura fibrillare annessa ^[2]

1.2.3. ELASTOMERI

Gli elastomeri possono essere considerati come una sorta di via di mezzo tra le resine termoindurenti e quelle termoplastiche e la loro principale caratteristica è la flessibilità. Infatti sono molto elastici e, dopo che vengono allungati, tornano alle dimensioni iniziali.

Gli elastomeri sono polimeri ad alto peso molecolare in cui i monomeri di partenza presentano doppi legami: per questo il metodo di reticolazione più largamente usato è la vulcanizzazione con lo zolfo. La vulcanizzazione, infatti, provoca una modifica della conformazione molecolare del polimero alla quale è dovuto l'aumento di elasticità e resistenza alla trazione.

Gli elastomeri possono essere suddivisi secondo le loro prestazioni in tre gruppi distinti:

- Elastomeri per impieghi generici che si deteriorano in ambienti aggressivi come aria calda, oli minerali, carburanti, ossidanti, ozono. Il vantaggio di questa tipologia è rappresentato dal loro basso prezzo oltre che dalle discrete prestazioni alle basse temperature.
- Elastomeri ad elevate prestazioni che forniscono buone prestazioni anche in ambienti aggressivi a discapito di un lieve incremento di prezzo rispetto a quelli del gruppo precedente.
- Elastomeri speciali che forniscono prestazioni elevate rispondenti a specifici bisogni del progettista. L'aumento di costo è però elevato.

1.3. METODI DI PRODUZIONE

Le materie plastiche derivano da materiali organici naturali come la cellulosa, il carbone, il gas naturale, il sale e il petrolio greggio. Quest'ultimo è una miscela complessa da migliaia di composti che deve essere raffinata prima di poter essere usata. La produzione delle materie plastiche inizia in raffineria con la distillazione del petrolio greggio. In questo modo il greggio pesante viene separato in gruppi di componenti più leggeri chiamati frazioni. Ogni frazione è una miscela di catene di idrocarburi che variano a

seconda delle dimensioni della struttura delle loro molecole; una di queste frazioni è la nafta che è il composto fondamentale per la produzione delle materie plastiche.

La produzione di queste comprende due processi principali: la polimerizzazione e la policondensazione, i quali richiedono catalizzatori specifici. In un reattore di polimerizzazione, i monomeri come l'etilene e il propilene sono collegati insieme per formare lunghe catene di polimeri. Ogni polimero ha proprietà, struttura e dimensioni proprie a seconda dei vari tipi di monomeri di base usati.

Indipendentemente dal tipo di resina tutte le lavorazioni delle materie plastiche hanno in comune la velocità di produzione e la possibilità di automatizzare gli impianti consentendo la riduzione dei costi di fabbricazione e l'aumento della produttività. I tre metodi principali per la produzione di materie plastiche sono:

- **Stampaggio ad iniezione:** è uno dei metodi di lavorazione più usati per la formatura dei materiali termoplastici; in questo processo i granuli di materia plastica vengono caricati da una tramoggia, attraverso un'apertura nel cilindro di iniezione, sulla superficie di una vite rotante che li spinge avanti verso lo stampo. La rotazione della vite forza i granuli contro le pareti riscaldate del cilindro provocandone la fusione a causa del calore di compressione, dell'attrito e del riscaldamento delle pareti del cilindro. Quando una quantità sufficiente di materia plastica fusa arriva allo stampo che si trova alla fine della vite, questa si arresta e con un movimento a stantuffo inietta un getto della materia plastica fusa in un canale di alimentazione e successivamente nelle cavità dello stampo. L'albero della vite mantiene in pressione, per breve tempo, il materiale plastico alimentato nello stampo, in modo da permettergli di diventare solido, e infine si ritrae. Lo stampo viene poi raffreddato ad acqua per far solidificare rapidamente il pezzo e da ultimo viene aperto e il pezzo stampato viene espulso dallo stampo per mezzo di aria o di perni d'iniezione a molla. In figura 1.3 è riportata la schematizzazione del processo;

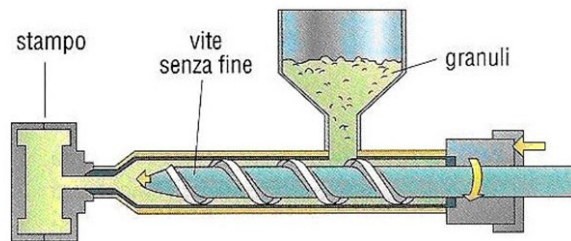


Figura 1.3-Schema di un processo di stampaggio ad iniezione

- Stampaggio a compressione:** è una tecnologia che normalmente viene usata per i polimeri termoindurenti; il processo consiste nel comprimere il materiale plastico all'interno di un'impronta di uno stampo riscaldato. Il calore dello stampo fluidifica così il materiale termoindurente e rende possibile la pressione e di conseguenza la realizzazione della forma. In figura 1.31 viene riportata la schematizzazione del processo.

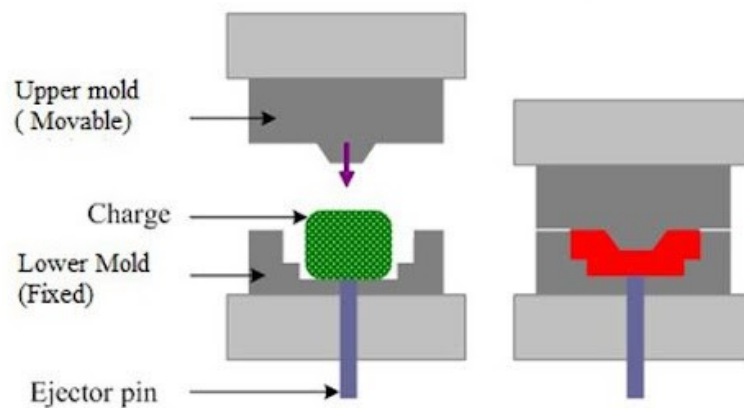


Figura 1.31-Schema di un processo di stampaggio a compressione ^[3]

- **Manifattura additiva:** permette di realizzare oggetti generando e sommando strati successivi di materiale anziché per sottrazione dal pieno, così come avviene in molte tecniche della produzione tradizionale come tornitura e fresatura. La manifattura additiva utilizza tecnologie anche molto diverse tra loro, in questo lavoro verrà posta l'attenzione sulla tecnica *FDM (Fused Deposition Modelling)*.

1.4. IL MATERIALE ABS

L' ABS (*Acrilonitrile Butadiene Stirene*), con formula chimica $C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N$, è un copolimero derivato dallo stirene polimerizzato insieme all'acrilonitrile in presenza di polibutadiene, e perciò può essere definito come termopolimero. Le proporzioni possono variare dal 15% al 35% di acrilonitrile, dal 5% al 30% di butadiene e dal 40% al 60% di stirene. Il risultato è una lunga catena di polibutadiene incrociata con catene più corte di poli (stirene-co-acrilonitrile). Nella figura 1.4 si può osservare la formula chimica dell'ABS, mentre la figura 2.41 mette in evidenza la struttura dei tre monomeri.

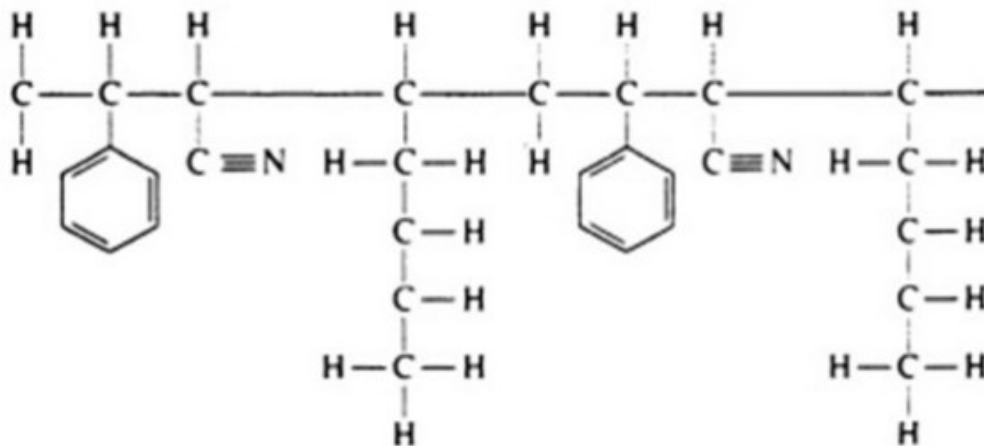


Figura 1.4-Struttura molecolare dell'ABS ^[4]

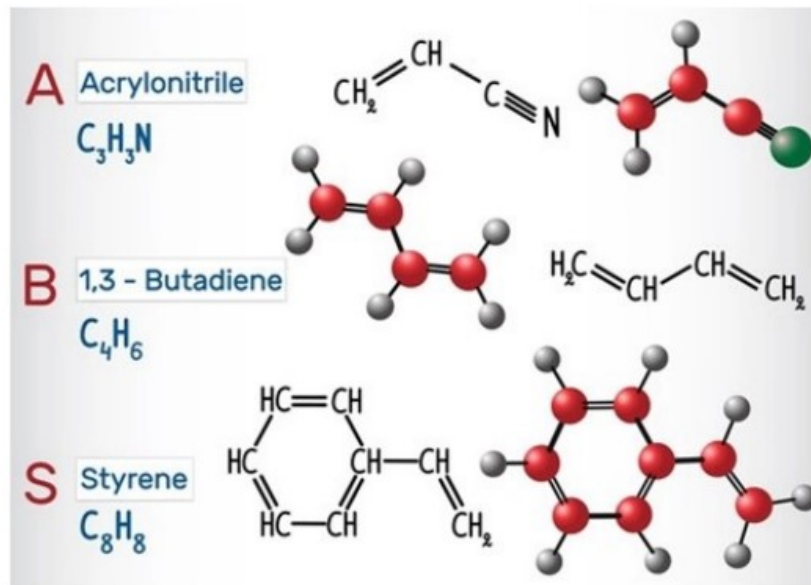


Figura 1.41-Struttura dei tre monomeri principali che compongono l'ABS. [4]

Le proprietà che i singoli monomeri forniscono all'ABS sono le seguenti:

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

1.41. PROPRIETÀ MECCANICHE

L'ABS presenta un'ampia finestra di elaborazione e può essere lavorato sulla maggior parte dei macchinari standard. Può essere stampato ad iniezione, soffiato oppure estruso. Ha una bassa temperatura di fusione che lo rende particolarmente adatto per

l'elaborazione mediante stampa 3D. Inoltre, la plastica ABS è un materiale biocompatibile, riciclabile al 100%, atossico ed innocuo. Infatti, non presenta agenti cancerogeni e non sono noti effetti avversi sulla salute correlati alla sua esposizione.

I principali punti di forza dell'ABS sono:

- È un materiale con buona lavorabilità e processabilità;
- Presenta un'ottima resistenza chimica a solventi, alcali, ad acido cloridrico, all'alcool e agli oli animali, vegetali e minerali;
- Ha un'ottima stabilità dimensionale; l'ABS, infatti, non è soggetto a ritiri o deformazioni;
- È tenace anche alle basse temperature;
- Possiede buone caratteristiche meccaniche: l'ABS è tenace e resistente agli urti e ai graffi;
- Ha una buona insonorizzazione;
- La colorabilità e la brillantezza sono molto buone;
- L'ABS è adatto in particolare per la cromatura;
- Possibile riciclo e miscelazione con resine vergini fino al 25% senza perdite elevate di proprietà termiche e meccaniche;

Quindi si tratta di un materiale che possiede buone proprietà meccaniche in quanto presenta caratteristiche quali durezza, resistenza agli urti ed isolamento elettrico che gli permettono di trovare spazi in vari campi di applicazione.

Mentre per quanto riguarda i punti di debolezza di questo materiale, questi sono:

- È un materiale igroscopico; deve quindi essere essiccato prima della sua lavorazione;
- La resistenza alla fatica è scarsa;
- L'esposizione ai raggi UV tende a far scolorire l'ABS e a deteriorare le proprietà meccaniche;
- La resistenza agli agenti atmosferici è limitata;
- È infiammabile ad elevate temperature se non appositamente additivato;

- Non è adatto per il contatto alimentare e per il settore medicale.

Le proprietà del prodotto in ABS sono influenzate da come il materiale è processato per ottenere l'oggetto finito; per esempio, lo stampaggio ad alte temperature migliora l'esteticità e la resistenza termica del prodotto, mentre una migliore resistenza all'impatto e solidità sono ottenute dallo stampaggio a basse temperature.

Nella tabella 1.41 sono riportati i valori delle principali proprietà dell'ABS.

DENSITÀ	1040 kg/m ³
MODULO ELASTICO	2390 MPa
TENSIONE A SNERVAMENTO	41,40 MPa
TENSIONE A ROTTURA	44,30 MPa
CALORE SPECIFICO	1720 J/ kg °C
DUREZZA ROCKWELL	102-124
COEFFICIENTE DI ESPANSIONE TERMICA	9,54e-05 1/°C
CONDUCIBILITÀ TERMICA	0,258 W/m °C
DEFORMAZIONE A ROTTURA	2,92-3,14
RESISTENZA ALL'URTO	30-450 J/m

Tabella 1.41- Principali proprietà dell'ABS [5]

1.42. CAMPI DI APPLICAZIONE

L'acrilonitrile-butadiene-stirene, in linea generale, può essere usato nella fascia di temperatura da -20°C a +80°C e, grazie alle sue proprietà, come l'elevata durezza e resistenza all'impatto, la facilità di lavorazione, la resistenza alle sostanze chimiche ed agli agenti atmosferici, l'ABS è molto utilizzato per creare oggetti leggeri ma allo stesso tempo resistenti.

Le applicazioni tipiche dell'ABS sono le seguenti:

- Industria automobilistica: pannelli di portiere, montanti, componenti dei sedili, griglie, pannelli degli strumenti, alloggiamenti di specchi;
- Elettrodomestici: alloggiamenti per apparecchi di cucina e aspirapolvere, pannelli di comando di elettrodomestici;
- Estrusione: lastre, piatti doccia, tettucci di trattori, profili, rivestimenti interni di frigoriferi, valige;
- Applicazioni generali: giocattoli, articoli di consumo, telefoni, caschi protettivi.

In figura 1.42 sono riportati alcuni componenti realizzati in ABS relativi a diversi campi di applicazione.



Figura 1.42-Esempi di componenti realizzati in ABS

In particolar modo nel campo automotive si registra un frequente utilizzo di componenti in ABS, precedentemente stampati con la tecnica FDM, grazie alle sue proprietà di resistenza agli urti, leggerezza e buone qualità estetiche. Esempi di componenti del settore automotive realizzati in ABS sono i rivestimenti di paraurti,

montanti, plance, componenti interni quali ad esempio il pomello del cambio, accessori per sedili, rivestimenti interni portiere e così via, sempre rimanendo nel campo di vetture commerciali ed a basso costo.

CAPITOLO 2-LA MANIFATTURA ADDITIVA

2.1. GENERALITÀ DEL PROCESSO

Nelle lavorazioni di tipo tradizionale, come per esempio le lavorazioni per asportazione di truciolo, le parti vengono generalmente ottenute per sottrazione di materiale, questo però comporta che si generi molto sfrido sotto forma di truciolo.

Le tecniche di additive manufacturing ribaltano questo concetto, in quanto, partendo da un modello digitale, consentono di realizzare oggetti fisici aggiungendo strato dopo strato il materiale e questo permette di generare una quantità di scarti decisamente inferiore rispetto a quella generata tramite i processi di tipo sottrattivo. Numerose sono le tecniche e i materiali a disposizione, ma il principio di base è sempre lo stesso: si parte da polveri e mediante la sovrapposizione di strati di materiale si ottiene l'oggetto finito. La figura 2.1 mette in evidenza il principio di funzionamento che sta alla base delle varie tecniche di additive manufacturing.

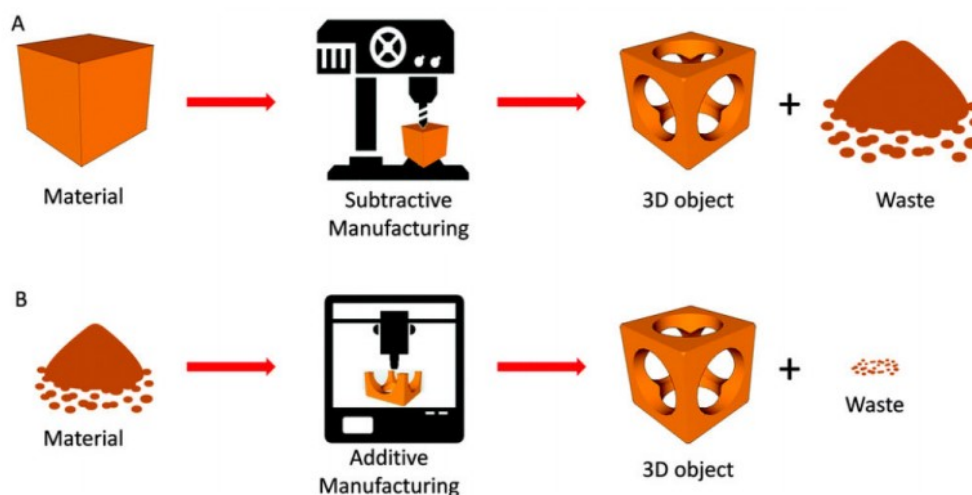


Figura 2.1- Differenze del principio di funzionamento tra i processi di produzione sottrattivi ed additivi. [3]

In realtà non si tratta di un'innovazione tecnologica recente, in quanto si tratta di una tecnica già usata negli anni '80 con il nome di *prototipazione rapida*. Il nome prototipazione derivava dal fatto che all'inizio con queste tecniche venivano realizzate parti non strutturali, spesso in plastica, da utilizzare come prototipi su cui fare studi, mentre il nome rapida indicava che tali prototipi potevano essere realizzati senza la necessità di passare attraverso la costruzione di appositi stampi, poiché non si faceva altro che aggiungere strato per strato il materiale partendo dal modello 3D della parte.

Negli ultimi anni sono stati fatti dei progressi significativi su questa tecnologia come per esempio:

- Possibilità di realizzare prodotti di maggiori dimensioni e con geometrie molto complesse non realizzabili con tecniche tradizionali;
- Tempi di produzione ridotti rispetto al passato;
- Possibilità di trattare un'ampia gamma di materiali come ceramiche, metalli, compositi e non più solo le plastiche;
- Riduzione del numero di componenti di una parte, con conseguenti vantaggi su tempi di produzione, costi di produzione, tempi di consegna e peso della parte,
- Ecosostenibilità, in quanto il materiale non utilizzato può essere riutilizzato seguendo le logiche di un'economia circolare;
- Possibilità di produrre su richiesta e fornire al cliente un alto grado di personalizzazione;
- Riduzione del costo delle macchine.

L'insieme di questi fattori ha permesso oggi a questa tecnologia di poter essere impiegata per la produzione della parte vera e propria e non più solamente per il prototipo della parte. Gli ambiti in cui questa tecnica viene utilizzata sono molto vari e vanno dal campo automotive, a quello aeronautico ed aerospaziale, da quello medicale a quello delle costruzioni industriali e dell'industria dello sport.

Tuttavia, lo svantaggio che permane ancora oggi e che ne limita di molto la diffusione è la lentezza del processo, infatti per ottenere una parte dalla forma complicata possono

essere necessarie diverse ore se non addirittura qualche giorno, e per questo motivo si presta poco alla produzione di massa. Quindi, per esempio, nell'industria automobilistica la produzione additiva può essere impiegata per produrre parti di ricambio, permettendo così di non avere dei magazzini su base regionale, ma realizzando delle strutture in cui sono presenti macchine per la produzione additiva che producono al momento del bisogno.

Infine, è utile far notare come il concetto di manifattura additiva generi un cambiamento anche nel ruolo del cliente finale; infatti, la possibilità di realizzare un oggetto a partire da un semplice disegno CAD incentiva il coinvolgimento del consumatore nel processo di produzione attraverso delle piattaforme online che permettono di agire sull'anteprima grafica dell'oggetto. In questo senso si va verso una "democratizzazione" dei processi produttivi, ragion per cui l'additive manufacturing è uno dei pilastri dell'Industry 4.0.

2.2. FLUSSO DI LAVORO

Il processo di additive manufacturing ha come punto di partenza la realizzazione di un modello 3D dell'oggetto da produrre con 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 (o layer) dell'oggetto che possano essere stampati. Infine, si procede con il processo di stampa e poi, a seconda dell'utilizzo del prodotto finale, potranno essere effettuate delle lavorazioni di finitura superficiale.

Più specificamente, gli steps costituenti il processo relativo e le tecnologie di stampa 3D possono essere suddivisi nel seguente modo:

- Preparazione del modello CAD;
- Conversione del modello in formato STL;
- Trasferimento del file alla macchina;
- Settaggio della macchina;

- Stampa dell'oggetto;
- Rimozione del prodotto;
- Post-processing;
- Applicazione.

Il primo step necessario alla messa in forma di un componente tramite additive manufacturing riguarda la preparazione di un modello CAD; quest'ultimo rappresenta il corrispondente digitale dell'oggetto da costruire e deve descrivere perfettamente la geometria esterna dell'oggetto considerato e può essere ottenuto tramite software di modellazione 3D oppure avvalendosi di scanner 3D.

Il secondo step invece riguarda il processo di stratificazione del modello, anche detto slicing, e consiste nella suddivisione virtuale dell'oggetto in strati di spessore uniforme, i quali trovano successivamente corrispondenza nei layers fisici nell'ambito del processo di stampa. A seconda della suddivisione adottata, questo passaggio può essere messo a punto tramite la conversione del modello in formato STL (*Standard Triangulation Language*). In particolare, la conversione del file CAD in formato STL è necessaria al fine di approssimare la superficie esterna dell'oggetto con una rete di triangoli utili ad eliminare eventuali errori di disegno e geometrie di costruzione. Questo file convertito, una volta inviato alla macchina, funge da base per la preparazione del modello opportunamente separato in layers, pronto per la messa in forma.

Il concetto di settaggio della macchina, eseguito tramite la modulazione dei parametri propri dello specifico processo di additive manufacturing adottato, introduce la distinzione tra *macchina aperta* e *macchina chiusa*. Fanno parte della prima tipologia di macchine le macchine di set up, nelle quali è necessaria l'impostazione di tutti i parametri da seguire durante la stampa, mentre per la seconda categoria di macchine non si può propriamente parlare di programmazione dell'apparato; infatti, in quest'ultimo caso le macchine sono fornite dai produttori in forma chiusa e non possono essere modificate nel loro set up ad eccezione di pochi parametri.

La sequenza di stampa prosegue con la vera e propria messa in forma del materiale, caratterizzata dalla forma del componente e dalla configurazione precedentemente scelta per la macchina, alla quale seguono le fasi di estrazione e post processing.

Lo step di finitura, solitamente preceduto da un passaggio di pulitura dell'oggetto, è tipicamente eseguito manualmente e può richiedere maggiore o minor precisione a seconda della specifica tecnologia impiegata. In particolare, siccome l'oggetto da produrre viene suddiviso in slices ed il materiale è deposto in modo stratificato, il prodotto finale presenta una morfologia superficiale che è funzione dello spessore dei layers costituenti il componente stesso. Ne consegue che la qualità superficiale ottenibile con una determinata tecnologia di additive manufacturing aumenta al diminuire dello spessore dei singoli strati e, viceversa, decresce all'aumentare degli stessi.

2.3. PRINCIPALI TECNICHE DI ADDITIVE MANUFACTURING PER I MATERIALI POLIMERICI

Il rapido sviluppo della manifattura additiva ha determinato il sorgere di numerose tecnologie di stampa 3D, le quali presentano oggi applicabilità trasversale su tutte le classi di materiali; infatti, sono stati sviluppati processi in grado di operare con materiali metallici, polimerici, ceramici e di natura composita. Per attinenza con l'argomento di questo lavoro di tesi, nel seguito sono riportate le tecnologie di additive manufacturing attualmente disponibili riguardo la famiglia dei materiali polimerici.

Una prima distinzione può essere fatta sullo stato fisico dei materiali sfruttabili nei differenti processi di messa in forma, mentre una seconda classificazione può riguardare la natura del sistema di consolidamento del materiale utilizzato per la produzione dell'oggetto in questione. In particolare, le tecnologie di additive manufacturing possono essere applicate a materiali polimerici liquidi, materiali in forma di particelle

discrete, materiali allo stato fuso ed a fogli di materia allo stato solido. Contestualmente nell'ambito di tali processi è possibile distinguere tecniche che si avvalgono di differenti sistemi tecnologici come, per esempio, sorgenti a singolo o a doppio punto, sorgenti costituite da serie di singoli punti o sorgenti capaci di coprire intere superfici. In figura 2.3 è riportata questo tipo di classificazione dove nelle righe sono riportate le tipologie di materiali, mentre nelle colonne le soluzioni tecnologiche. Le caselle vuote corrispondono a combinazioni di soluzioni tecnologiche e tipologie di materiali ad oggi incompatibili e dovrebbero fungere da linea guida per il futuro sviluppo di nuove tecnologie nell'ambito dell'additive manufacturing.

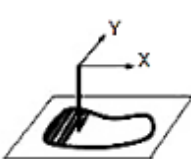
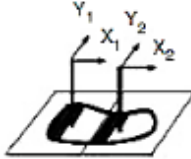

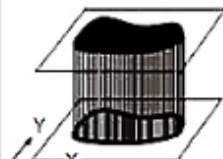
	1D Channel 	2x1D Channels 	Array of 1D Channels 	2D Channel 
Liquid Polymer	SLA (3D Sys)	Dual beam SLA (3D Sys)	Objet	Envisiontech MicroTEC
Discrete Particles	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	LST (EOS)	3D Printing	DPS
Molten Mat.	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Solid Sheets	Solido PLT (KIRA)			

Figura 2.3-Classificazione delle tecnologie di additive manufacturing ^[6]

La prima classe di materiali osservabile in questa classificazione è quella dei materiali polimerici allo stato liquido; a tale categoria appartengono i sistemi liquidi fotopolimerizzabili e gli idrogeli. Tra queste tecnologie è presente il metodo SLA,

comunemente conosciuto con il nome di stereolitografia. Tale tecnologia, come mostrato in figura 2.31, si avvale di un sistema singolo a doppio fascio elettromagnetico, utile alla fotopolimerizzazione strato per strato del materiale di costruzione.

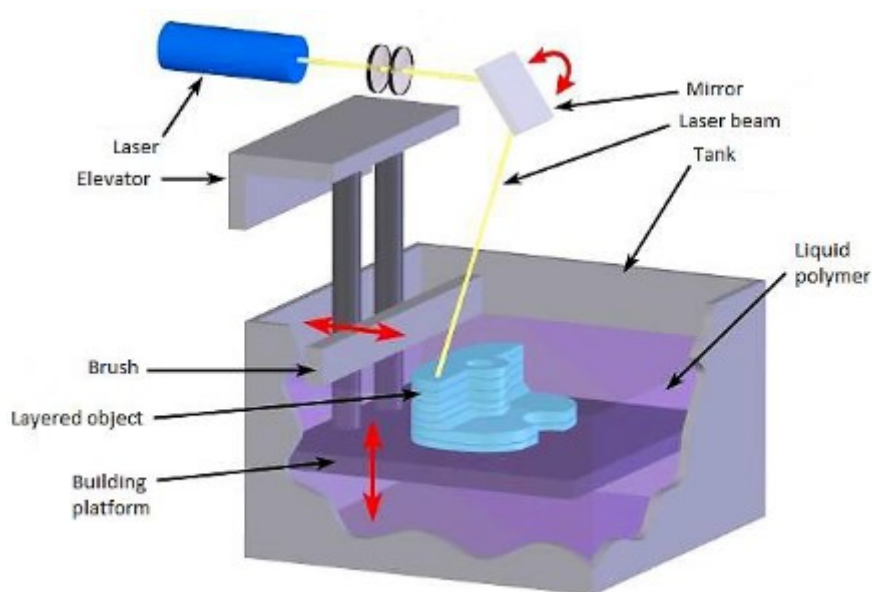


Figura 2.31-Rappresentazione di una stampante SLA ^[7]

La seconda classe di materiali utilizzabili riguarda l'importante categoria dei polimeri in forma di polveri, ampiamente utilizzati nelle principali tecnologie di manifattura additiva per la produzione di componenti in materiale plastico. A questa categoria di materie prime, la principale tecnologia di stampa 3D risulta essere quella che si avvale del sistema di *Selective Laser Sintering* (SLS). Tale processo consiste nella fusione e successiva risolidificazione controllata strato per strato del materiale costituente i letti di polvere preparati preventivamente volta per volta. Più in particolare, la fusione selettiva del materiale viene operata per mezzo della somministrazione puntuale di calore tramite l'utilizzo di un fascio laser che può essere a singola o a doppia sorgente.

Infine, per tale tecnologia vanno esclusivamente usati materiali polimerici di natura termoplastica per via della necessità di portare a fusione le polveri da essi costituite.

In figura 2.31 è riportato un esempio di stampante SLS.

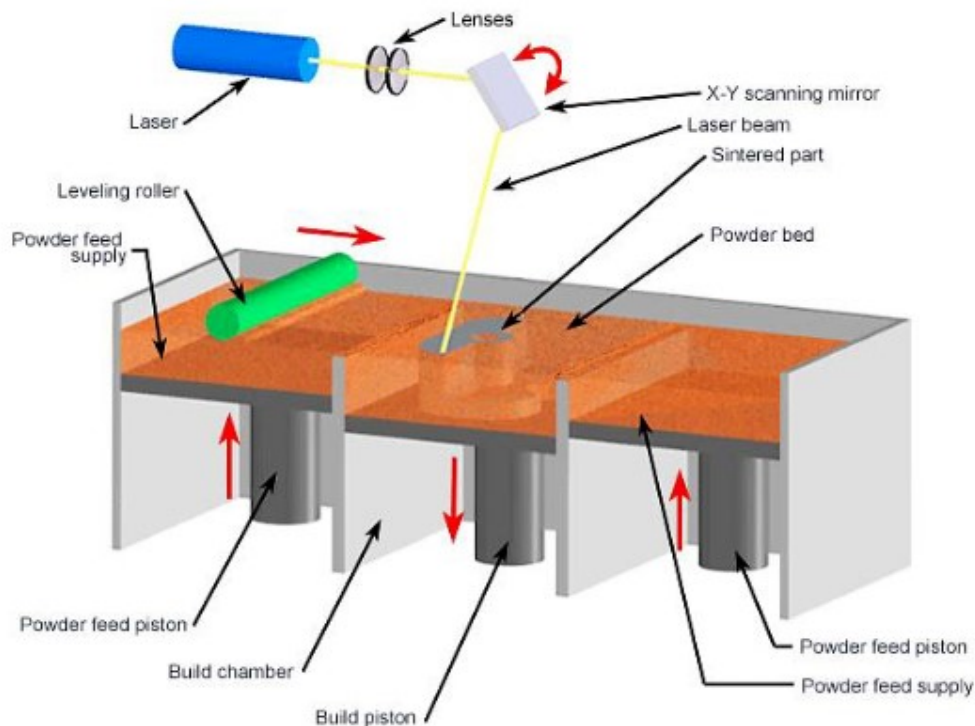


Figura 2.31-Esempio di stampante SLS [8]

La terza categoria di materiali utilizzabili riguarda i materiali polimerici allo stato fuso e la tecnologia solitamente associata a questa categoria è la *Fused Deposition Modeling* (FDM); quest'ultima prevede la fusione del materiale polimerico, operata mediante una camera di preriscaldamento, e la sua successiva deposizione ad opera di un ugello a sua volta mantenuto ad una temperatura prossima a quella del punto di fusione del materiale impiegato. Nel caso dell'FDM i materiali impiegabili sono i materiali polimerici termoplastici e in alcuni casi può anche essere presente un secondo ugello utile alla

deposizione dei profili di supporto per il materiale principale durante la deposizione. In figura 2.32 è riportata la rappresentazione di una stampante FDM.

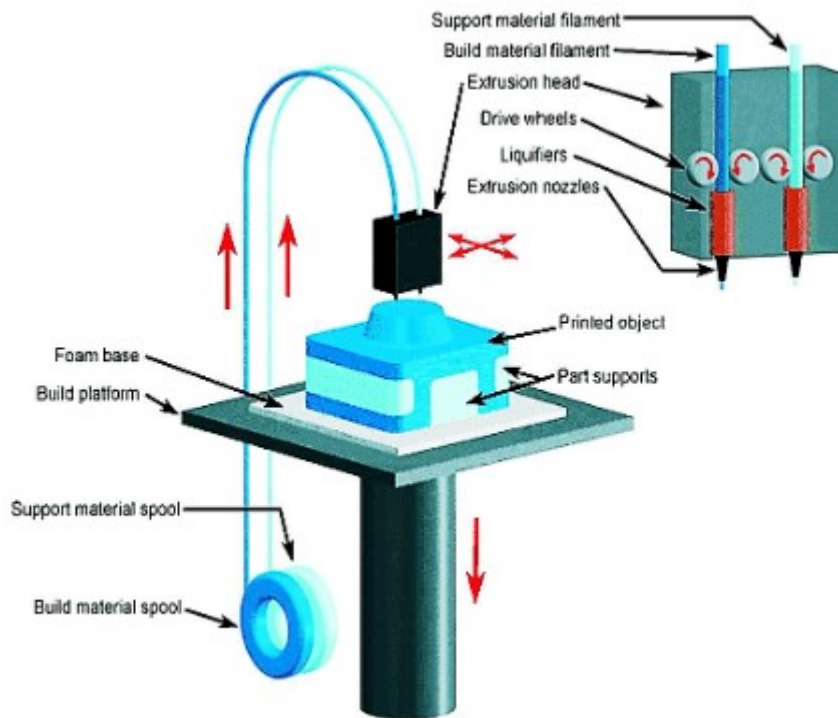


Figura 2.32-Rappresentazione di una stampante FDM ^[8]

L'ultima categoria di materiali comprende le materie prime in forma di fogli di materiale polimerico allo stato solido. A questa tipologia di materiali di base sono associate le tecnologie del tipo *Laminated Object Manufacturing* (LOM), dove, ognuna delle quali è basata sulla stratificazione di fogli di materiale polimerico, fatti aderire l'uno all'altro tramite l'utilizzo di un legante termicamente attivato e, poi, opportunamente tagliati secondo profili dettati dalla geometria dell'oggetto considerato, come mostrato in figura 2.33.

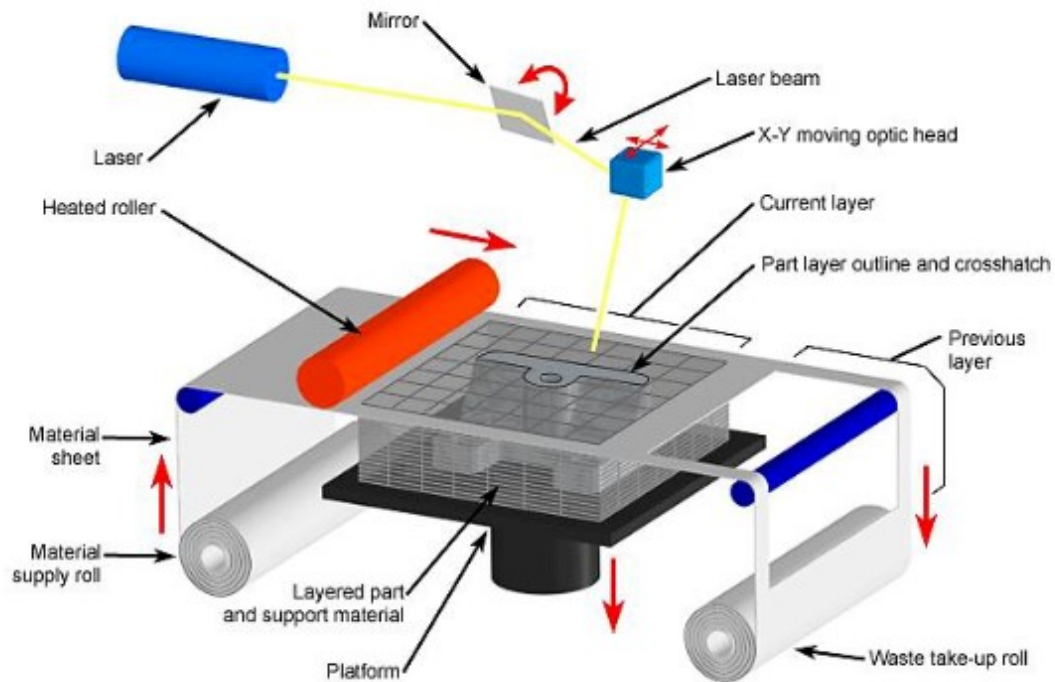


Figura 2.33-Rappresentazione di un sistema LOM [8]

Nei paragrafi successivi viene approfondita la tecnica FDM, riguardante materiali in forma di fili opportunamente fusi durante il processo di messa in forma, in quanto i provini di nostro interesse sono stati ottenuti con questo processo.

2.4. IL PROCESSO FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM)

La presente tecnologia di stampa 3D appartiene alla famiglia di processi di additive manufacturing che racchiude i sistemi basati sull'estrusione di materiale. In particolare, come anticipato nel paragrafo precedente e schematizzato in figura 2.4, il principio di funzionamento della tecnologia FDM consiste nella deposizione controllata, strato dopo strato, di materiale preventivamente fuso.

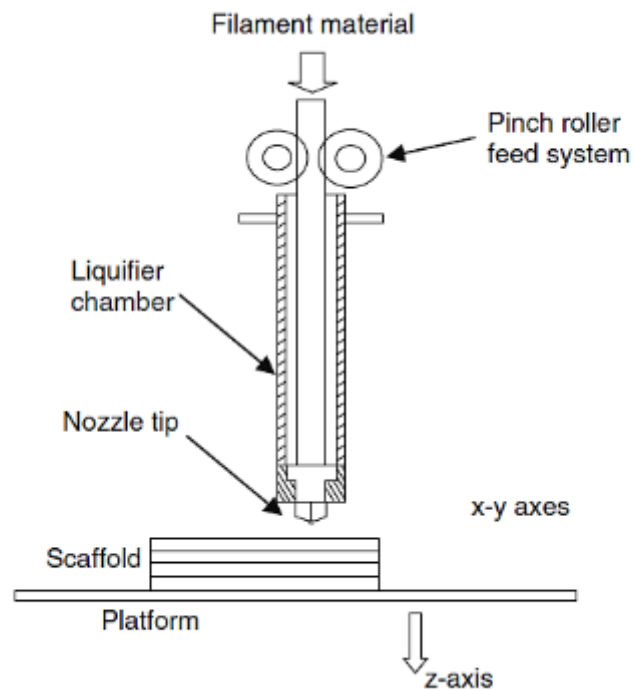


Figura 2.4-Rappresentazione sistema di stampa FDM ^[9]

Come per tutti i processi di additive manufacturing, anche nel caso del FDM il processo ha inizio con la preparazione del modello 3D del componente da stampare e con la sua successiva conversione in linguaggio macchina. Più precisamente, il file CAD contenente il modello è prima convertito al formato STL e successivamente in SML, ovvero il formato supportato dalla stampante.

Dal punto di vista operativo, la macchina è alimentata da un materiale tipicamente in forma di filo che viene fuso in una camera apposita mediante un sistema di resistenze ad essa annesso. Questi fili possono essere di natura semicristallina o costituiti completamente da materiale amorfo e, a seconda dei tipi di filo, la temperatura di riscaldamento del materiale è diversa: infatti per quelli di natura semicristallina è necessario portare il materiale a una temperatura di poco superiore a quella del punto di fusione, mentre nel caso dei materiali amorfi è sufficiente superare la temperatura di transizione vetrosa in una misura tale per cui la viscosità del polimero in oggetto garantisca un'opportuna facilità di estrusione e risultati soddisfacenti per ciò che

riguarda le proprietà finali del prodotto. Per entrambe le classi di materiali polimerici, la temperatura della camera deve essere controllata costantemente per non superare i livelli oltre i quali il materiale potrebbe andare incontro a fenomeni di termodegradazione.

Una volta portato in temperatura, il materiale viene estruso tramite un ugello avente un orifizio la cui dimensione determina di conseguenza la dimensione dei *roads* depositati. Gli ugelli di ogni macchina FMD sono intercambiabili e sono commercializzati con un'ampia gamma di dimensioni dell'orifizio: la scelta dell'ugello più opportuno viene fatta in base al materiale da processare, alla finitura superficiale richiesta e alla dimensione dell'oggetto da formare. Inoltre, solitamente, l'ugello principale è affiancato da un secondo ugello che può essere sfruttato per la deposizione di materiale di supporto.

Per quello che riguarda le modalità con cui il materiale polimerico in stato semisolido viene eiettato attraverso l'ugello, dalla camera di preriscaldamento, non sono rari i sistemi dotati di vite a coclea anche se, più tipicamente, la forza spingente è rappresentata unicamente dalla differenza di pressione che viene a verificarsi tra l'ambiente esterno e la camera di preriscaldamento, dove lo spingimento del filo ad opera di una ruota motrice determina l'insorgere di una leggera sovrappressione.

Il materiale viene poi depositato secondo un percorso calcolato dal software di macchina in base al modello CAD ed ai parametri di processo utilizzati su di una piattaforma di supporto tipicamente in materiale idrosolubile, tramite il movimento relativo della piattaforma della macchina e dell'ugello. In particolare, l'ugello opera spostamenti nel piano XY, mentre la piattaforma è responsabile dello spostamento in direzione verticale che permette la stratificazione dell'oggetto.

Terminata la messa in forma della parte, quest'ultima viene liberata dalla piattaforma e da altri eventuali componenti di supporto tramite azioni manuali, o, nel caso di materiali idrosolubili, mediante l'utilizzo di soluzioni acquose. Infine, in base alla qualità

superficiale richiesta, il componente può essere sottoposto o meno ad eventuali trattamenti di finitura.

I materiali polimerici processabili tramite tecnologia FDM sono per lo più appartenenti alla categoria dei materiali termoplastici amorfi. Questa categoria di materiali presenta infatti una graduale diminuzione della viscosità all'aumentare della temperatura e quindi presentano un comportamento reologico prevedibile al variare della temperatura determinando così una facilità nel controllo del fuso e del conseguente estruso.

I principali materiali in filo impiegati nei processi FDM sono:

- L'Acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS);
- L'acido polilattico (PLA);
- Il policarbonato (PC);
- I blend PC-ABS;
- L'acrilonitrile-stirene-acrilato (ASA);
- Le poliammidi 6 e 12;
- Il kevlar.

Sebbene i fili per FDM non abbiano particolari requisiti da soddisfare, nell'ambito del panorama dei materiali si ha un'alta variabilità delle proprietà ad essi legate; in particolare, le caratteristiche di maggior rilevanza sono il colore del materiale, le prestazioni meccaniche conseguibili con i componenti stampati e le proprietà termiche. Tra queste, l'aspetto più importante è quello relativo alle proprietà termiche in quanto hanno una forte incidenza sulla processabilità del materiale polimerico e sulla qualità dei manufatti ottenibili. Infine, riveste un'importanza di prim'ordine il settaggio dei molti parametri di processo, mentre il ruolo delle proprietà dei materiali vergini nella determinazione della bontà dei risultati conseguibili riveste un'importanza marginale.

2.41. PARAMETRI DI PROCESSO

Le proprietà dei componenti realizzati tramite tecnologia FDM, sia per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, sia per ciò che concerne la qualità superficiale, dipendono fortemente dai parametri di processo. Questi, oltre a influenzare significativamente le caratteristiche dei manufatti, hanno un'incidenza importante anche sulla velocità del processo di stampa. Per questi motivi si comprende come sia di fondamentale importanza l'ottimizzazione di tali parametri. In figura 2.41 sono riportati i vari aspetti da cui dipende la tecnologia FDM, mentre l'immagine 2.42 mette in evidenza i parametri principali che si sono dimostrati avere maggior incisività sul processo di stampa e sulla qualità dei prodotti.

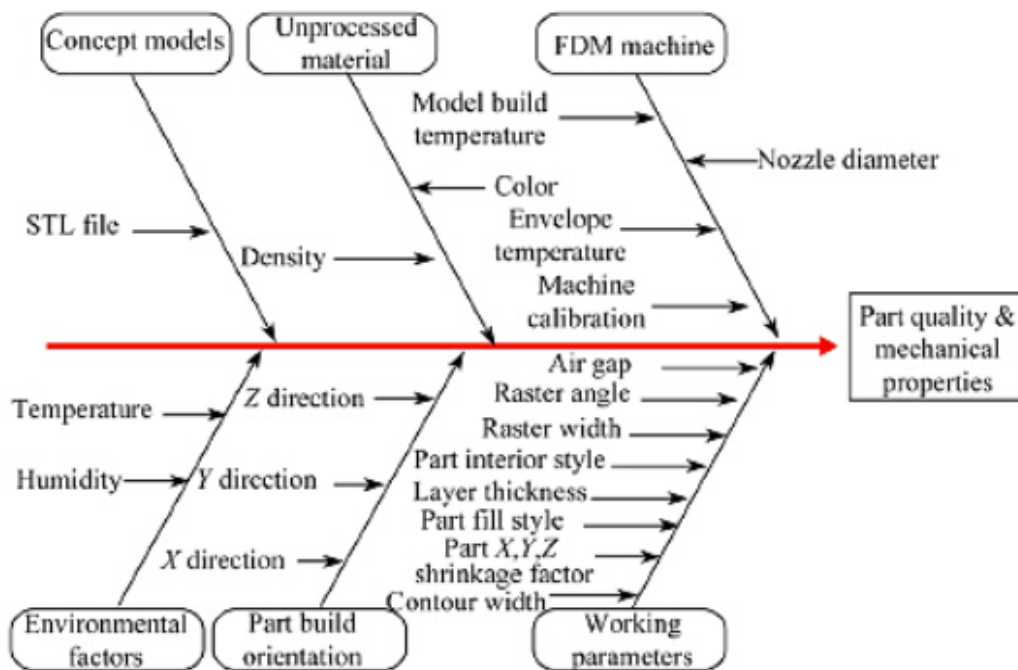


Figura 2.41-Parametri di processo FDM^[10]

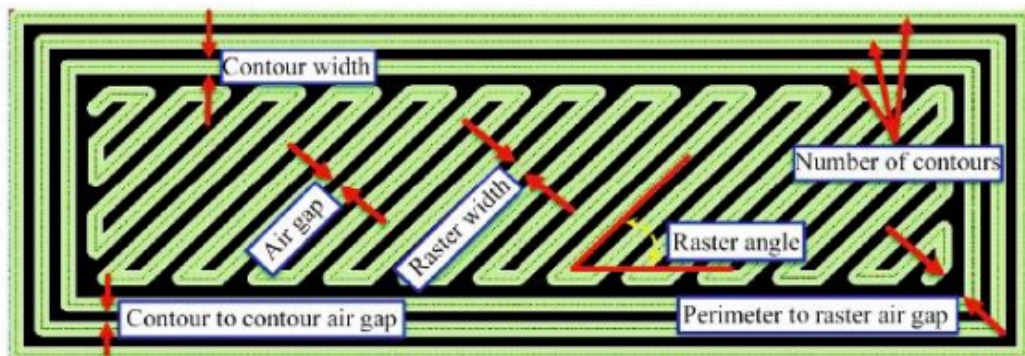


Figura 2.42-Parametri principali relativi alla geometria di stampa ^[10]

Tra le numerose variabili indicate nelle due figure, quelle che si è dimostrato avere maggior incisività sul processo di stampaggio e sulla qualità dei prodotti sono:

- L'air gap;
- Il road width;
- Il raster angle;
- La build orientation;
- Il layer thickness.

Nel processo di stampa FDM le prime zone depositate dal polimero sono quelle che costituiscono il bordo del pezzo nel piano di deposizione, in modo da evitare eventuali fuoriuscite del polimero depositato all'interno; una volta completato il bordo si procede con il riempimento della sezione secondo l'architettura definita dall'utente e infine si procede con lo stampaggio dello strato successivo. La figura 2.43 riassume queste considerazioni.

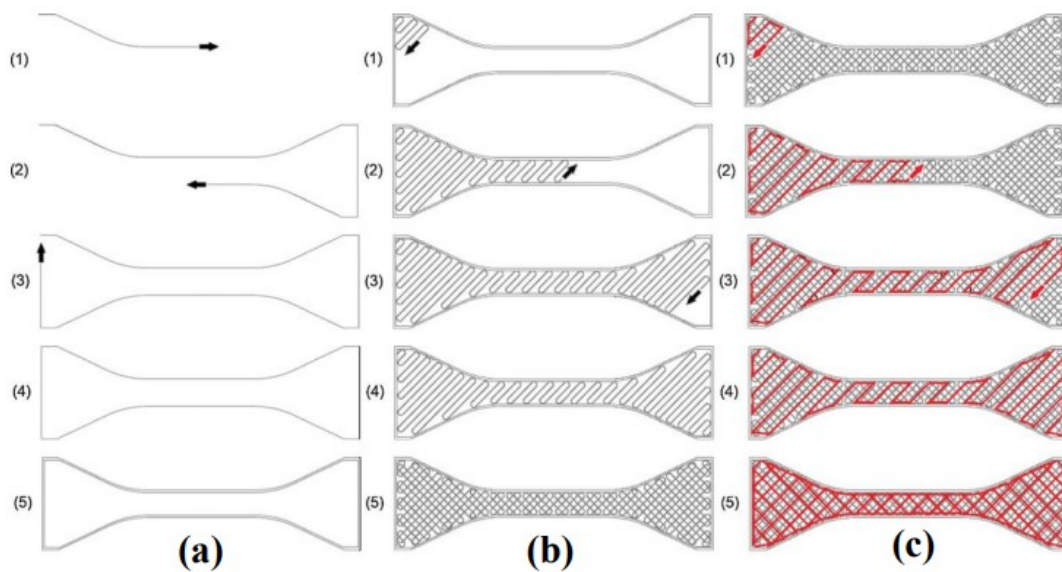


Figura 2.43-Rappresentazione dei passaggi essenziali della deposizione durante il processo FDM: deposizione del contorno (a), riempimento del primo strato (b), deposizione degli strati successivi (c) ^[11]

Durante il processo i filamenti depositati tendono a legarsi e compattarsi l'uno con l'altro per effetto del calore ed è proprio questo meccanismo fisico che garantisce la solidità del componente. Dapprima, infatti, si formano dei colli nei punti di contatto tra i filamenti, dopodiché avvengono i fenomeni di diffusione molecolare e di randomizzazione delle catene polimeriche dei filamenti (Figura 2.44 a), le quali tendono a formare grovigli l'uno con l'altro (Figura 2.44 b). Infine, l'interfaccia tende a scomparire gradualmente e i vuoti vengono via via riempiti per effetto della diffusione molecolare (Figura 2.44 c); in questo modo la struttura del pezzo passerà da una configurazione iniziale discreta e porosa ad una finale continua ed omogenea. Tutte queste considerazioni sono riassunte nella figura 2.44.

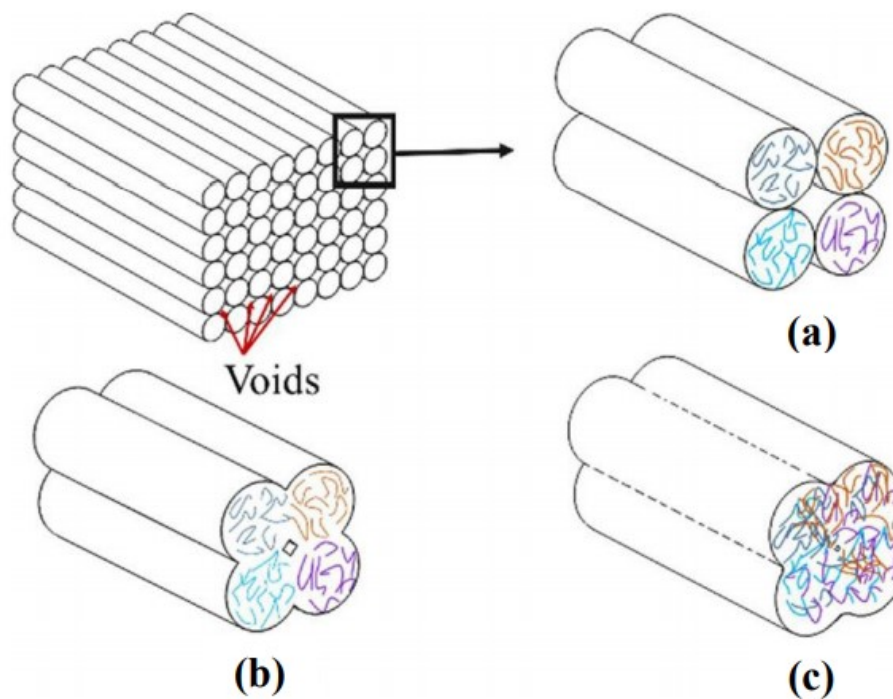


Figura 2.44-Schematizzazione del processo di consolidamento del componente stampato in seguito alla deposizione del filo: formazione dei primi legami tra i filamenti a contatto (a), formazione e crescita dei colli (b), diffusione e randomizzazione delle macromolecole (c).^[11]

2.42. ROAD WIDTH

Il parametro *road width*, che comprende i parametri di *raster width* e *contour width* indica la larghezza del materiale estruso dalla stampante ed è direttamente proporzionale alla dimensione dell'orifizio dell'ugello. Come anticipato nei paragrafi precedenti, gli ugelli della macchina sono tra loro intercambiabili e questo consente una facile modulazione del valore di *road width*.

Il valore assunto da questo parametro ha un'influenza trascurabile sulle proprietà meccaniche dei manufatti, ma ha una sensibile incidenza sulla velocità del processo e sulla qualità superficiale dei componenti stampati; infatti, è evidente che, al diminuire della dimensione dell'estruso, aumentano il numero di *roads* necessari alla deposizione

di una certa quantità di materiale e quindi diminuisce la velocità di stampa e viceversa. Invece, per quanto riguarda la qualità superficiale conseguibile, al diminuire della larghezza dell'estruso aumenta la risoluzione della stampa; ne consegue che il *road width* scelto debba avere un valore di compromesso tra questi due aspetti.

2.43. LAYER THICKNESS

Anche questo parametro è direttamente proporzionale alla dimensione della testa dell'estrusore; infatti, maggiore è la dimensione dell'ugello, maggiore sarà lo spessore degli strati di materiale depositi. Analogamente a quanto detto in precedenza a proposito del *road width*, le proprietà meccaniche non risentono di tale variabile, mentre ne sono fortemente dipendenti la rugosità delle superfici stampate e il tempo di stampa. In particolare, al crescere del *layer thickness* consegue un aumento della rugosità e una diminuzione dei tempi di processo; viceversa, al diminuire dello spessore degli strati depositi. La figura 2.45 riassume questi concetti.

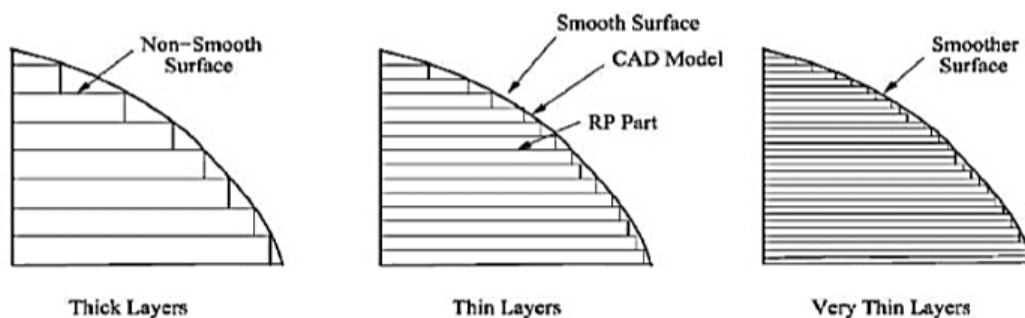


Figura 2.45-Effetto del *layer thickness* sulla qualità superficiale ^[12]

2.44. RASTER ANGLE

L'angolo che il materiale di riempimento forma con un determinato asse contenuto nel piano perpendicolare all'asse dell'ugello è chiamato *raster angle* , ed i valori che può assumere sono compresi tra i 0° e i 90°.

Tale parametro ha un effetto trascurabile per quanto riguarda la velocità di processo, mentre risulta molto importante per le proprietà meccaniche dei manufatti. Più precisamente, le prestazioni meccaniche di un materiale stampato mediante FDM sono massime lungo la direzione parallela all'orientazione dei *roads*, mentre sono minime nella direzione perpendicolare ad essa. Questo comportamento è dovuto al fatto che nel primo caso i filamenti costituenti la parte sono sollecitati in direzione longitudinale, mentre nel secondo caso sono sollecitati lateralmente, venendo così condotti verso un cedimento di carattere decoesivo. Il *raster angle*, inoltre, ha un'importante influenza anche sulla resistenza a flessione, sulla resistenza all'impatto e sulla superficie di frattura dei componenti stampati mediante tecnica FDM.

2.45. AIR GAP

La distanza tra due *roads* adiacenti, ovvero l'*air gap*, ha un'influenza importante sui tempi di processo e sulle caratteristiche finali dei prodotti stampati. Al contrario di quanto detto in precedenza a proposito del *road width* e del *layer thickness*, al diminuire dell'*air gap* si ha un aumento dei tempi di processo in quanto, a parità di area da stampare, è necessaria la deposizione di un maggior numero di *roads*. Tuttavia, la diminuzione di tale parametro determina contemporaneamente anche l'aumento della densità del materiale, mentre un aumento del valore di *air gap* implica l'aumento della porosità del prodotto stampato. Si può concludere affermando che, minore è la distanza tra tracce adiacenti, migliori sono le proprietà meccaniche ed estetiche ottenibili.

2.46. BUILD ORIENTATION

L'orientazione di crescita del componente rispetto allo spazio degli assi X, Y, Z, ovvero la *build orientation*, rappresenta l'ultimo parametro d'interesse. Tale variabile ha una forte influenza sulle proprietà meccaniche dei manufatti stampati, sulla loro finitura superficiale e sui tempi di processo. La figura 2.46 riporta un'illustrazione in merito alle orientazioni di crescita fruibili mediante il processo di stampa FDM.

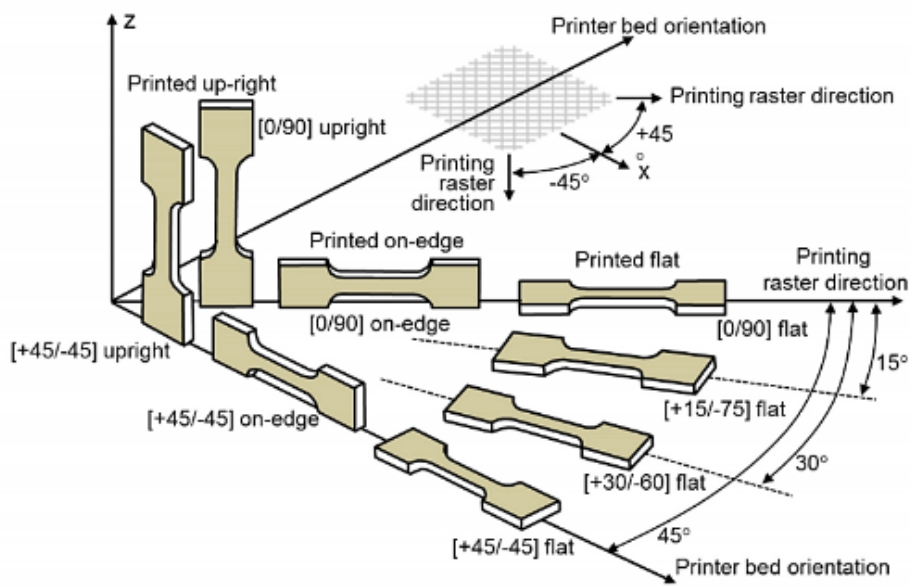


Figura 2.46-Possibili orientazioni di crescita dei manufatti stampati mediante FDM ^[13]

2.47. VANTAGGI E SVANTAGGI

Ad oggi l'FDM è la tecnologia di stampa 3D più diffusa, questo perché innanzitutto si tratta di una tecnica facile da utilizzare, che non necessita di supervisione e che impiega materiali sicuri dal punto di vista ambientale. Per esempio, la materia prima utilizzata nello stampaggio FDM non è così costosa e difficile da riutilizzare come invece lo sono le polveri impiegate nei processi SLS; inoltre è possibile depositare contemporaneamente durante la fase di stampa materiali diversi tramite gli ugelli multipli e questo garantisce notevole flessibilità e libertà di geometria in un unico processo.

Si tratta quindi di una tecnologia molto pulita e sostenibile, che utilizza stampanti economiche e facilmente accessibili, talvolta realizzabili anche mediante appositi kit fai da te, e con la quale è possibile realizzare geometrie complesse e cavità altrimenti complicate da realizzare.

Tuttavia, le stampe 3D non raggiungono lo stesso livello di accuratezza e qualità degli altri oggetti che invece vengono prodotti mediante la stereolitografia, questo perché la forza di adesione tra gli strati è inferiore rispetto a quella che si genera nei processi di stereolitografia, e di conseguenza il peso degli strati superiori potrebbe schiacciare quelli inferiori influenzando così la qualità della stampa. Nonostante ciò, il risultato ottenuto è abbastanza qualitativo e la risoluzione dipende principalmente dalle dimensioni dell'ugello utilizzato, mentre la precisione della macchina dipende dai movimenti dell'estrusore sugli assi X e Y.

Inoltre, contrariamente alla SLA, la tecnologia FDM presenta anche una maggiore complessità, in quanto non solo bisogna tener conto del peso e delle dimensioni, ma anche dei vincoli; infatti bisogna assicurarsi che il prototipo soddisfi le aspettative rappresentate sullo schermo del modello digitale tenendo in considerazione anche i vincoli che possono essere rappresentati da diversi fattori, come per esempio il materiale impiegato, attraverso il quale è possibile prevedere le dimensioni che potrà avere il prototipo.

Un altro svantaggio può essere individuato dai tempi di stampa che sono sicuramente più lunghi rispetto a quelli richiesti dalla stereolitografia ed inoltre la finitura superficiale è considerata accettabile, ma non di qualità e quindi è quasi sempre necessaria una fase di post lavorazione dei manufatti.

L'origine di questi limiti è da ricercare nel processo di *slicing*; quest'ultimo, infatti, discretizzando il modello CAD è in parte responsabile della generazione di una superficie a gradino che varia a seconda della scelta dello spessore dei *layer*. Al fine di ottimizzare al meglio sia le qualità superficiali, sia le caratteristiche meccaniche dei manufatti ottenuti si rivela di fondamentale importanza la scelta dei parametri di stampa.

Infine, vi è da dire che la tecnologia FDM non garantisce la riproducibilità dei pezzi a livello industriale e non è neppure possibile produrre pezzi di grandi dimensioni; proprio per quest'ultimo motivo può essere molto interessante studiare i vari processi di

giunzione dei manufatti ottenuti tramite stampa FDM, tra cui il *friction stir welding*, argomento centrale di questo lavoro di tesi.

2.48. CONFRONTO CON LO STAMPAGGIO AD INIEZIONE

L'affermarsi delle tecnologie di stampa 3D in tutti i settori produttivi ha portato alla sostituzione delle tecniche di stampa tradizionali, come per esempio lo stampaggio ad iniezione.

Solitamente, infatti, nel settore manifatturiero, per realizzare i prodotti, si è sempre fatto uso dello stampaggio ad iniezione; questa tecnica, come già spiegato in precedenza, prevede l'iniezione di materiale fuso all'interno di uno stampo metallico chiuso, che una volta 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 produttivo, costo, velocità e tempistiche.

Per quanto riguarda il volume di produzione, lo stampaggio ad iniezione, solitamente, viene impiegato per produrre grandi quantità di uno stesso pezzo riutilizzando più volte lo stesso stampo; questo porta a una riduzione del numero delle parti, a un aumento dei costi e alla riduzione della praticità del processo. Invece, la stampa 3D consente di realizzare un numero ridotto di oggetti indipendentemente dalla loro geometria.

Per quanto riguarda i costi relativi ai processi, lo stampaggio ad iniezione richiede un elevato investimento iniziale per realizzare lo stampo, che però poi potrà essere utilizzato per produrre migliaia di parti, e il suo costo è influenzato dalle dimensioni e dalla qualità del materiale utilizzato per ottenerlo. Nel caso della stampa FDM non è necessario effettuare questa spesa in quanto non è presente uno stampo iniziale, ma solamente un file digitale. Ciò costituisce un notevole vantaggio sia economico che

produttivo poiché nel caso dello stampaggio ad iniezione una piccola modifica della geometria dell'oggetto da realizzare richiede l'utilizzo e l'acquisto di un nuovo stampo, mentre nel caso della stampa FDM questo problema non sussiste in quanto basta modificare il file. Inoltre, la stampa 3D, a differenza dello stampaggio ad iniezione, per piccoli lotti di produzione non prevede un aumento dei costi.

I tempi e le velocità di produzione sono degli aspetti di fondamentale importanza per le imprese del settore manifatturiero; per quanto riguarda la realizzazione di un prodotto mediante stampaggio ad iniezione quest'ultima richiede tempistiche variabili in quanto il processo prevede la produzione del prototipo, lo sviluppo dello stampo e dei diversi sistemi 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 in tempi brevi riducendo il tempo che intercorre fra l'inizio del processo di sviluppo di un nuovo prodotto e la sua commercializzazione.

La tabella 2.48 riporta un confronto complessivo fra la tecnologia FDM e lo stampaggio ad iniezione dove il segno + indica che una tecnologia è più vantaggiosa rispetto all'altra, mentre il segno – il contrario.

Caratteristica	Stampaggio a iniezione	Fused Deposition Modeling
Investimento iniziale	-	+
Produttività	+	-
Costo del prodotto (prototipi)	-	+
Costo del prodotto (produzioni in serie)	+	-
Personalizzazione del prodotto	-	+
Cambio di materiale	-	+
Accuratezza dimensionale	+	-
Comportamento meccanico	+	-
Automatizzazione	+	-
Finitura superficiale	+	-

Tabella 2.48-Confronto fra FDM e stampaggio ad iniezione in termini di caratteristiche di processo ^[14]

CAPITOLO 3-IL PROCESSO FSW

3.1. GENERALITÀ SUL PROCESSO

La saldatura *Friction Stir Welding* (FSW) è un processo che è stato inventato e brevettato in Inghilterra nel 1991 dal *The Welding Institute* (TWI) e si tratta di una tecnica di giunzione allo stato solido che inizialmente veniva applicata esclusivamente alle leghe di alluminio. Nell'ultimo decennio questa tecnologia ha rappresentato una metodologia vincente per svariate applicazioni, come quelle in campo automobilistico ed aerospaziale, caratterizzate da elevate duttilità e da elevati valori di resistenza per garantire elevate prestazioni. Questa innovativa tecnica di saldatura, infatti, permette di ridurre in maniera significativa la presenza di tensioni residue e di distorsioni nei giunti rispetto ai processi di saldatura tradizionali, ed inoltre, avvenendo allo stato solido, permette di evitare che si formino anche le microstrutture di risolidificazione.

Il processo di Friction Stir Welding ha inizio con l'accostamento delle piastre da saldare su un apposito supporto inclinato di un angolo (*tilt angle*), che nella pratica varia tra 1,5° e 3°, per facilitare lo scorrimento del materiale durante il processo. Successivamente un utensile di geometria cilindrica (*shoulder*) con eventualmente un perno (*pin*) opportunamente sagomato attaccato ad esso, penetra tra le piastre nella zona di collegamento ruotando attorno al proprio asse con una certa velocità di rotazione ω ed esercitando contemporaneamente un'azione di pressione superficiale sulla zona di giunzione. Questa fase ha una durata che generalmente va dai 10 ai 20 secondi ed è responsabile della maggior parte del calore generato. Terminata la fase di penetrazione e mescolamento del materiale, l'utensile inizia a traslare in direzione longitudinale con una certa velocità di avanzamento v percorrendo tutto il tratto utile di saldatura, ad eccezione di un gap iniziale e finale. La figura 3.1 mostra il processo precedentemente descritto.

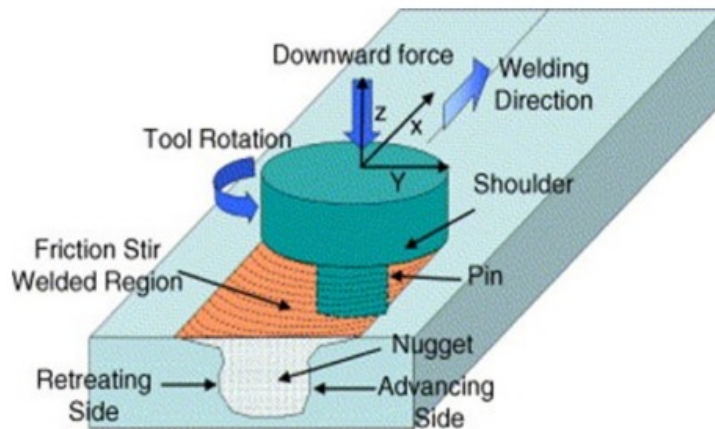


Figura 3.1- Rappresentazione schematica del processo di friction stir welding ^[5]

Durante il processo l'utensile assolve a due funzioni principali:

- Riscaldamento del pezzo da lavorare;
- Movimentazione del materiale finalizzato alla produzione del giunto.

L'utensile, infatti, interagendo con la zona di collegamento genera calore e quindi si verifica un incremento di temperatura a causa dell'attrito tra utensile e pezzo dovuto alla rotazione ω , e quindi all'agitazione del materiale, e a causa della deformazione plastica in quanto l'utensile penetra con una certa velocità di affondamento. Il riscaldamento localizzato ammorbidisce il materiale attorno al pin e la combinazione della rotazione e della traslazione dell'utensile porta al movimento del materiale dalla zona anteriore del pin a quella posteriore. Come risultato di questo processo si ha una giunzione allo stato solido, ossia il materiale non arriva mai alla temperatura di fusione e di conseguenza non sono presenti i problemi tipici dei metodi di saldatura convenzionali.

La figura 3.1 inoltre mostra come a causa del diverso flusso del materiale si vengano a formare due aree distinte: una in cui la velocità periferica dell'utensile ha lo stesso verso della direzione di avanzamento e che prende il nome di *Advancing side*, ed un'altra nella

quale la velocità periferica dell'utensile è discorde con il verso di avanzamento e che quindi prende il nome di *Retreating Side*. La conseguenza di ciò è che in corrispondenza del lato di avanzamento le forze di attrito sono più intense e quindi si sviluppano temperature maggiori rispetto al lato di ritirata nel quale la velocità periferica si oppone alla direzione di avanzamento e quindi il calore sviluppato per attrito è minore. Questa differenza è confermata anche dal fatto che il punto in cui il materiale inizia a trasformarsi dallo stato solido a quello semisolido ed inizia a scorrere attorno al perno dell'utensile si trova nel lato di avanzamento, mentre il punto in cui il materiale inizia a raffreddarsi si trova nel lato di ritiro.

Nelle saldature FSW, nonostante circa il 95% del calore generato per attrito venga trasferito al pezzo da saldare e solamente il restante 5% venga assorbito dall'utensile, non si raggiungono temperature di processo elevate in quanto il calore non viene fornito dall'esterno e questo permette che non si raggiunga il punto di fusione del materiale saldato. Infatti, solitamente, la temperatura raggiunta assume un valore compreso tra l'80% e il 90% della temperatura di fusione del materiale saldato e in corrispondenza della giunzione si ottiene uno stato viscoso-plastico del materiale. Il fatto che non si verifichi un susseguirsi di fusione e solidificazione comporta numerosi vantaggi rispetto alle saldature tradizionali.

La tabella 1.1 riassume i principali vantaggi del processo FSW rispetto ai metodi tradizionali di saldatura indipendentemente dal materiale trattato nel processo. Non si tratta quindi di un elenco esaustivo dei vantaggi della FSW in quanto potrebbero essercene altri anche in base ai materiali utilizzati; tuttavia, consente comunque di capire come mai questo processo sia di forte interesse dal punto di vista ingegneristico industriale.

Benefici Metallurgici	Benefici Ambientali	Benefici Energetici
Processo allo stato solido	Nessun gas di copertura utilizzato	Un miglior utilizzo dei materiali permette un riduzione in peso
Bassa Distorsione del pezzo	Nessuna pulizia della superficie	Viene utilizzato il 2.5% dell'energia richiesta per la saldatura laser
Buona stabilità dimensionale e ripetibilità	Eliminazione degli scarti di lavorazione	Il consumo di carburante viene ridotto in aeroplani, autovetture e navi con minor peso
Nessuna perdita di elementi leganti	Eliminazione dei solventi per lo sgrassaggio	
Eccellenti proprietà metallurgiche nell'area di giunzione	Risparmio di materiali consumabili quali bacchette metalliche ed altri tipi di gas.	
Microstruttura fine		
Assenza di cricche		

Tabella 1.1- Principali benefici della saldatura friction stir welding ^[15]

Dal punto di vista microstrutturale le saldature FSW presentano tipicamente tre zone principali:

- Un nocciolo di saldatura (nugget zone);
- Una zona termo-meccanicamente alterata (TMAZ);
- Una zona termicamente alterata (HAZ).

Sia il nocciolo di saldatura che il TMAZ sono entrambe delle zone alterate termo-meccanicamente, ma tuttavia vengono considerate come due zone distinte in quanto presentano delle caratteristiche microstrutturali diverse; infatti, mentre il nocciolo di saldatura subisce una ricristallizzazione dinamica che comporta la formazione di grani

fini, la zona TMAZ non è interessata da questo processo. Il nocciolo inoltre, può avere varie forme che dipendono sostanzialmente dai parametri di processo, dalla geometria dell'utensile, dalla temperatura del pezzo in lavorazione e dalla conduttività termica del materiale. Solitamente la zona del nocciolo di saldatura può essere classificata in due diverse tipologie:

- Zona nocciolo a scodella;
- Zona nocciolo a forma ellittica.

La figura 3.12 fornisce una rappresentazione di queste zone.

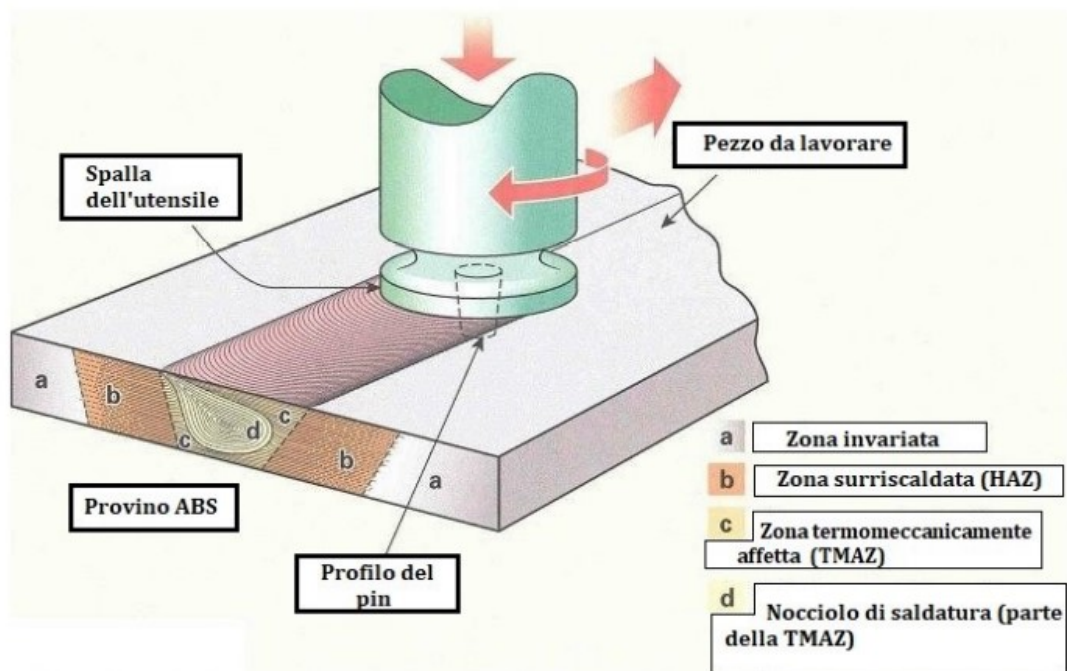


Figura 3.12-Rappresentazione microstrutturale delle zone di materiale interessate dalla saldatura^[16]

3.2 PARAMETRI DI PROCESSO

In questo paragrafo sono riportati sotto forma di elenco i principali parametri di processo da tenere in considerazione durante una saldatura di tipo Friction Stir Welding. Nei successivi paragrafi verranno poi ripresi singolarmente analizzando l'effetto dei valori di ogni parametro sul materiale termoplastico di interesse (ABS).

I principali parametri di processo sono:

- La geometria dell'utensile;
- La velocità di rotazione dell'utensile attorno al proprio asse;
- La velocità di avanzamento dell'utensile o velocità di saldatura (espressa in mm/min);
- L'affondamento, o profondità di immersione, dell'utensile nel materiale da saldare;
- La forza assiale esercitata dalla macchina sull'utensile (espressa in kN);
- L'angolo di inclinazione dell'utensile.

Tutti i parametri elencati precedentemente sono fondamentali nei processi di FSW in quanto definiscono la qualità del giunto che si crea, le sue proprietà meccaniche e la presenza o meno di difetti.

3.21. GEOMETRIA DELL'UTENSILE

La geometria dell'utensile è uno dei parametri che più influenzano la riuscita ottimale del processo di saldatura, in quanto l'utensile ricopre un ruolo importante nel flusso del materiale e governa la velocità di avanzamento alla quale la FSW può essere effettuata.

Generalmente l'utensile è composto da una spalla cilindrica, che prende il nome di *shoulder*, e da un perno che invece è chiamato *pin*, ma esistono anche utensili sprovvisti del pin e che quindi sono chiamati *pinless*. Le figure 3.21 e 3.22 forniscono alcune illustrazioni della geometria degli utensili tipici delle saldature FSW.

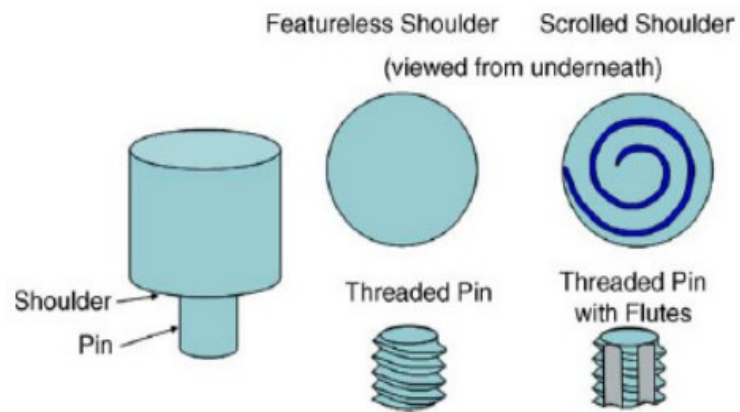


Figura 3.21- rappresentazione schematica di un utensile FSW^[16]



Figura 3.22-Confronto tra utensile pin e pinless utilizzato nelle prove in laboratorio

Gli utensili utilizzabili durante una saldatura FSW possono essere ricondotti a quattro diverse tipologie e in base alla specifica applicazione viene scelto quello più idoneo; le diverse tipologie di utensile sono: a pin fisso, regolabili, “self- reacting” e pinless.

L’utensile a pin fisso corrisponde a un pezzo singolo comprendente sia la spalla che il pin e, a causa della lunghezza fissa del pin, può saldare soltanto un pezzo con uno spessore costante. Se il pin si usura o si rompe bisogna sostituire l’intero utensile, tuttavia utilizzare un utensile di questo tipo risulta conveniente dal punto di vista economico in quanto il suo prezzo di vendita è basso.

Negli utensili regolabili invece la lunghezza del pin non è fissa e quindi risulta possibile saldare dei pezzi con spessori differenti ed inoltre, in caso di utensile usurato o danneggiato, non è necessario sostituire l’intero utensile ma solamente il pezzo danneggiato. Il costo degli utensili regolabili è sicuramente maggiore rispetto a quello di un utensile a pin fisso.

La geometria degli utensili *self reacting* è più complessa di quella degli utensili precedentemente descritti, infatti è costituita da due spalle rotanti, una sopra e una sotto al pezzo in lavorazione. Un albero filettato sporge dalla punta del perno fino ad arrivare oltre alla superficie inferiore del pezzo e la spalla inferiore è tenuta in posizione assiale tramite un dado posto sull'albero filettato.

Infine gli utensili *pinless* sono quelli con la geometria più semplice in quanto sono costituiti soltanto dallo shoulder che ruota, trasla e penetra nel materiale da saldare e solitamente vengono usati quando lo spessore delle lamine è molto ridotto e quindi per eseguire il processo è sufficiente il calore generato dalla pressione che lo shoulder esercita sulla superficie superiore delle piastre.

In figura 3.23 vengono riportati le varie tipologie di utensile con il pin mentre la figura 3.22 mette in evidenza le differenze tra un utensile con il pin e uno senza.

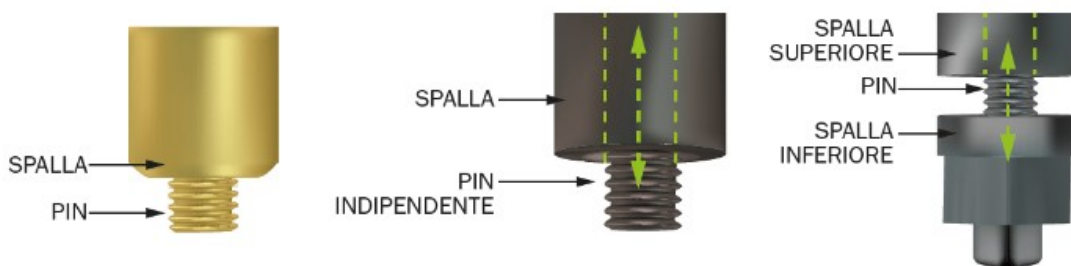


Figura 3.23-Rappresentazione di un utensile a pin fisso, regolabile e self-reacting

Le funzioni principali che l'utensile svolge durante il processo di saldatura sono il riscaldamento localizzato del materiale e il rimescolamento del materiale. Durante la fase iniziale del processo, nel corso della quale l'utensile penetra nel materiale da saldare per un tempo che varia dai 10 ai 20 secondi, il riscaldamento ottenuto deriva

inizialmente dall'attrito che si genera tra il pin e il pezzo in lavorazione e successivamente dalla deformazione plastica del materiale stesso. Quando il pin è completamente affondato nel materiale, ossia quando la superficie inferiore della spalla tocca la superficie superiore del pezzo in lavorazione, ha inizio il contatto tra lo shoulder e la superficie del giunto ed è proprio l'attrito generato da questo tipo di contatto che è il responsabile della maggior parte del calore prodotto in quanto la superficie di contatto con il pezzo è molto più ampia rispetto alla superficie di contatto tra il pin e il pezzo. Lo shoulder ha anche il compito di contenere il materiale che via via sta procedendo ad essere saldato al fine di evitare la formazione di bava che peggiorerebbe sia le qualità estetiche che le prerogative meccaniche del giunto saldato. Dalle precedenti osservazioni si evince come i parametri geometrici fondamentali da tenere in considerazione nella scelta di un utensile siano il diametro dello shoulder, la lunghezza del pin e il suo diametro. Questi parametri sono riportati nel disegno tecnico di figura 3.24 nella quale il diametro dello shoulder è indicato con la lettera D, l'altezza dello shoulder con la L, il diametro del pin con la d e l'altezza del pin con la s.

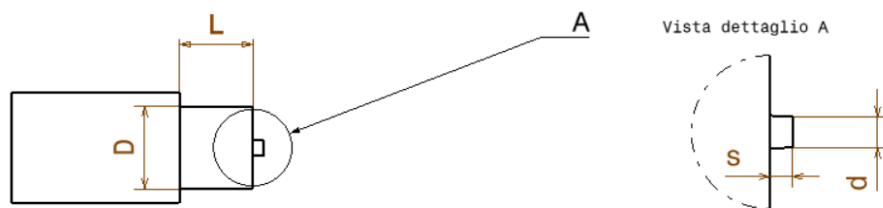


Figura 3.24-Disegno tecnico di un utensile di FSW con in evidenza i principali parametri geometrici^[5]

Come detto in precedenza, il diametro dello shoulder, è il responsabile del maggior incremento di temperatura, quindi deve essere scelto in modo da fornire un adeguato incremento di temperatura al pezzo senza che però le sue dimensioni superino un certo

limite per evitare che si raggiungano temperature troppo elevate che ,nelle saldature di ABS, potrebbero condurre a dei fenomeni di fusione localizzate e quindi a una pessima riuscita del processo. Solitamente per questo parametro viene scelto un rapporto critico D/d che non superi il limite superiore di 20/6.

La lunghezza del pin invece è strettamente collegata all'affondamento che si desidera ottenere, in quanto, a parità di affondamento, un pin troppo lungo potrebbe causare una saldatura troppo profonda che porterebbe a saldare anche il supporto sottostante alla piastra, mentre un pin troppo corto potrebbe causare una profondità di saldatura insufficiente in termini di proprietà meccaniche del giunto. Solitamente si lascia un certo gap di materiale non interessato dalla saldatura che per quanto riguarda l'ABS non è inferiore ai 0.2mm.

3.22. VELOCITÀ DI ROTAZIONE DELL'UTENSILE

La velocità di rotazione dell'utensile è forse il parametro di saldatura più importante in quanto genera il mescolamento del materiale dapprima attorno al pin ed in seguito attorno allo shoulder e solitamente, sulla sua base vengono scelti gli altri parametri di saldatura. A parità degli altri parametri di processo, a una velocità di rotazione più elevata corrisponde un maggior incremento di temperatura causato dal maggior attrito e quindi da una maggior intensità nel rimescolamento del materiale. Viceversa, se la saldatura viene eseguita con una velocità di saldatura troppo bassa (<1000 rpm) il calore generato sul lato di ritirata non è sufficiente a far avvenire l'incollaggio del materiale deformato plasticamente e quindi si formano delle porosità che sono controproducenti non solo da un punto di vista estetico, ma anche dal punto di vista funzionale in quanto causano la diminuzione delle proprietà meccaniche del giunto saldato e la riduzione della vita a fatica. A basse velocità di rotazione dell'utensile, il calore generato nel lato di ritirata è insufficiente a causa della differenza di temperatura che vi è tra advancing

side e retreating side e anche a causa della scarsa conducibilità termica dell'ABS che limita la conduzione del calore dal lato di avanzamento a quello di ritirata. Queste cavità sul lato di ritirata diminuiscono all'aumentare della velocità di rotazione fino a scomparire quando questa arriva a circa 1600rpm. Andare oltre a questo limite superiore rischierebbe di causare un eccessivo apporto di calore nella zona di saldatura con conseguenti fusioni localizzate di materiale in corrispondenza del lato di avanzamento soprattutto nella fase di penetrazione e di primo mescolamento.

3.23. VELOCITÀ DI AVANZAMENTO DELL'UTENSILE O VELOCITÀ DI SALDATURA

La velocità di avanzamento dell'utensile, o velocità di saldatura, è la velocità con la quale l'utensile si muove lungo la linea di saldatura e ha il compito di movimentare il materiale mescolato dalla parte anteriore alla parte posteriore del pin. Maggiore è la velocità di avanzamento e minore sarà il calore generato durante il processo, e viceversa, e, a seconda della quantità calore generata, si possono venire a creare due tipi di giunti: il giunto caldo e il giunto freddo.

I primi si verificano per basse velocità di avanzamento dell'utensile quando il calore generato per attrito può diffondersi completamente nella parte di materiale non ancora saldata, che risulta quindi ammorbidita, e l'utensile può avanzare senza incontrare forze in direzione longitudinale che interrompono il suo cammino. Solitamente il valore ideale della velocità di avanzamento per generare un giunto caldo è di 20 mm/min.

I giunti freddi invece si verificano quando la velocità di saldatura è elevata, tipicamente superiore ai 40 mm/min, ed il calore che si genera per attrito non è sufficiente a plasticizzare completamente il materiale e quindi le proprietà meccaniche del pezzo sono minori rispetto a quelle che si otterrebbero con velocità di avanzamento più basse e nel peggiore dei casi si può perfino arrivare alla rottura dell'utensile a causa delle forze elevate che il materiale oppone nella direzione di avanzamento.

Riassumendo si può concludere che le proprietà meccaniche del giunto diminuiscono all'aumentare della velocità di saldatura, questo anche a causa della bassa conduttività termica dell'ABS, e di conseguenza bisogna adottare velocità di saldatura opportune per favorire il trasferimento di calore dalla parte già sottoposta a saldatura a quella non ancora interessata dal processo. Tra la velocità di rotazione e quella di avanzamento, quella che ha un peso maggiore sulla buona riuscita del processo è la prima, tuttavia per ottenere un giunto esente da difetti è indispensabile tenere in considerazione la loro combinazione; più precisamente i ricercatori A Bagheri et al. [17] sono arrivati alla conclusione che la combinazione ottimale di questi due parametri è quella con la velocità di rotazione di 1600 rpm e la velocità di avanzamento di 20mm/min come mostra la figura 3.25.

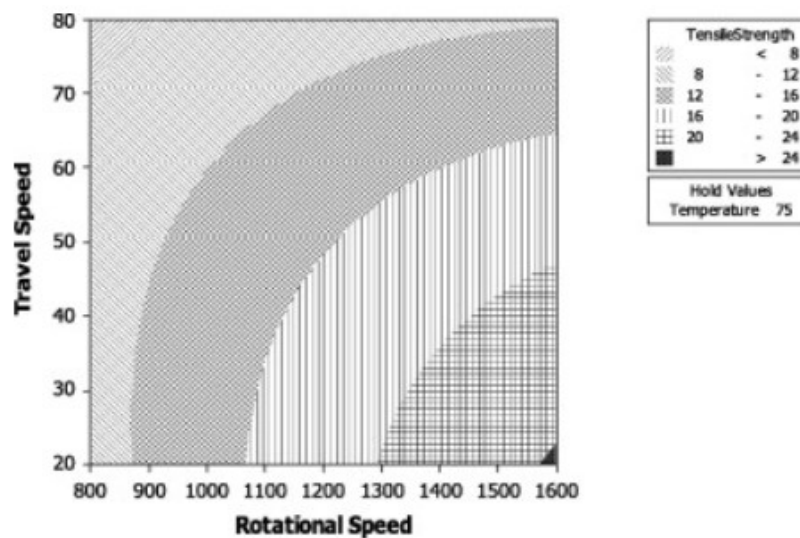


Figura 3.25-Grafico resistenza a trazione rispetto alla combinazione della velocità di avanzamento e della velocità di rotazione

3.24. PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE DELL'UTENSILE

La profondità di penetrazione dell'utensile, chiamata anche *target depth*, è un parametro fondamentale per ottenere giunti senza difetti di saldatura. Infatti, se la profondità di penetrazione è insufficiente, lo shoulder dell'utensile non arriva a contatto con la superficie del pezzo da saldare e di conseguenza la rotazione dello shoulder, non riuscendo a muovere il materiale mescolato dalla parte anteriore a quella posteriore del pin, genera una saldatura con una scanalatura interna o con una superficie porosa. Se invece la penetrazione è eccessiva, lo shoulder affonda troppo nel pezzo in lavorazione generando nel cordone di saldatura un bordo laterale eccessivo che causa un giunto saldato eccessivamente assottigliato.

Come detto in precedenza, solitamente quando si lavora con l'ABS si sceglie una situazione di affondamento intermedia nella quale l'utensile non penetra per tutto lo spessore della piastra, ma lascia un gap minimo di 0.2 mm tra la superficie inferiore del pin e la superficie della piastra opposta a quella saldata.

3.25. FORZA ASSIALE ESERCITATA DALLA MACCHINA SULL'UTENSILE

La forza assiale che la macchina esercita sull'utensile ha un'influenza diretta sull'entità del calore generato, e di conseguenza anche sulle proprietà meccaniche del giunto saldato. Più precisamente, a parità di velocità di rotazione dell'utensile e di velocità di avanzamento, per bassi valori della forza assiale (<1 kN) i giunti generati sono caratterizzati da una buona qualità superficiale e dall'assenza di porosità. Aumentando il valore della forza le qualità del giunto non subiscono modifiche sostanziali fino a quando non si raggiunge un valore medio-alto (≥ 4 kN); per questi valori, infatti, l'eccessivo attrito tra la spalla dell'utensile e il polimero genera un apporto eccessivo di calore e a sua volta il giunto si presenta con un aspetto molto ruvido.

In base alla macchina utilizzata per eseguire il processo, la forza assiale può essere un parametro di processo dipendente oppure indipendente; infatti se la macchina usata

durante il processo prevede il controllo della forza, allora la forza assiale è un parametro di processo indipendente, mentre se la macchina che esegue il processo non prevede il controllo di forza, allora la forza assiale è un parametro di processo dipendente dalla velocità di rotazione dell'utensile e dalla velocità di avanzamento. Tuttavia, per evitare fenomeni di scarsa miscelazione del materiale in corrispondenza del lato di ritiro, oltre a un valore minimo di velocità di rotazione è necessario impostare anche un valore minimo di forza assiale.

3.26. ANGOLO DI INCLINAZIONE DELL'UTENSILE

L'angolo d' inclinazione che l'asse dell'utensile forma rispetto alle superfici da saldare, chiamato anche *tilt angle*, ha il compito di garantire un maggior apporto di calore, una maggior azione di contenimento dello shoulder nei confronti del materiale saldato ed una maggiore facilità di avanzamento in quanto le forze longitudinali in direzione opposta alla direzione di avanzamento risultano minori.

Tipicamente questo valore varia tra 1° e 2° e anziché inclinare l'utensile solitamente si preferisce inclinare la piastra di supporto sulla quale sono fissate le due semipiastrine da saldare.

3.27. CONCLUSIONI SUI PARAMETRI DI PROCESSO

In questa sezione sono riassunti i valori tipici dei parametri di processo per il materiale ABS che costituisce l'oggetto di studio di questa tesi:

- Velocità di rotazione dell'utensile variabile in un range che va dai 1250 ai 1600 rpm;
- Velocità di avanzamento dell'utensile relativamente bassa: il valore ottimale è di 20mm/min

- Profondità di penetrazione che garantisca un compromesso tra una situazione di mancanza di legame e una saldatura troppo profonda: solitamente viene lasciato un gap di 0.2mm;
- Forza assiale variabile in un range che va dai 2 kN ai 4kN;
- Tilt angle di 2°.

Ovviamente al variare del materiale trattato cambieranno anche i valori di questi parametri di processo, soprattutto il valore della velocità di rotazione, quello della velocità di avanzamento e quello della forza assiale.

3.28. TECNOLOGIA UTILIZZATA

Generalmente le macchine impiegate per eseguire i processi di FSW sono le macchine a controllo numerico computerizzato (CNC). Si tratta di macchine a controllo numerico nelle quali però l'unità di controllo della macchina si basa su un computer appositamente predisposto. A differenza delle macchine a controllo numerico tradizionali le macchine CNC sono in grado di:

- Memorizzare più programmi contemporaneamente;
- Inserire i programmi in varie forme;
- Memorizzare nel computer locale dei cicli fissi;
- Svolgere i calcoli di interpolazione di una traiettoria conoscendo la posizione iniziale e quella finale;
- Eseguire la compensazione della lunghezza e del diametro dell'utensile permettendo di ottenere dei valori molto precisi;
- Eseguire i calcoli di accelerazione e decelerazione;

- Eseguire il download dei programmi e collegarsi alle altre macchine che costituiscono il sistema di produzione;
- Eseguire la diagnostica.

Un sistema CNC è essenzialmente composto da tre componenti: il part program, il machine control unit (MCU) e l'attrezzatura. La figura 3.26 riporta questi componenti.

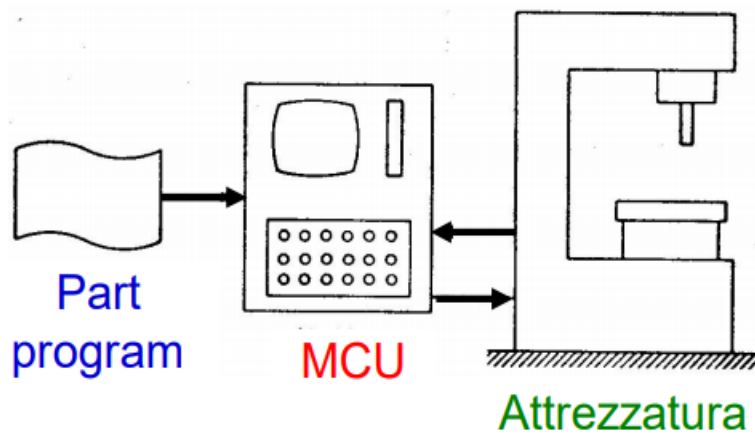


Figura 3.26-Componenti di un sistema CNC^[3]

Il part program, o programma delle istruzioni, riporta sotto forma di codice le informazioni di carattere geometrico e tecnologico della parte da lavorare; se si dovesse cambiare la parte bisogna generare un nuovo part program ma tuttavia si tratta di un cambiamento software e non hardware. Il programma delle istruzioni viene fornito come input all'unità di controllo della macchina (MCU) che per prima cosa legge il programma e lo traduce nel suo linguaggio. Dopodiché l'MCU invia all'attrezzatura dei segnali che vanno direttamente ai motori dell'attrezzatura. Questi motori una volta che hanno ricevuto i segnali dall' MCU determinano il moto relativo tra utensile e pezzo. Il flusso delle informazioni che va dal part program all' MCU è unidirezionale, mentre il flusso delle informazioni tra l'MCU e l'attrezzatura è di tipo bidirezionale.

Per poter utilizzare un sistema a controllo numerico è indispensabile stabilire un sistema di riferimento che definisca la posizione dell'utensile rispetto al pezzo su cui si esegue la lavorazione. Solitamente vengono usate le norme dell'EIA (Electronic Industries Association) che permettono di determinare i 3 assi di traslazione, indicati con x, y, z, sui quali avvengono i movimenti principali. Per esempio, nelle lavorazioni per asportazione di truciolo l'asse z viene scelto per convenzione parallelo all'asse del mandrino e della macchina. A volte può essere utile definire anche altri tre assi di traslazione per eventuali movimenti secondari e vengono indicati con u, v, w. Agli assi di traslazione vanno poi eventualmente aggiunti gli assi di rotazione che sono indicati con a, b, c e rappresentano gli assi di rotazione rispettivamente agli assi x, y, z.

Solitamente per eseguire un processo di saldatura FSW è necessaria una macchina CNC a tre assi controllati e tipicamente si ricorre a una fresa verticale come quella mostrata in figura 3.27.

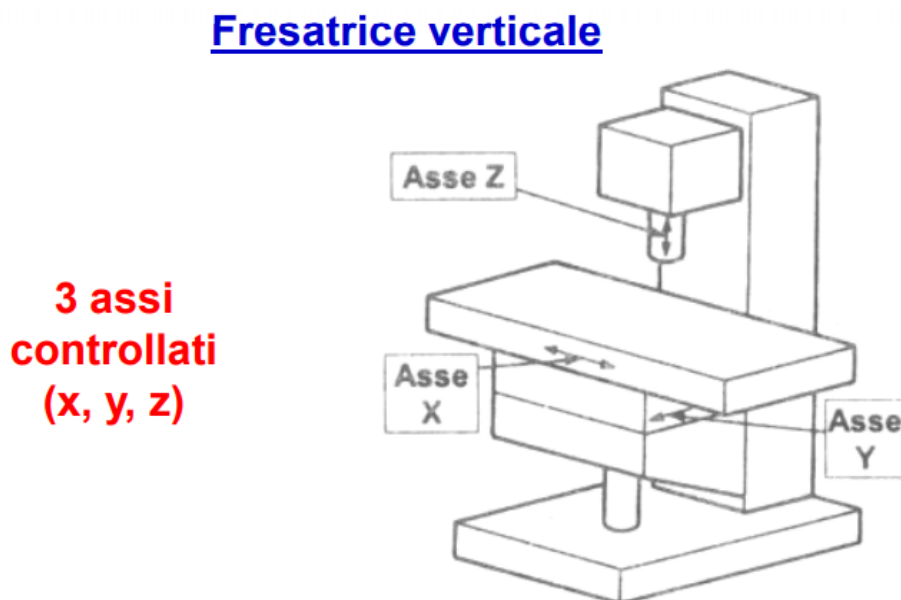


Figura 3.27-Fresa verticale a tre assi controllati per processi di saldatura FSW.^[3]

CAPITOLO 4-PROCEDURA SPERIMENTALE

4.1. OGGETTO DELLA SPERIMENTAZIONE

In questo lavoro di tesi si vuole andare ad osservare il comportamento e i risultati ottenuti a seguito della saldatura FSW, sia a una sola passata che double side, su piastre in ABS stampate mediante tecnica FDM. Sono state impiegate anche piastre con due colori diversi per studiare meglio il rimescolamento del materiale e verificare il loro comportamento mediante prove di trazione e piegatura. L'obiettivo dello studio è quello di valutare gli effetti di ciascun parametro sottoposto a variazione, in particolar modo la velocità di rotazione dell'utensile, la velocità di avanzamento e l'affondamento e di confrontare i risultati ottenuti con quelli di saldature FSW classiche a una sola passata.

4.2. PROCESSO DI STAMPA

Per prima cosa sono state realizzate le piastre in ABS mediante un processo di stampa 3D utilizzando la stampante Stratasys Fortus 250 mc, riportata in figura 4.2, che consente di realizzare parti complesse in modo efficiente attraverso la tecnologia FDM.



Figura 4.2- Stampante 3D Stratasys Fortus 250 mc

Questo tipo di stampante è in grado di lavorare fino a 10 materiali differenti, e il tutto è controllato da un sofisticato software di gestione ed elaborazione dei lavori chiamato Insight.

I provini realizzati sono stati ottenuti inserendo come input i seguenti parametri di stampa:

- Direzione di crescita: si è stampato il provino sul piano di stampa XY ed in seguito si è sviluppato verticalmente in direzione Z di 150mm, in modo da avere il piano dei layer ortogonale rispetto alla direzione di saldatura;
- Larghezza del filamento di contorno: lo spessore del filamento di contorno all'interno del quale sono stati poi stampati i layer è stato impostato a 0.8 mm, come mostrato in figura 4.21;



Figura 4.21-Larghezza dei layer di contorno

- Raster angle: l'orientazione del filamento è stata impostata a +/- 45° in quanto questa è la configurazione di stampa standard della stampante e si è preferito non inserire ulteriori parametri da studiare in questa analisi;
- Layer thickness: lo spessore dei layer interni è stato scelto di 0.225 mm;
- Air gap: si è scelta la densità di riempimento al 100% per limitare il più possibile i vuoti all'interno; tuttavia, nonostante questo parametro sia impostato al massimo, non è possibile ottenere una piastra senza vuoti;
- Velocità di stampa, temperatura di estrusione e temperatura del letto di deposizione: in questo caso si è deciso di utilizzare i parametri di default, ossia una velocità di stampa di 30mm/s, una temperatura di estrusione di 300°C ed una temperatura del letto di deposizione di 75°C, in quanto l'influenza di questi parametri sulle proprietà meccaniche è trascurabile;

- Colore: si è deciso di realizzare le piastre utilizzando lo stesso materiale, ma di colori differenti (bianco e blu), in modo che, saldando assieme due piastre di diverso colore, risultasse più evidente l'effetto del rimescolamento;
- All'interno delle piastre bianche sono state ricavate tre cavità cieche di dimensioni tali da potervi alloggiare tre termocoppie di tipo K per misurare l'andamento della temperatura durante il processo di saldatura FSW.

In figura 4.22 sono riportate le piastre ottenute in ABS di dimensioni 150mm x 85 mm x 3mm.

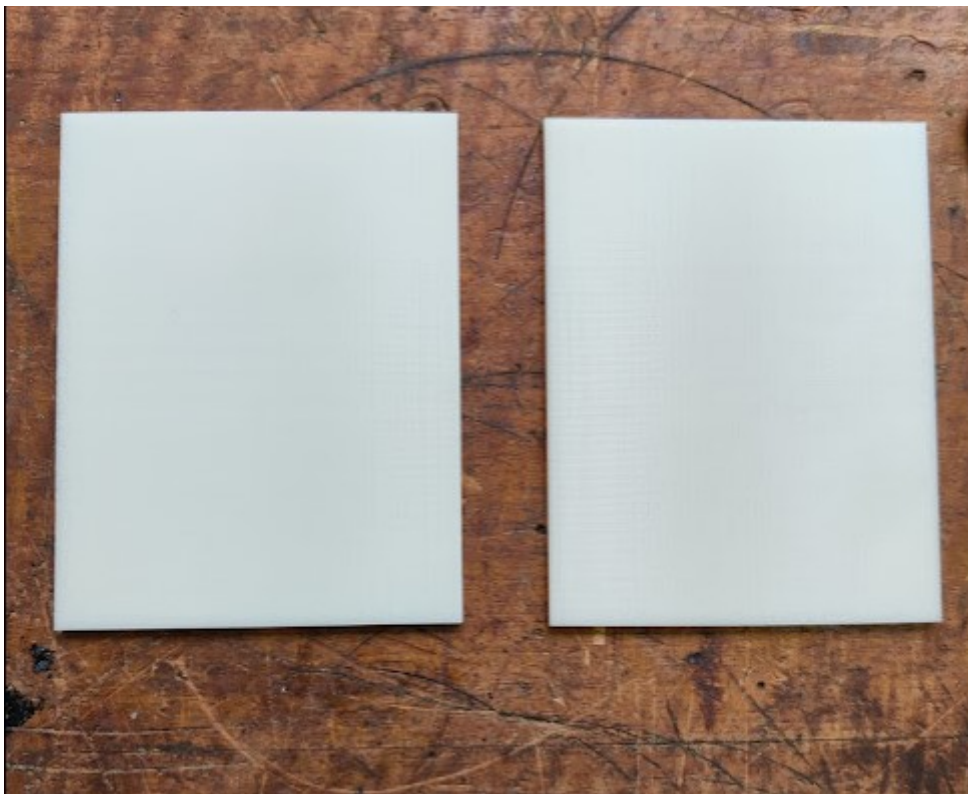


Figura 4.22-Piastre in ABS ottenute di dimensioni 150x85x3 mm

4.3. PROCESSO DI SALDATURA FSW: PARAMETRI SCELTI E MANUFATTI OTTENUTI

Una volta stampate le piastre in ABS è stato necessario eseguire delle prove di saldatura per poter poi caratterizzare, con delle successive prove meccaniche, le proprietà dei giunti saldati. Per la prima volta, oltre alle classiche saldature su un solo lato della piastra, sono state realizzate anche delle saldature *double side*, ossia in entrambi i lati della piastra, in modo da cercar di richiudere quei micro-vuoti che si è visto che si formano nel lato inferiore della lastra con la sola saldatura sul lato superiore ed inoltre sono state accoppiate due piastre di colori diverse, una bianca e l'altra azzurra, per poter poi analizzare meglio il rimescolamento del materiale.

Per prima cosa si è scelta la geometria degli utensili, in base ai valori dei parametri geometrici caratteristici ed alle condizioni di usura in quanto non si trattava di utensili vergini. In particolare, si è deciso di utilizzare degli utensili sprovvisti di *pin* (*pinless*), ciò significa che sono costituiti soltanto da un cilindro (*shoulder*) di diametro pari a 15mm 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. Si è deciso di utilizzare questo tipo di utensile in quanto lo spessore delle lamine è molto ridotto (3mm). Quindi, per eseguire la saldatura tramite il processo FSW, è sufficiente il calore generato dalla pressione che lo *shoulder*, strisciando e ruotando, genera sulle superfici delle piastre, oltre al fatto che utilizzare un utensile dotato di pin risulta particolarmente svantaggioso in quanto causerebbe elevati scarti di materiale e problemi legati all'usura.

Una volta scelto l'utensile da utilizzare, si è posta l'attenzione sui parametri di processo da adottare nelle prove e sono stati scelti i seguenti valori relativi ai vari parametri di processo:

- **Velocità di avanzamento dell'utensile o velocità di saldatura:** il valore di questo parametro è stato assunto pari a 20mm/min per tutte le prove ad eccezione della prova numero 6 per la quale si è scelto un valore di 40mm/min, e, in

quest'ultima, ci si aspetta di ottenere un cordone di saldatura con proprietà meccaniche inferiori rispetto agli altri;

- **Velocità di rotazione dell'utensile:** questo parametro è stato fatto variare dai 1250 rpm ai 1650 rpm in quanto si è visto che questo range di valori rappresenta il giusto compromesso per ottenere un cordone di saldatura con buone proprietà meccaniche senza che la temperatura del giunto arrivi alla temperatura di fusione dell'ABS;
- **Profondità di immersione dell'utensile:** per la passata superiore nelle prove numero 1-2-3-4-6 si è utilizzato un valore di questo parametro pari a 0.4 mm, mentre per la prova numero 5 questo parametro è stato assunto pari a 0.3mm; nella passata sul lato inferiore è stata sempre usata una profondità di immersione dell'utensile di 0.2mm;
- **Angolo di inclinazione:** il valore di questo parametro è stato mantenuto fisso a 2° inclinando il supporto che ospita le due semi-piastre;
- **Tempo di mescolamento:** il valore di questo parametro è stato mantenuto fisso a 10 s per tutte le prove effettuate.

La tabella 4.3 riporta i parametri di processo utilizzati per la passata superiore di ogni prova; per la passata inferiore, quando presente, sono stati utilizzati gli stessi parametri della passata superiore ad eccezione della profondità di immersione che si è tenuta costante a 0.2 mm per tutte le prove.

PROVA NUMERO	VELOCITÀ DI ROTAZIONE	VELOCITÀ DI AVANZAMENTO	PROFONDITÀ DI IMMERSIONE	DOUBLE SIDE
1	1250	20	0.4	Si
2	1250	20	0.4	No
3	1650	20	0.4	Si
4	1650	20	0.4	No
5	1650	20	0.3	Si
6	1650	40	0.4	Si

Tabella 4.3-Parametri di processo utilizzati in ogni prova; per la seconda passata sono stati utilizzati gli stessi parametri della prima passata ad eccezione della profondità di immersione che si è tenuta costante a 0.2mm

Dopo aver definito l'utensile da utilizzare ed i relativi parametri di processo si è proceduto con le prove di saldatura utilizzando la macchina CNC a 3 assi controllati mostrata in figura 4.31.



Figura 4.31-Macchina CNC a tre assi controllati usata per eseguire le prove di saldatura

Per poter comandare questo macchinario, è necessario scrivere un *part program* (g-code) per comunicare i parametri di processo scelti ai motori della macchina, tramite un MCU collocata a bordo macchina (figura 4.32).



Figura 4.32-MCU collocata a bordo macchina

In figura 4.32 è mostrato il *part program* che è stato scritto per eseguire una delle prove di saldatura e successivamente viene riportata una piccola spiegazione dei simboli che compaiono nel codice utilizzato.

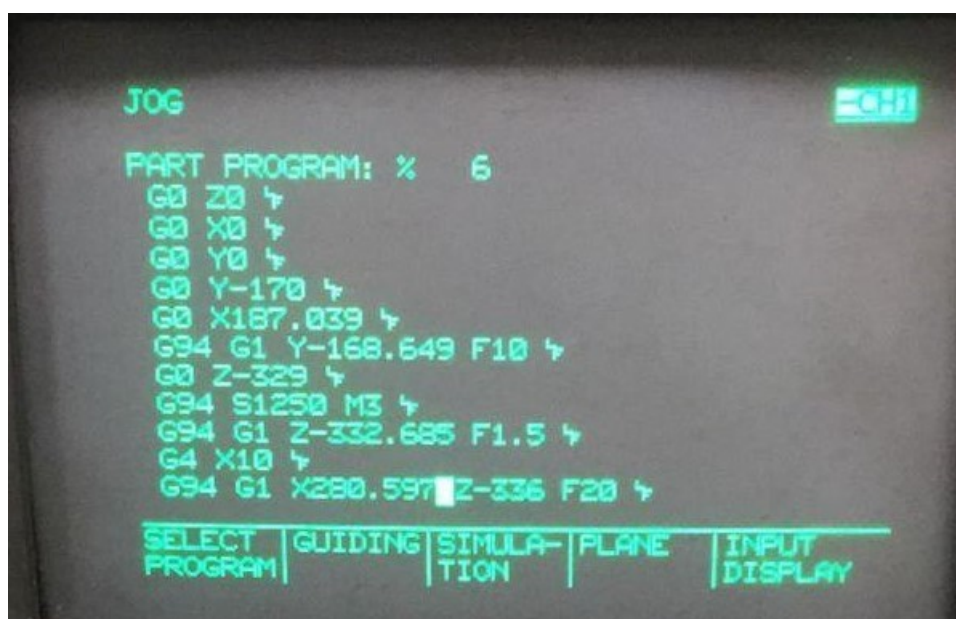


Figura 4.32-Part program utilizzato per eseguire le prove di saldatura

G0- movimentazione rapida;

G1- interpolazione lineare (moto di lavoro);

G4- sosta a fine passo;

X0, Z0, Y0- coordinate corrispondenti allo zero macchina;

X, Y, Z- coordinate corrispondenti alla posizione iniziale e quella finale, note queste sarà il modulo interpolatore che si calcolerà la traiettoria di lavoro;

G94- avanzamento in mm/min;

S- velocità di rotazione del mandrino;

M3- rotazione oraria del mandrino

Una volta scritto il *part program*, la macchina è pronta nella configurazione iniziale per poter iniziare la prova ed infine la figura 4.33 riporta un esempio delle giunzioni ottenute.

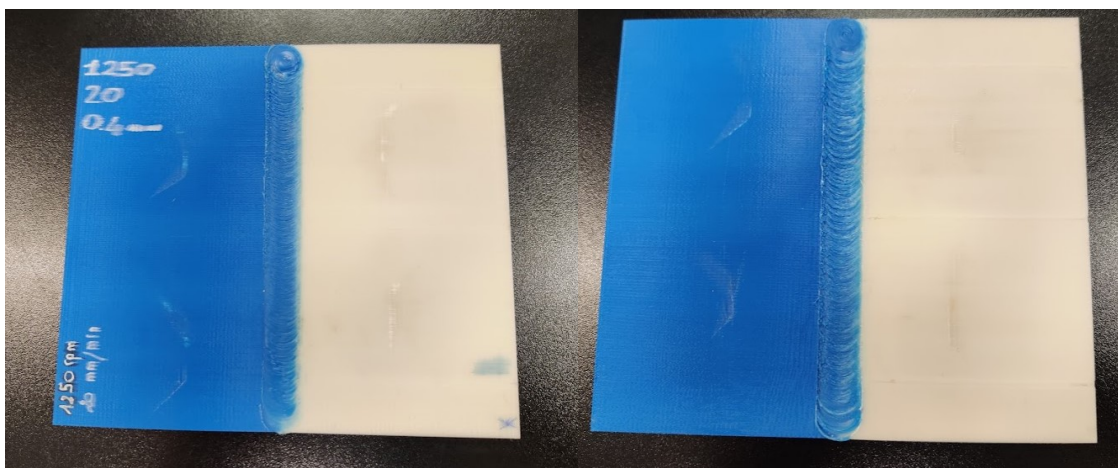


Figura 4.33-Giunto saldato ottenuto: a) lato superiore; b) lato inferiore

4.4. ANALISI DELLA TEMPERATURA

Inserendo tre termocoppie all'interno delle piastre in ABS nei tre rispettivi fori ciechi è stato possibile misurare l'andamento della temperatura del giunto durante la saldatura ottenendo così alcuni risultati interessanti. Per evitare che l'utensile durante la saldatura danneggiasse le termocoppie, i fori sono stati interrotti a 2mm dalla zona del cordone di saldatura e per questo motivo le temperature registrate sono risultate essere inferiori di diverse decine di gradi rispetto alla temperatura effettivamente raggiunta in prossimità del giunto. Per realizzare i grafici tempo-temperatura sono state usate quattro termocoppie con due appositi lettori, ognuno in grado di ospitare fino a due termocoppie, e un cronometro per gestire i vari intervalli di tempo nei quali registrare la temperatura captata. Delle tre termocoppie poste all'interno delle piastre, le due più esterne sono state poste a 19 mm dal bordo, mentre quella centrale a 56 mm dalle precedenti, come mostrato in figura 4.41.

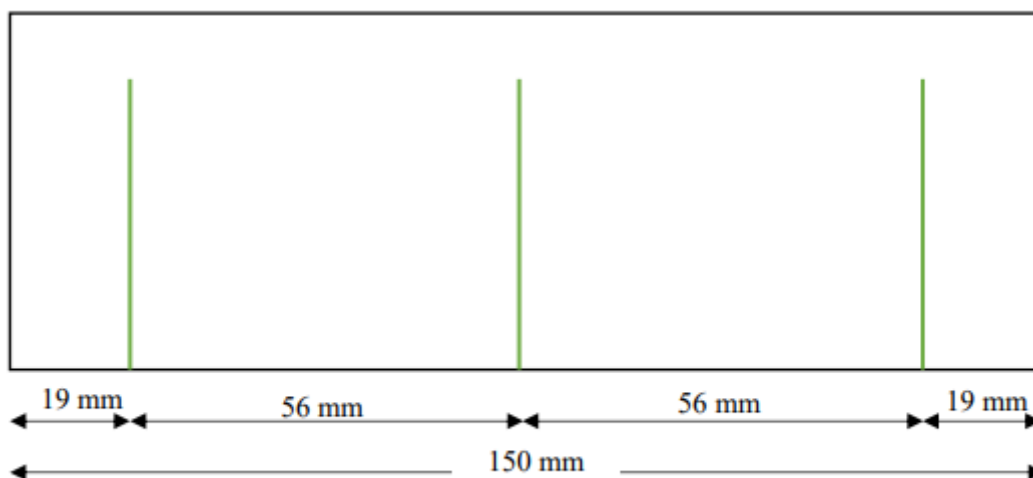


Figura 4.41-Disposizione delle termocoppie all'interno delle piastre in ABS

La quarta termocoppia invece è stata usata per misurare direttamente la temperatura sul giunto, che si è rivelata essere molto più elevata rispetto a quella degli altri tre misuratori; in figura 4.42 è mostrata tutta l'apparecchiatura usata per l'acquisizione della temperatura.



Figura 4.42-Apparecchiatura usata per l'acquisizione della temperatura

4.5. PROVINI

Tramite la tecnica del taglio a getto d'acqua sono stati poi ricavati i provini dalle piastre precedentemente saldate. Dopo un primo controllo visivo, si è deciso di investigare maggiormente solo alcune di esse. Infatti, non tutte sono state inviate al taglio per ricavarne provini di trazione e piegatura. Le saldature scartate (1650-20-03 e 1650-40-04), da una prima analisi visiva e successivamente anche dall'osservazione allo stereomicroscopio, hanno mostrato cordoni di saldatura non adeguati a causa della

presenza di vuoti, di materiale stracciato e non saldato e di un gradino sul bordo del cordone troppo accentuato. Per ogni condizione di saldatura studiata, si sono così ricavati quattro provini, due destinati alle prove di trazione e due a quelle di piegatura, e sono stati nominati da sinistra verso destra con la seguente nomenclatura: P1, T1, P2, T2 dove la P indica che quel provino sarà sottoposto alla prova di piegatura, mentre la T indica che in quel provino verrà eseguita una prova di trazione; il numero invece, mette in evidenza la posizione del provino lungo il cordone di saldatura, in modo tale da poter analizzare le caratteristiche meccaniche del giunto in funzione della posizione del provino; infatti, si è potuto constatare che i provini più esterni sono quelli che risentono maggiormente del fenomeno di saldatura a causa dell'effetto bordo dovuto a differenti scambi termici. L'immagine 4.5 mette in evidenza i quattro provini ottenuti per ogni condizione di prova.

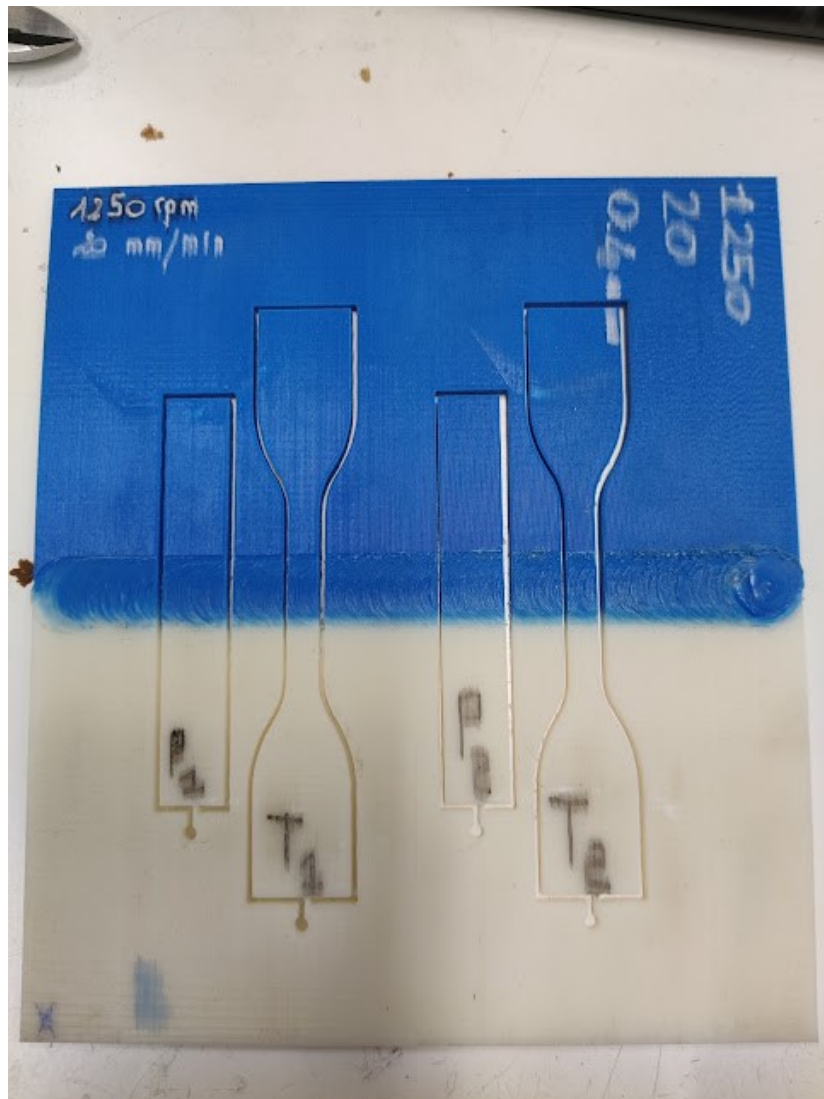


Figura 4.5-Piastra con all'interno i provini ricavati; con P1 e P2 sono indicati i provini destinati alla prova di piegatura, mentre con T1 e T2 sono indicati quelli destinati alla prova di trazione.

Dall'immagine 4.5 si nota inoltre come i provini, sottoposti successivamente a prove di piegatura, presentino una geometria rettangolare; infatti, sono stati ottenuti seguendo la normativa ISO 178 la quale prevede una larghezza del provino di 12.7mm e una lunghezza di 80mm, mentre quelli dedicati alle prove di trazione siano provvisti di due estremità utili per effettuare l'afferraggio alla macchina come impone la normativa ISO 527-1/2.

4.6. 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 variazione della forma della lamiera viene realizzata attraverso un'azione di flessione che origina delle deformazioni permanenti e solitamente viene effettuata su lamiere di materiali che presentano un comportamento plastico tale da non determinare evidenti rotture in corrispondenza della piega. Con questo processo è possibile realizzare sia delle geometrie semplici, ma anche delle geometrie molto complesse non solo su lamiere metalliche ma anche su semilavorati di vario tipo.

Questo processo è basato sulla teoria che prevede la presenza di un asse neutro al centro della lamiera che si deforma senza allungarsi né contrarsi, all'atto pratico questo però si verifica solamente per valori elevati del rapporto tra raggio interno di piegatura e spessore della lamiera. Inoltre, risulta evidente che la metà dello spessore della lamiera che entra in contatto con il punzone è sottoposta ad un'azione di compressione, mentre l'altra metà dello spessore della lamiera è sottoposta ad un'azione di trazione.

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

Il processo può essere distinto in due fasi:

- La piegatura in aria che ha inizio nel momento in cui il punzone entra in contatto con la parte superiore della lamiera e termina nel momento in cui le ali della lamiera arrivano a essere tangenti alle facce della matrice;
- La coniatura cioè quando il contatto punzone-lamiera-matrice è esteso a tutta la superficie esterna ed interna della lamiera.

La figura 4.61 riporta un'illustrazione schematica del processo e delle fasi descritte finora.

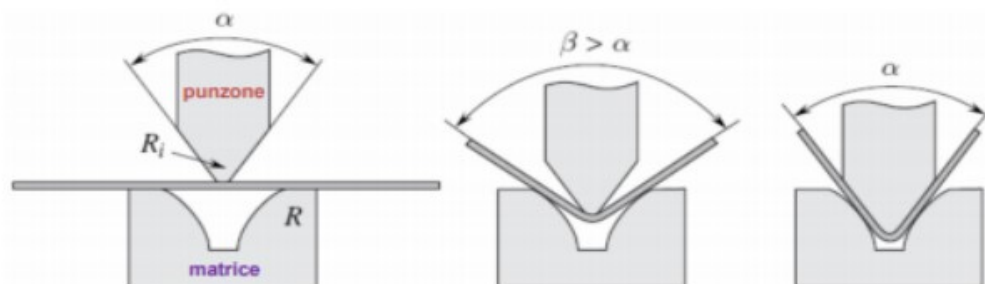


Figura 4.61- Illustrazione del processo di piegatura e delle sue due fasi principali

Nonostante questo processo sembrerebbe relativamente semplice, tuttavia potrebbe comportare dei problemi legati allo stato di sollecitazione che è possibile che si crei 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 della piegatura, ma con lo scopo di studiare le proprietà meccaniche di un materiale o di una saldatura e come i parametri di processo influiscono su di esse.

In particolare, in questo lavoro di tesi sono state effettuate prove di piegatura a tre punti; questa tecnica per essere effettuata prevede l'utilizzo di una macchina di prova universale ed in questo caso si è utilizzata la macchina MTS 810 opportunamente allestita per verifiche a piegatura. Questo macchinario è costituito da una struttura fissa ed una mobile: sono presenti due cilindri distanti 48 mm che vengono attaccati alla parte

superiore della matrice, ovvero la struttura inferiore mobile, 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 inferiore ai 10 mm) rappresentano i tre punti che danno il nome alla tipologia di piegatura. In figura 4.62 viene mostrata la macchina utilizzata per verificare a piegatura i provini.



Figura 4.62- Rappresentazione della macchina di prova universale MTS 810 utilizzata per la verifica dei provini a piegatura

In primo luogo, il provino viene posizionato sui due rulli rivolgendo il lato della prima passata della saldatura verso il basso e mantenendo il cordone in posizione centrale: in questo modo il lato della prima passata durante la prova sarà sollecitato a trazione, mentre il lato della seconda passata a compressione.

Successivamente, mantenendo il punzone fisso a una determinata altezza, viene fatta traslare la matrice verso l'alto e, raggiunta una determinata quota, si nota che il provino

è compreso fra i tre cilindri; a questo punto facendo traslare ulteriormente la matrice si ottiene la piegatura del provino fino ad arrivare al punto di rottura del provino.

La figura 4.63 mostra la fase di inizio e la fase finale di una prova di piegatura.

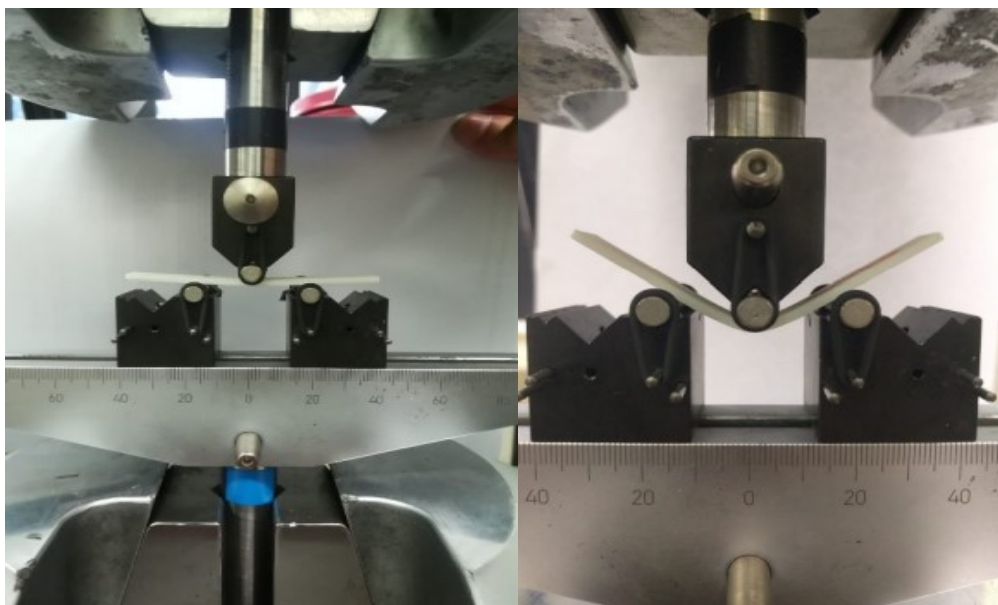


Figura 4.63- Fase iniziale (sinistra) e fase finale (destra) di una prova di piegatura

La macchina che ha eseguito la piegatura è collegata ad una scheda di acquisizione che a sua volta è connessa ad un computer e, sfruttando il software Labview, è stato possibile effettuare un elevato numero di acquisizioni durante le prove per poi riportare i dati ad essa associati in grafici Excel Forza-spostamento nei quali 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 si è dovuto trasformare il grafico Forza-Spostamento in un grafico σ - ϵ attraverso le relazioni imposte dalla normativa utilizzata, che in questo caso ossia per prove standard che verificano le proprietà flessionali di materie plastiche rinforzate e non e dei materiali elettrici è la ISO 178 (o ASTM D790); non si tratta quindi di una normativa specifica per i giunti saldati, ma apposta per l'ABS monolitica.

Di seguito sono riportate le relazioni e i simboli di riferimento;

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

dove:

- ϵ_f = deformazione flessionale;
- σ_f = tensione flessionale;
- L = distanza tra i due cilindri (che in questo caso è fissata a 48 mm dalla norma);
- d = spessore dei provini (misurato con un micrometro in tre diversi punti della zona saldata e poi calcolata la media aritmetica);
- b = larghezza del provino (anche in questo caso si è misurato con un micrometro in tre diversi punti della zona saldata e poi si è calcolata la media aritmetica);
- P = forza esercitata dal punzone sul provino e registrata dalla macchina;
- D = spostamento dei rulli inferiori verso il punzone e registrato dalla macchina.

L'obiettivo dello studio è stato quello di misurare la corsa del punzone prima che si arrivi a rottura; in questo modo si è potuto determinare come i parametri di saldatura influiscano sulle proprietà del giunto saldato in termini di tensione e deformazione massima a flessione e quali siano le condizioni di saldatura ottimali.

Oltre ai provini saldati double side, sono stati sottoposti alle prove di piegatura anche alcuni provini già presenti in laboratorio saldati questa volta con una sola passata in modo tale da poter confrontare i risultati e stabilire così quale tra le due tecniche di saldatura sia quella che porti a prestazioni meccaniche del materiale migliori.

4.7. PROVE DI TRAZIONE

Le prove di trazione, oltre a caratterizzare il materiale, forniscono anche una descrizione qualitativa del comportamento al flusso plastico.

Durante questa prova il provino subisce l'azione di un carico monoassiale 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 della sezione) e rottura; in questo modo è possibile misurare la resistenza a rottura del materiale.

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

Per passare dai valori di forza-allungamento del provino ai valori di tensione-deformazione è stato necessario avvalersi delle relazioni indicate nella normativa utilizzata come riferimento per l'esecuzione delle prove, ossia 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:

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

Dove:

- 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.

Anche queste prove, come quelle di piegatura, sono state effettuate con la macchina di prova universale MTS 810, questa volta però allestita per la verifica a trazione. Come spiegato in precedenza la macchina è costituita da due strutture: una parte fissa e una mobile. In questo caso però queste presentano degli appositi morsetti che permettono di afferrare il provino 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.

In figura 4.71 è mostrata la macchina di prova MTS 810 allestita per prove di trazione.



Figura 4.71-Macchina di prova MTS 810 allestita per prove di trazione

Anche in questo caso il macchinario è poi collegato ad una scheda di acquisizione che è a sua volta connessa ad un computer e, in questo modo, è stato possibile acquisire un elevato numero di dati per ogni prova necessari per costruire i grafici σ - ϵ su Excel e studiare il comportamento dei vari provini.

In questo modo si è potuto osservare quale fosse il valore massimo di tensione raggiunto da ogni provino ed il relativo valore di deformazione massima.

4.8. STEREOMICROSCOPIO

Una volta effettuate le prove di piegatura e di trazione, i provini sono stati osservati ed analizzati allo stereomicroscopio per notarne al meglio le caratteristiche strutturali e superficiali, soprattutto in corrispondenza del giunto e dei punti di rottura.

Lo stereomicroscopio utilizzato è un Leica EZ4 D, riportato in figura 4.71; 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 delle lampadine. I 7 LED presenti sono in grado di fornire una luce sia incidente sia obliqua, trasmessa per illuminazione e contrasto di elevata qualità.

Inoltre, nello stereomicroscopio è anche integrata una fotocamera digitale che consente la ripresa rapida di un video in tempo reale sullo 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. Inoltre, offre una piattaforma di facile utilizzo per applicazioni nel campo dell'istruzione di base, dell'industria e delle scienze biologiche.

La figura 4.81 mostra lo stereomicroscopio utilizzato in laboratorio.



Figura 4.81-Stereomicroscopio Leica EZ4 D

CAPITOLO 5-RISULTATI

5.1. CONFRONTO DELLE TEMPERATURE

Come spiegato in precedenza, durante i processi di saldatura sono state misurate le temperature raggiunte dai vari cordoni durante la lavorazione, al fine di confrontarle e determinare l'influenza di ogni singolo parametro di processo nell'andamento delle stesse.

Per esempio, il grafico 5.11 mostra l'andamento della temperatura in funzione del tempo di lastre saldate con utensile pinless nelle condizioni di:

- velocità di rotazione: 1650 rpm;
- velocità di avanzamento: 20mm/min
- affondamento: 0.4mm.

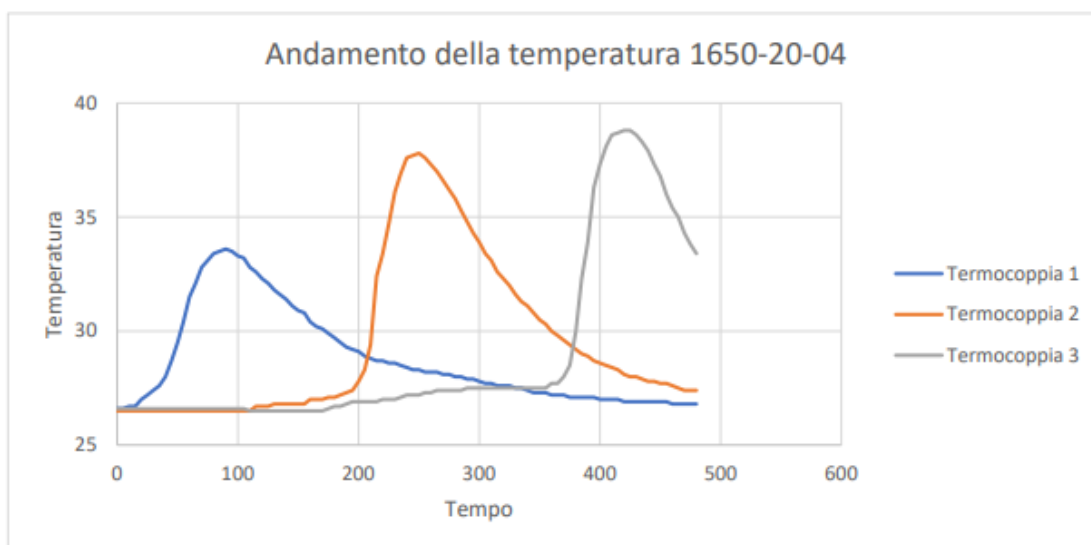


Grafico 5.11-Andamento della temperatura in funzione del tempo nel processo con le condizioni 1650-20-04

Nel grafico è mostrato l'andamento della temperatura delle tre termocoppie contemporaneamente, considerando un intervallo di tempo tra un punto e l'altro di 5 secondi. Si nota come la temperatura aumenti quando la termocoppia in questione vede

l'utensile avvicinarsi, raggiunga un massimo poco dopo che l'utensile ha superato la termocoppia per poi diminuire via via che l'utensile si allontana. La tabella 5.11 mostra la temperatura massima percepita da ogni termocoppia, l'istante di tempo in cui questa viene registrata, la posizione della termocoppia e la distanza da quest'ultima in cui si raggiunge la temperatura massima; infatti, conoscendo la velocità di avanzamento dell'utensile (in questo caso 20mm/min) si riesce a ricavare quest'ultimo dato moltiplicando la velocità di avanzamento per l'istante di tempo in cui si raggiunge la temperatura massima.

TERMOCOPPIA	TEMPERATURA MASSIMA (°C)	TEMPO ALLA TEMPERATURA MASSIMA (s)	POSIZIONE DELLA TERMOCOPPIA (mm)	POSIZIONE ALLA TEMPERATURA MASSIMA (mm)
1	34.1	90	19	30
2	38.3	250	75	83
3	39.3	420	131	140

Tabella 5.1- Tabella rappresentante alcuni valori particolari relativi al processo nelle condizioni 1650-20-04

È importante sottolineare come le temperature misurate dalle termocoppie inserite nelle piastre siano notevolmente inferiori a quella effettiva in prossimità del giunto; infatti, posizionando manualmente la quarta termocoppia vicino all'utensile durante la

lavorazione si è ottenuto un valore di circa 120 °C che è notevolmente maggiore rispetto alla temperatura massima misurata dalle altre termocoppie che in questo caso è di 39.3 °C. Ipotizzando che esista una proporzionalità tra il valore misurato con le termocoppie a 2 mm dal giunto e quello che effettivamente si ha in prossimità del giunto, è stato possibile ricavare un fattore moltiplicativo, in questo caso 3 (infatti $39.3 \times 3 \cong 120$), con il quale determinare la temperatura sul giunto in corrispondenza della seconda termocoppia ($38.3 \times 3 \cong 115^\circ\text{C}$) e della terza ($34.1 \times 3 \cong 120^\circ\text{C}$).

Dal grafico si nota anche che le tre termocoppie presentano un picco via via crescente; infatti, la prima ha registrato una temperatura massima di 34.1 °C, la seconda di 38.3 °C e la terza di 39.3°C, questo probabilmente perché essendo la piastra di supporto in acciaio, il calore generato provoca un innalzamento della temperatura su tutta la piastra conduttrice inducendo, di conseguenza, la seconda e la terza termocoppia a registrare valori più alti rispetto alla prima.

La tabella 5.1 inoltre mette in evidenza come in tutti e tre i casi la temperatura massima sia stata registrata alcuni millimetri dopo che l'utensile avesse superato la posizione della termocoppia, più precisamente dopo 11 mm dalla prima, 8 mm dalla seconda e 9 mm dalla terza. Ciò si verifica a causa dell'inerzia termica che fa sì che il rimescolamento del materiale che avviene sul giunto appena saldato provochi una temperatura maggiore rispetto al rimescolamento che avviene davanti all'utensile.

L'apparecchiatura per la misurazione della temperatura è stata utilizzata per tutte le saldature con i parametri descritti nella tabella 4.3 al fine di poter poi fare un confronto tra le varie temperature raggiunte in relazione ai diversi parametri di progetto; in particolare si è osservato che:

- mantenendo costanti l'affondamento (0.4 mm) e la velocità di avanzamento (20 mm/min), se si aumenta la velocità di rotazione dell'utensile la temperatura di conseguenza aumenta, come mostrato nel grafico 5.12 che mette in relazione le temperature registrate impostando la velocità dell'utensile a 1250 rpm e 1650

rpm. Questo aumento di temperatura è dovuto al fatto che ruotando a maggior velocità, l'utensile, genera maggior calore per attrito.

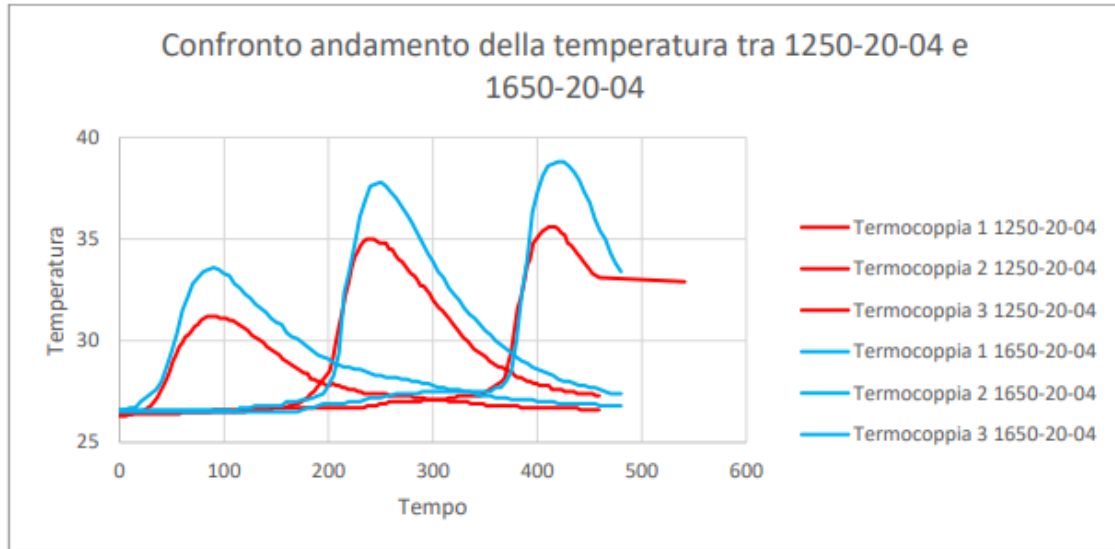


Grafico 5.12-confronto tra gli andamenti della temperatura nelle condizioni di 1250 rpm e 1650 rpm lasciando invariati gli altri parametri

- mantenendo costanti la velocità di rotazione (1650 rpm) e l'affondamento (0.4 mm), se si aumenta la velocità di passata, la temperatura massima misurata è la stessa come mostrato nel grafico 5.13 che mette in relazione le temperature registrate impostando la velocità di passata a 20 mm/min e 40 mm/min. Questo è in contrasto con quanto ci aspettavamo dal momento che in linea teorica la temperatura raggiunta avrebbe dovuto essere minore in quanto l'utensile, stazionando per un tempo minore in prossimità della termocoppia, genererebbe meno calore per attrito. Infine, è interessante osservare che i picchi risultano essere disallineati in quanto la velocità di avanzamento di una prova è il doppio dell'altra e di conseguenza il tempo si dimezza.

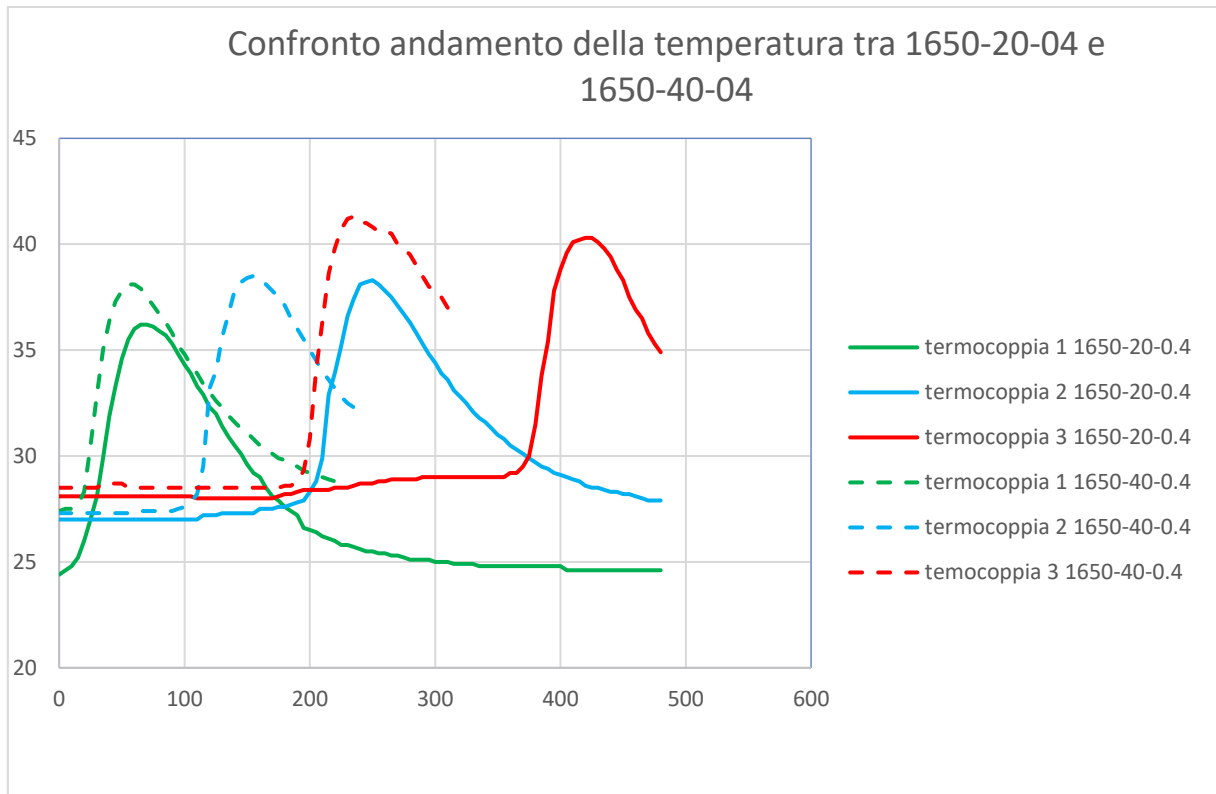


Grafico 5.13-Confronto degli andamenti delle temperature nelle condizioni di 1650-40-04 e 1650-20-04

- mantenendo costanti la velocità di rotazione (1650 rpm) e la velocità di avanzamento (20 mm/min), se si incrementa l'affondamento passando da 0.3 mm a 0.4 mm, la temperatura aumenta, come mostrato nel grafico 5.14. Questo aumento di temperatura avviene poiché aumentando l'affondamento, aumenta anche il volume di materiale rimescolato e di conseguenza anche il calore generato per attrito. Durante la saldatura con parametri di processo di 1650-20-0.3, però, non è stato possibile mandare a battuta del foro cieco la prima termocoppia e per questo motivo la temperatura misurata da quest'ultima è notevolmente più bassa rispetto alle altre.

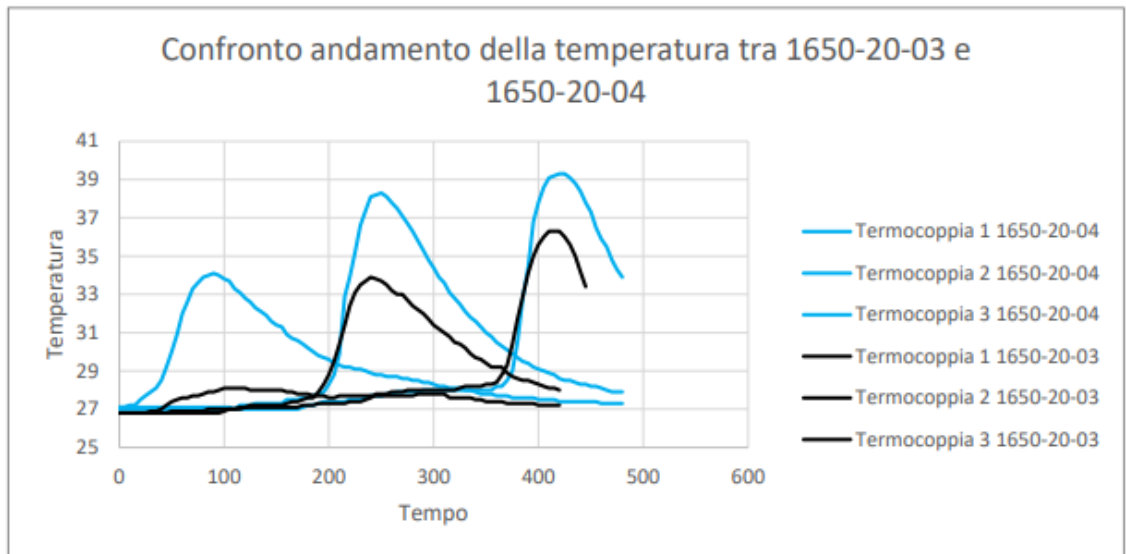


Grafico 5.14-Confronto degli andamenti delle temperature nelle condizioni 1650-20-0.3 e 1650-20-0.4

5.2. OSSERVAZIONI ALLO STEREOMICROSCOPIO

Prima di ricavare i provini per le successive prove di piegatura e trazione, si è proceduto con l'osservazione allo stereomicroscopio della struttura del cordone di saldatura.

Lo scopo di questa analisi è stato quello di eseguire una prima verifica dal punto di vista estetico-qualitativo dei manufatti ottenuti che successivamente saranno caratterizzati anche dal punto di vista delle proprietà meccaniche mediante delle prove di piegatura e trazione. Nelle figure successive viene riportato un tratto della microstruttura dei vari cordoni analizzati allo stereomicroscopio.

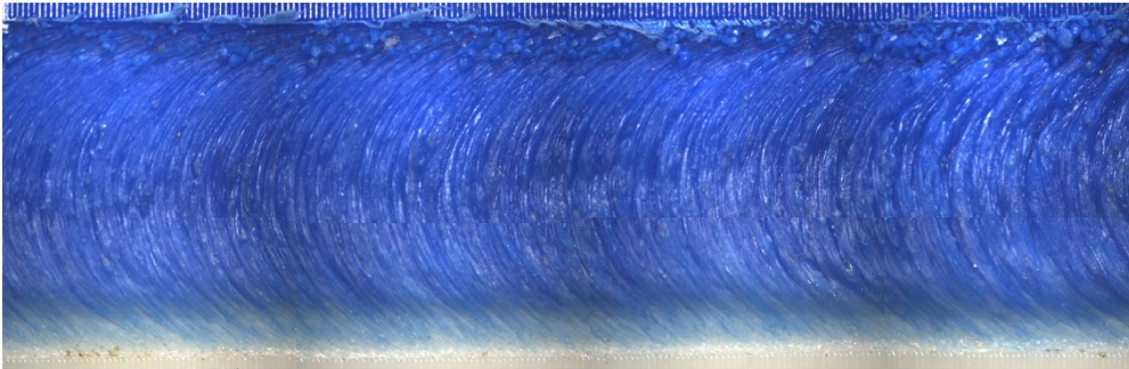


Figura 5.21-Osservazione allo stereomicroscopio con ingrandimento 8x del cordone di saldatura nelle condizioni 1250-20-04

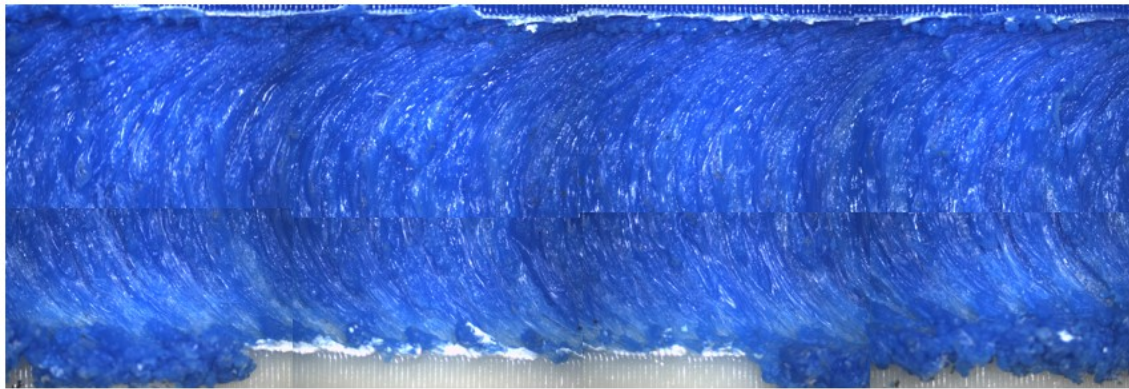


Figura 5.22-Osservazione allo stereomicroscopio con ingrandimento 8x del cordone di saldatura nelle condizioni 1650-20-04



Figura 5.23-Osservazione allo stereomicroscopio con ingrandimento 8x del cordone di saldatura nelle condizioni 1650-40-04 nel lato della prima passata

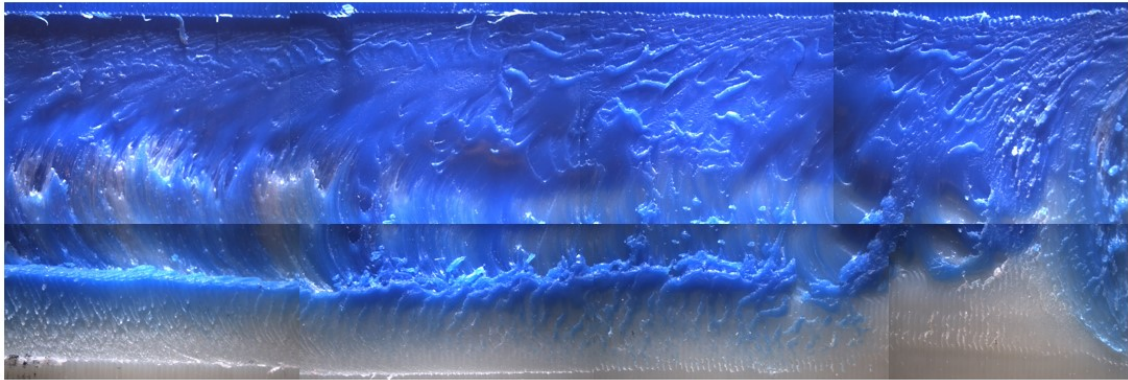


Figura 5.24-Osservazione allo stereomicroscopio con ingrandimento 8x del cordone di saldatura nelle condizioni 1650-40-02 nel lato della seconda passata

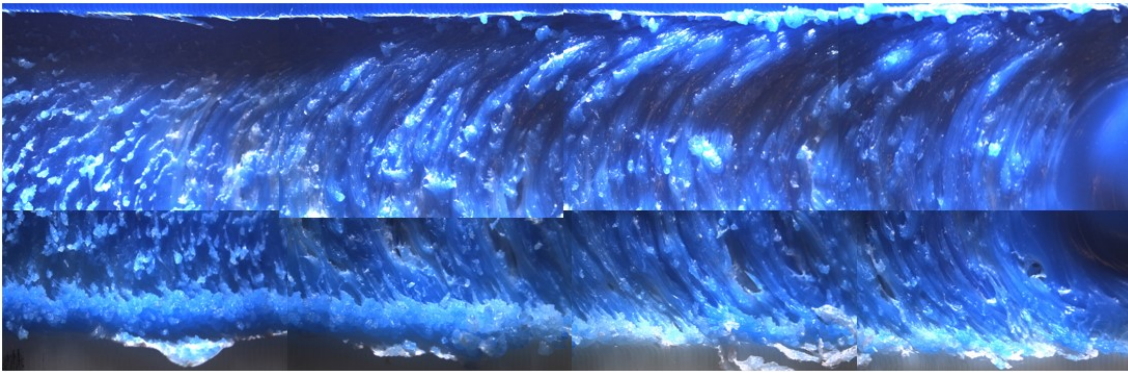


Figura 5.25-Osservazione allo stereomicroscopio con ingrandimento 8x del cordone di saldatura nelle condizioni 1650-20-03 nel lato della prima passata

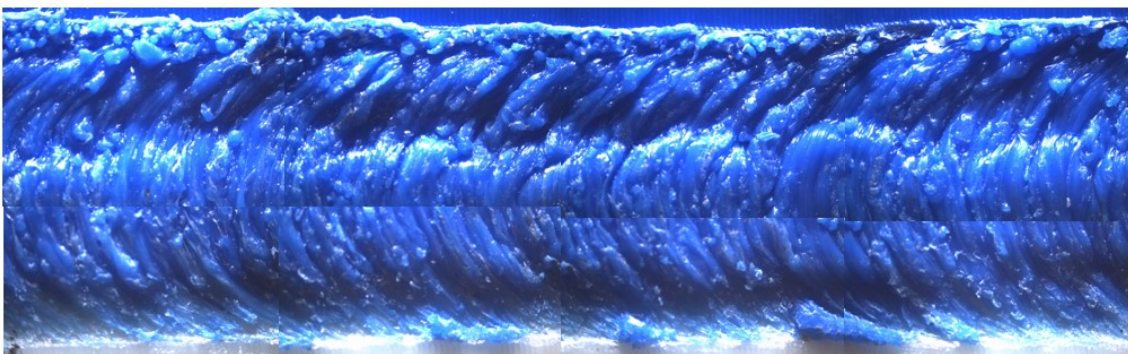


Figura 5.26-Osservazione allo stereomicroscopio con ingrandimento 8x del cordone di saldatura nelle condizioni di 1650-20-02 nel lato della seconda passata

Da queste immagini risulta evidente come le giunzioni saldate corrispondenti alle condizioni di saldatura 1650-20-03 e 1650-40-04 si presentavano con un aspetto estetico peggiore alle altre giunzioni a causa della presenza di vuoti, materiale stracciato e non saldato e di un gradino molto accentuato. Per tali motivi queste saldature sono state valutate non adeguate e si è preferito non procedere con il taglio di queste piastre.

5.3. PROVE DI PIEGATURA: RISULTATI SPERIMENTALI

In questo paragrafo sono riportati e discussi i risultati ottenuti mediante le prove di piegatura eseguite in laboratorio al fine di caratterizzare dal punto di vista delle proprietà meccaniche i giunti saldati ottenuti e individuare quale sia la combinazione migliore dei parametri presi in esame.

Caratterizzare da un punto di vista meccanico una parte sottoposta ad una prova di piegatura significa ricavare i tre seguenti tipo di grafici:

- grafico forza-spostamento;
- grafico tensione flessionale (σ_f) - deformazione flessionale (ϵ_f);
- modulo elastico flessionale.

La prassi utilizzata per riorganizzare i dati raccolti dalle prove sperimentali è riassunta nei 4 step successivi:

- **Acquisizione dei dati dalla macchina di prova:** in questo primo step i risultati delle prove della macchina vengono trasferiti mediante un'interfaccia software ad un foglio di calcolo Excel usando il programma Labview. In questo modo, dopo che la macchina ha registrato i valori di forza e spostamento, grazie alle formule presenti nel foglio Excel, è stato poi possibile eseguire la conversione nei valori di tensione flessionale e deformazione flessionale.

In questo primo step, tuttavia, si ricevono tutti i dati della prova e di conseguenza bisogna prendere in considerazione solo quelli che forniscono le

informazioni utili per la caratterizzazione del comportamento meccanico della prova. Infatti, in questo primo step, possono essere presenti dei valori di tensione negativi, poiché i dati iniziano ad essere registrati ancor prima che il punzone eserciti la sua azione di forza, o sbalzi molto accentuati della tensione, quando la pressione degli appoggi inizia a non essere più perfettamente radiale a causa dei micro-slittamenti degli appoggi stessi. La figura 5.3 mostra come si presentano i dati in un tipico grafico tensione-flessionale-deformazione flessionale.

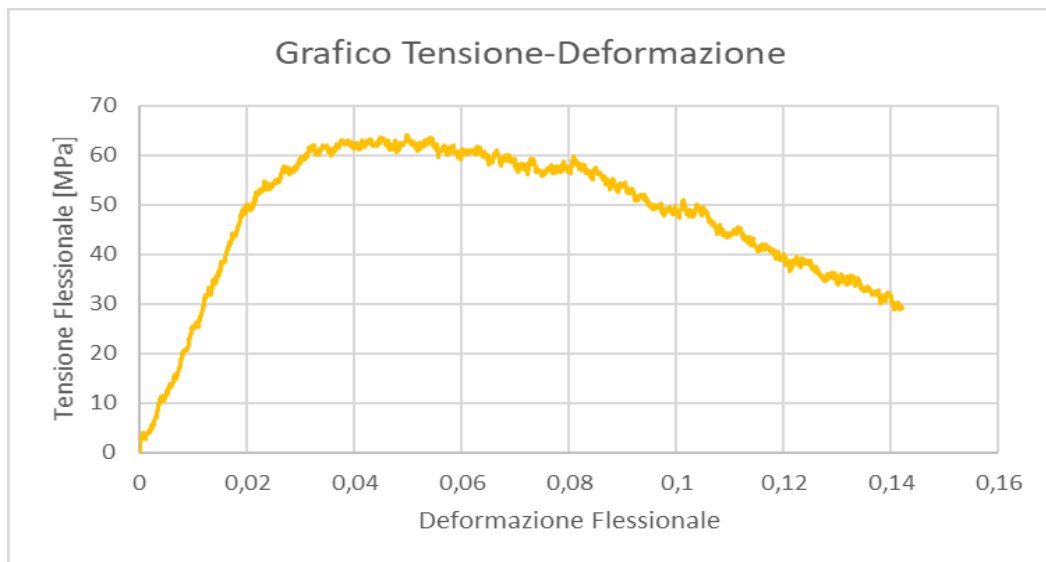


Figura 5.3 – Aspetto tipico dei dati di un grafico tensione flessionale-deformazione flessionale^[5]

- **Calcolo del modulo elastico flessionale E_f :** il modulo elastico flessionale rappresenta la rigidezza a flessione della zona saldata e per calcolarlo si sfruttano le indicazioni riportate nella norma ISO 178. Le formule presenti nella normativa prendono in considerazione la forza e lo spostamento, ma si è visto che usando i dati sperimentali ricavati dai grafici tensione-deformazione si giunge agli stessi risultati. In particolare, si è considerato come tratto elastico

quello composto dai dati di tensione e deformazione flessionale che arrivino a una deformazione flessionale del 2%.

In questo secondo step quindi si isolano i dati del grafico della figura 5.3 fino al valore della deformazione flessionale (ϵ_f) di 0.02 e successivamente si esegue un'interpolazione di questi dati mediante una linea di tendenza lineare e il coefficiente angolare dell'equazione di questa linea di tendenza sarà proprio il valore del modulo elastico flessionale espresso in Mpa.

Per esempio, nel grafico di figura 5.31 si ha un valore di $E_f = 2479,5$ Mpa.

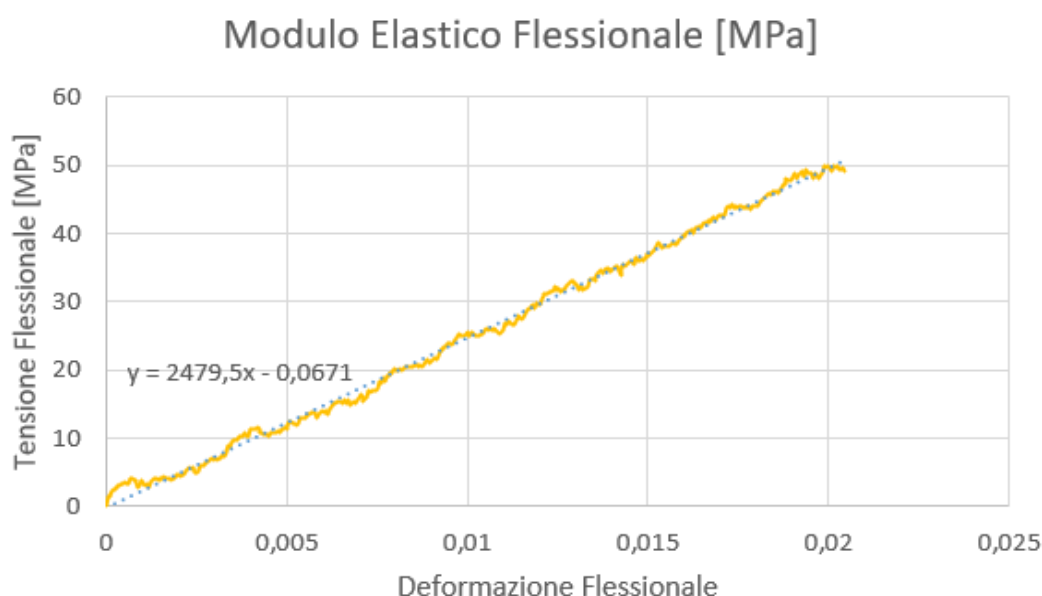


Figura 5.31- Aspetto tipico dei dati di un grafico tensione flessionale – deformazione flessionale al termine dello step 2

- **Ricostruzione della curva σ_f - ϵ_f :** in questo terzo step vengono isolati i dati del grafico 5.3 fino al picco di tensione flessionale, in modo da ricostruire una curva simile all'andamento di una curva σ - ϵ , ossia una curva sempre crescente fino ad un picco a cui corrisponde il punto in cui il provino è arrivato a rottura o ha subito una piegatura talmente rilevante da causare l'insorgenza di cricche. Una volta terminato questo step i dati si presentano come in figura 5.32.

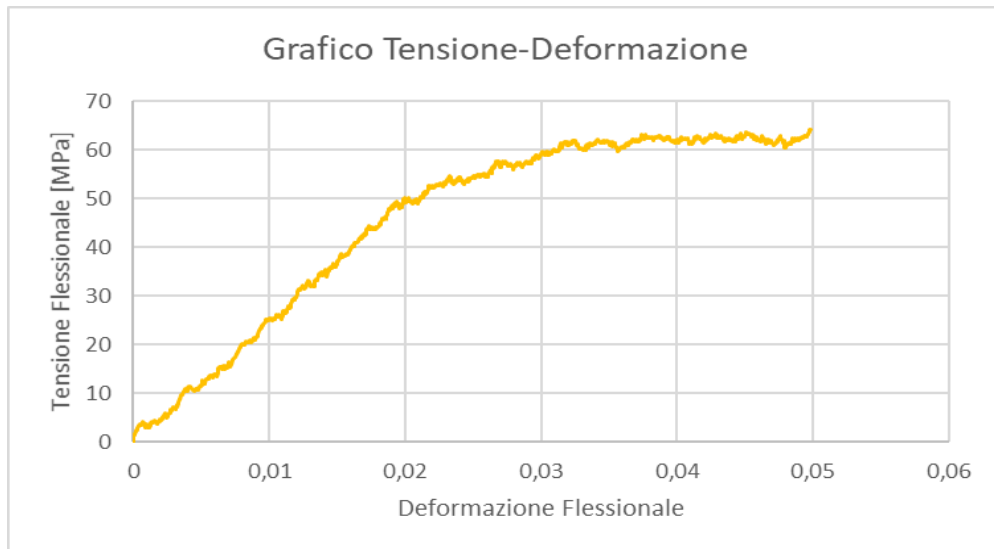


Figura 5.32- Aspetto tipico dei dati di un grafico tensione flessionale-deformazione flessionale al termine del terzo step

- **Interpolazione dei dati del terzo step mediante una linea di tendenza:** in questo quarto step si procede con l'eliminazione dell'andamento a dente di sega presente nel grafico di figura 5.32 mediante l'utilizzo di una linea di tendenza polinomiale che può essere di quarto, quinto o sesto grado.

Viene quindi eseguita una pulizia dei dati per ottenere una curva $\sigma_f-\epsilon_f$ con un andamento regolare; infatti, questa curva sarà quella che verrà utilizzata per confrontare le varie saldature corrispondenti ai vari parametri di processo.

La figura 5.33 mette in evidenza come si presentano i dati al termine del quarto step.

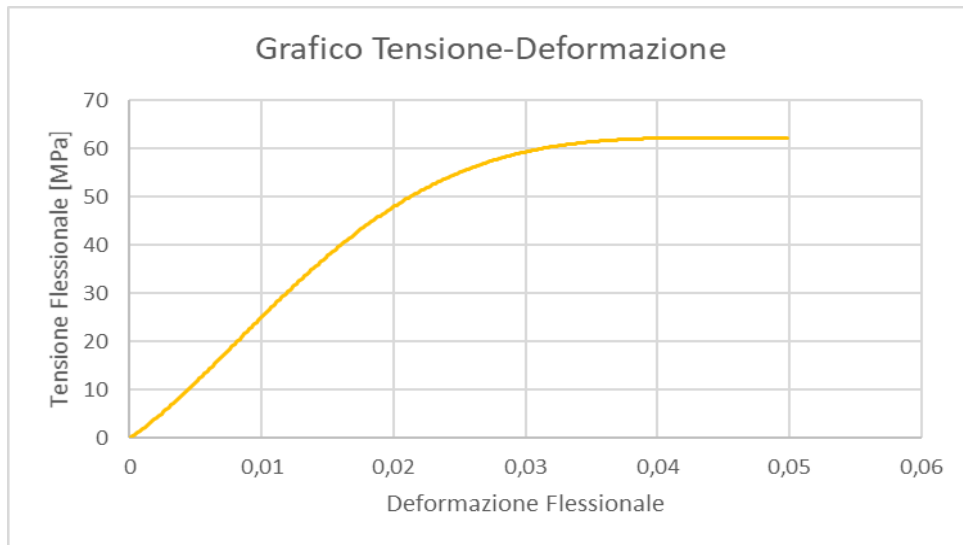


Figura 5.33- Aspetto tipico dei dati di un grafico tensione flessionale-deformazione flessionale al termine del quarto step

5.31. CONFRONTO TRA I PROVINI DI UNA STESSA PIASTRA

Una volta effettuate le prove di piegatura, e ricavate le relative curve tensione-deformazione, si è proceduto con il confronto delle due curve ottenute per ciascuna condizione di saldatura e si è scelta quella con i parametri meccanici migliori. Per esempio, la figura 5.34 mostra le due curve tensione-deformazione relative alle prove di piegatura dei provini P1D e P2D, dove la “D” sta per double side, riferiti alle piastre saldate con parametri di processo impostati a 1250-20-04.

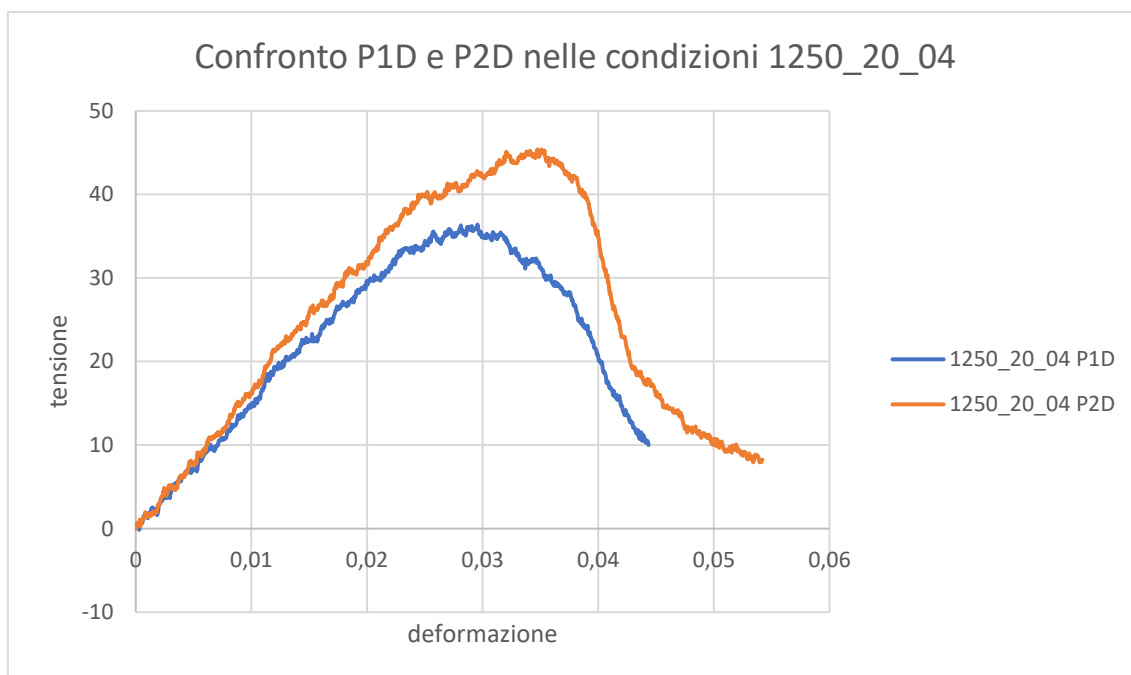


Figura 5.34-Confronto tra i provini P1D e P2D nelle condizioni di saldatura 1250-20-04 double side

In questo caso si nota come il provino P2D presenti il valore di tensione flessionale massima e deformazione flessionale massima maggiori rispetto al P1D e per questo motivo si è scelto di prendere in considerazione questa curva nel confronto finale delle curve ottenute con gli altri parametri di processo. La tabella 5.31 riassume i valori principali della tensione flessionale massima, della deformazione flessionale massima e del modulo elastico ottenuti da questi due provini.

	σ_{max}	ϵ_{max}	E
1250_20_04 P1D	36,39547	0,029571	1361
1250_20_04 P2D	45,40064	0,034749	1583

Tabella 5.31-Valori di tensione flessionale massima, deformazione flessionale massima e modulo elastico dei provini P1D e P2D nelle condizioni di saldatura 1250-20-04 double side

5.32. CONFRONTO PROVINI SOTTOPOSTI A PIEGATURA

Dopo aver confrontato tra di loro i provini con le stesse condizioni di saldatura e aver scelto per ogni condizione quello con i parametri meccanici migliori si è proceduto con il confronto dei provini con diversi parametri di saldatura. Nella figura 5.35 sono riportate le curve tensione-deformazione ottenute dalle prove di piegatura dei diversi provini, mentre la tabella 5.32 riassume le principali proprietà meccaniche rilevate come tensione flessionale massima, deformazione flessionale massima e modulo di Young.

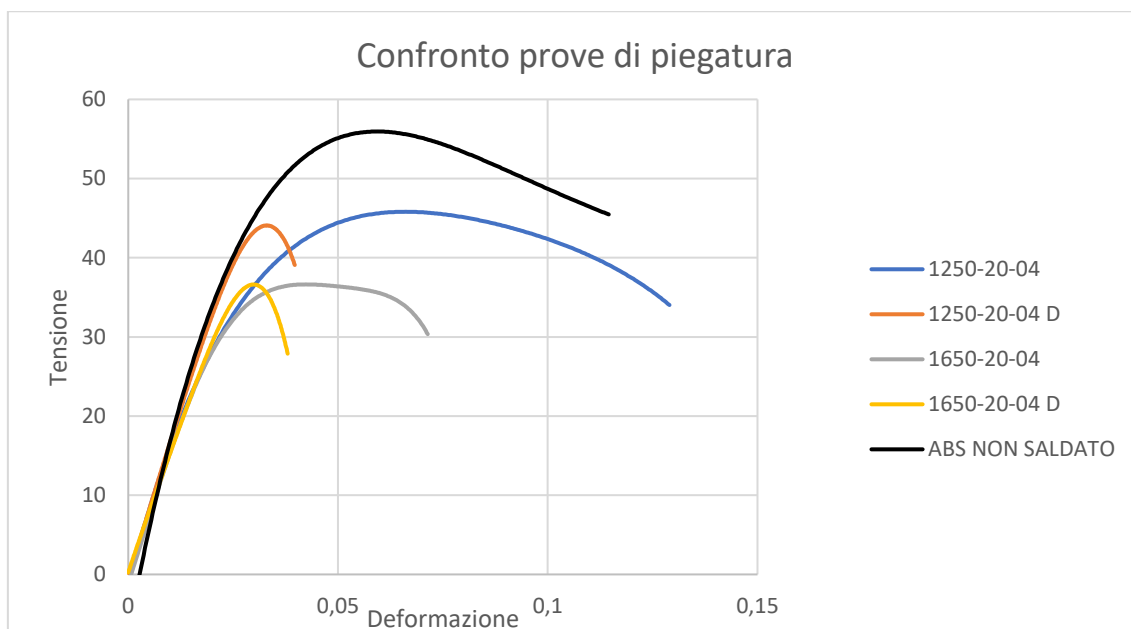


Figura 5.35-Confronto curve tensione-deformazione relativo ai provini con differenti parametri di saldatura

	σ_{max}	ϵ_{max}	E
1250-20-04	47,54656	0,072632	1446
1250-20-04 D	45,40064	0,034749	1583
1650-20-04	38,42318	0,039423	1370
1650-20-04 D	37,88234	0,029329	1314
ABS NON SALDATO	57,03697	0,04779	1666

Tabella 5.32-Valori di tensione flessionale massima, deformazione flessionale elastica e modulo elastico corrispondenti alle diverse condizioni di saldatura e di un provino in ABS non saldato

Il grafico 5.35 e la tabella 5.32 mettono in evidenza i seguenti risultati:

- Aumentando la velocità di rotazione dell'utensile si ha una diminuzione delle proprietà meccaniche del giunto saldato; infatti, passando da una velocità di rotazione dell'utensile di 1250 rpm a una di 1650 rpm e mantenendo invariati gli altri parametri di processo, il valore della tensione flessionale massima passa da 47.55 Mpa a 38.42 Mpa, mentre quello della deformazione flessionale massima da 0.073 a 0.039. Ciò è confermato dal grafico 5.36 nel quale vengono riportate le curve tensione-deformazione relative ai provini con i parametri di processo di 1250-20-04 e 1650-20-04.

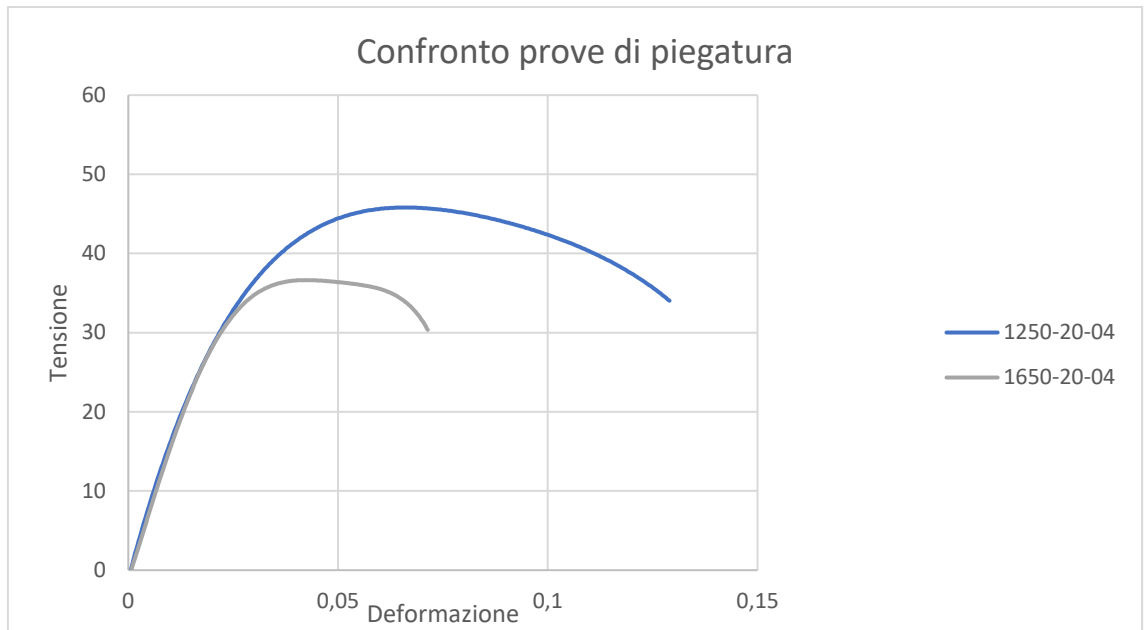


Figura 5.36-Confronto curve tensione flessionale-deformazione flessionale relative ai provini 1250-20-04 e 1650-20-04

Lo stesso fenomeno si può notare anche nel caso delle saldature double side come mostrato nel grafico 5.37, dal quale si ricava che il provino 1250-20-04D presenta proprietà meccaniche superiori rispetto al 1650-20-04D.

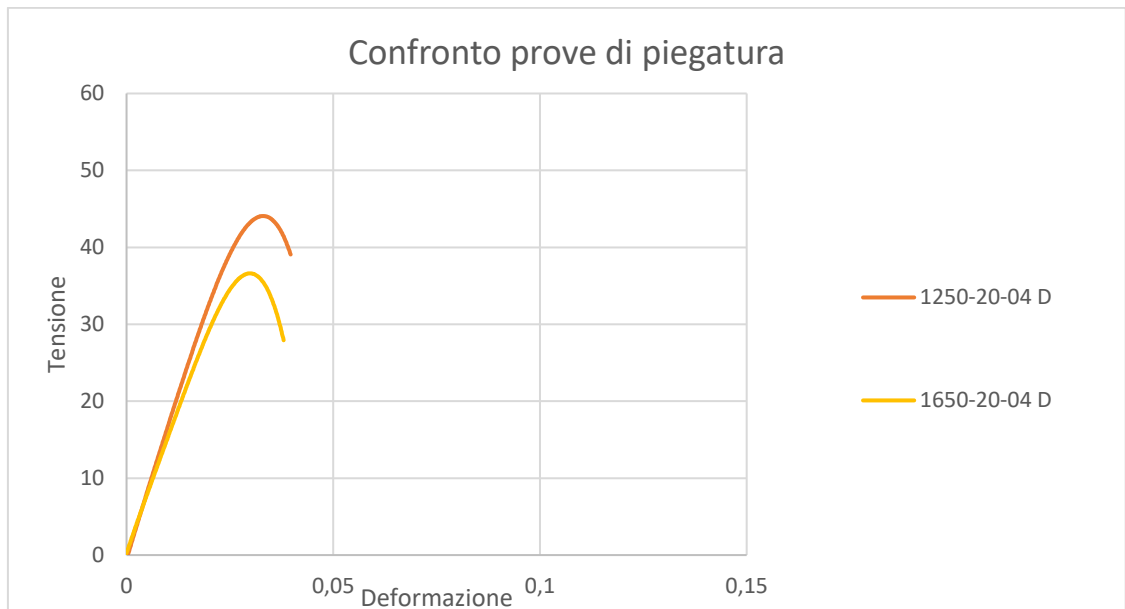


Figura 5.37-Confronto curve deformazione flessionale-tensione flessionale relative ai provini 1250-20-04 D e 1650-20-04D

- Al contrario di quello che ci si aspettava, i provini double side, ovvero quelli in cui si è effettuato la saldatura da entrambi i lati della piastra, presentano proprietà meccaniche inferiori rispetto ai rispettivi provini saldati da un solo lato della piastra; i grafici 5.38a e 5.38b mostrano infatti che in entrambi i casi i valori della tensione flessionale massima sono simili, mentre quelli della deformazione flessionale massima dei provini double side sono nettamente inferiori rispetto a quelli dei provini one side. Si può quindi affermare che la cricca si genererà per tensioni simili ma con deformazioni molto diverse.

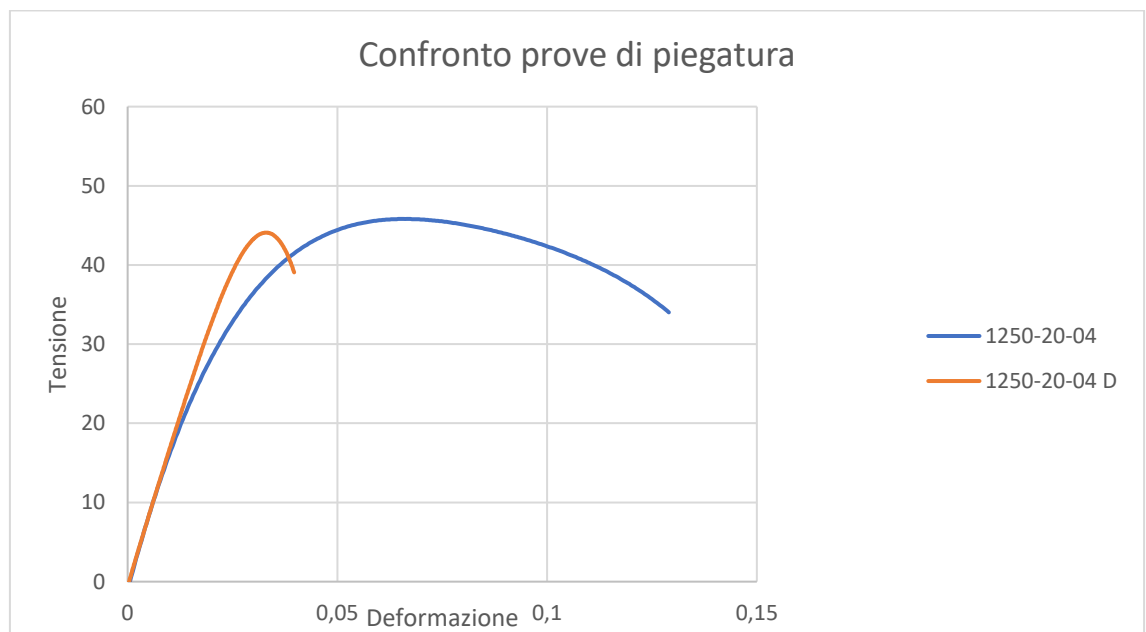


Figura 5.38a- Confronto curve tensione flessionale e deformazione flessionale relative ai provini 1250-20-04 e 1250-20-04 D

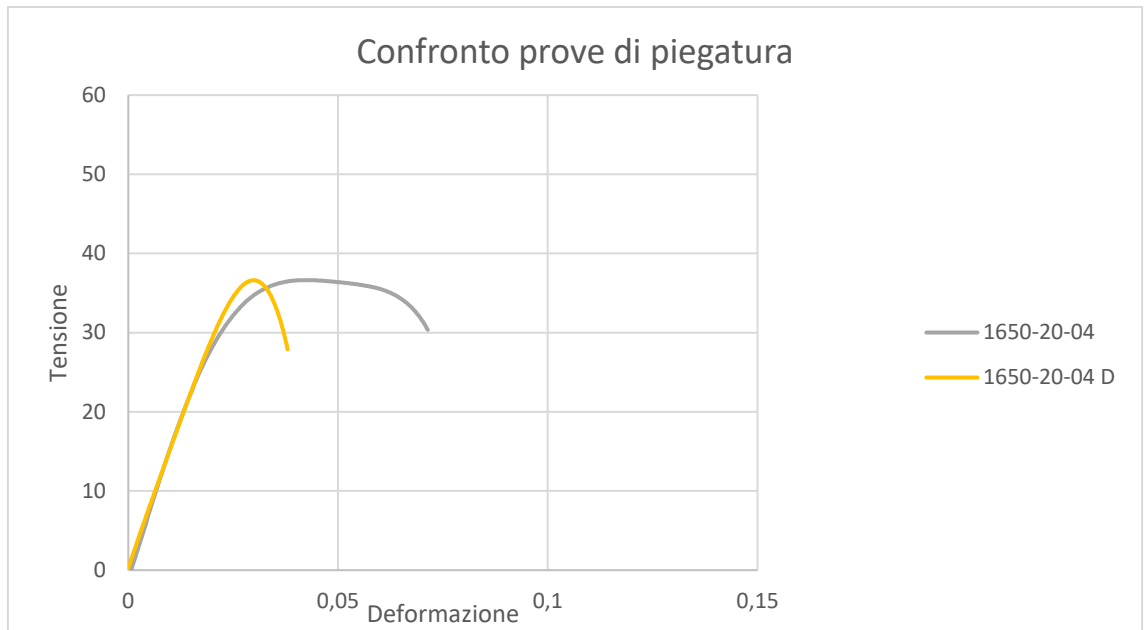


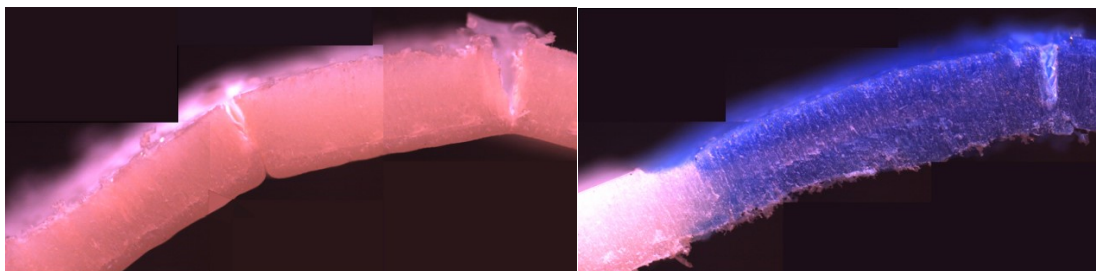
Figura 5.38b-Confronto curve tensione flessionale-deformazione flessionale relative ai provini 1650-20-04 e 1650-20-04D

- La tensione flessionale massima e la deformazione flessionale massima raggiunta dai quattro provini saldati risulta essere inferiore rispetto a quella del provino in ABS non saldato; infatti, nel caso del provino non saldato la tensione flessionale massima raggiunta è di 57,037 Mpa e la deformazione flessionale massima è di 0.048, mentre, come visto in precedenza, nei provini saldati la tensione flessionale massima e la deformazione flessionale massima assumono valori inferiori.

5.33. OSSERVAZIONE ALLO STEREO-MICROSCOPIO DEI PROVINI SOTTOPOSTI A PIEGATURA

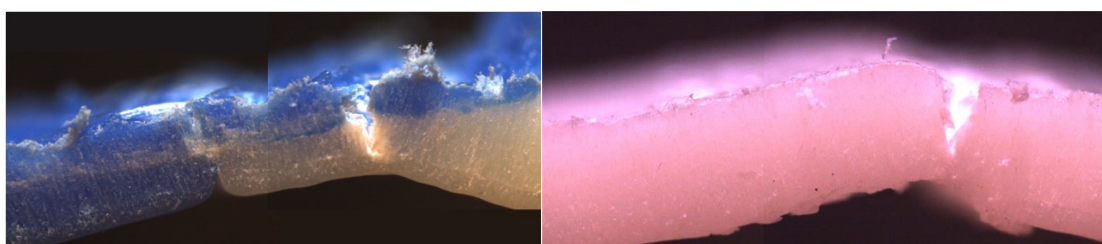
Una volta eseguite le prove di piegatura, è stata condotta un'analisi allo stereomicroscopio per analizzare più in dettaglio la zona di rottura dei vari provini. Per queste misurazioni è stato utilizzato un ingrandimento a 16x posizionando il provino su un fianco.

Nell'immagine 5.39(a) si nota come nel provino 1250-20-04 si siano verificati due punti di rottura, uno sul bordo esterno del cordone e l'altro in corrispondenza del giunto in cui sono state unite le due piastre, mentre le immagini 5.39 (b, c, d) mettono in evidenza come negli altri provini sia presente un solo punto di rottura posizionato sul bordo esterno del cordone di saldatura e non al centro.



*Figura 5.39a-Punti di rottura nel provino
1250-20-04*

*Figura 5.39b-Punto di rottura al bordo
della saldatura nel provino 1250-20-04D*



*Figura 5.39c e 5.39d-Punti di rottura nel bordo del cordone della saldatura nei provini
1650-20-04 e 1650-20-04D*

5.4. PROVE DI TRAZIONE: RISULTATI SPERIMENTALI

Per avere una visione completa delle caratteristiche del giunto saldato è stato necessario effettuare anche le prove di trazione; analogamente a quelle di piegatura, anche per le prove di trazione sono stati ricavati i grafici σ - ϵ in ogni condizione di saldatura per poter determinare il comportamento a trazione dei giunti saldati e verificarne la loro qualità.

Tramite il grafico 5.41 è stato possibile effettuare il confronto delle varie curve tensione-deformazione relative ai diversi parametri di processo, mentre la tabella 5.4 aiuta a riassumere le principali proprietà meccaniche misurate sui provini.

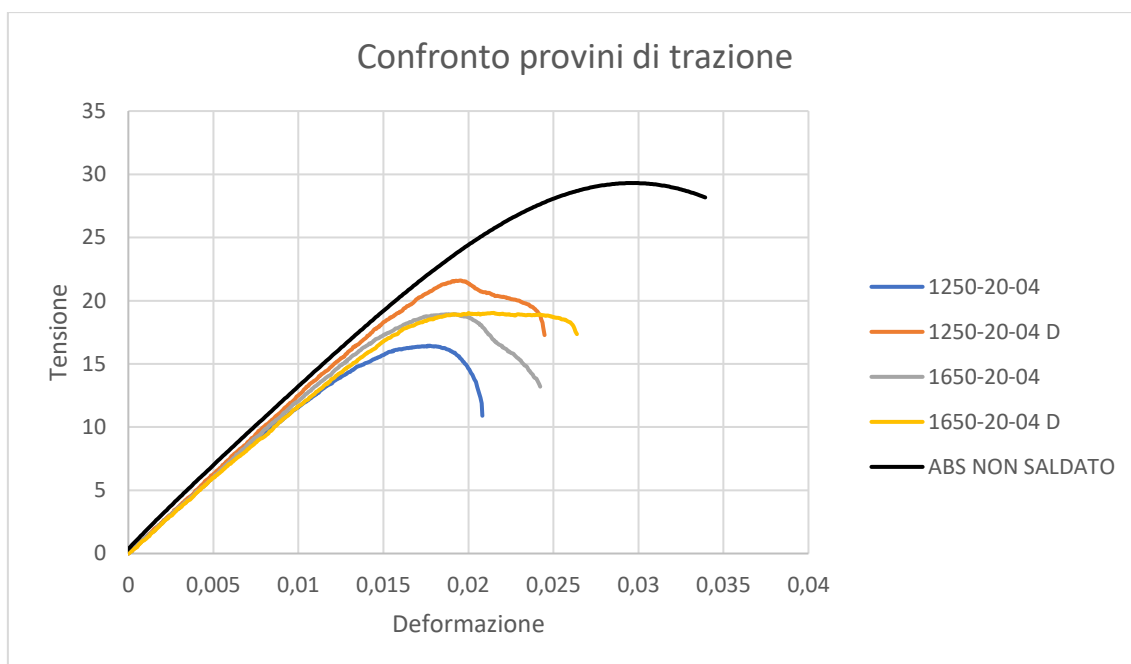


Figura 5.41-Confronto tra le curve tensione-deformazione per i provini con differenti parametri di saldatura

	σ_{max}	ϵ_{max}
1250-20-04	16,44481	0,017719
1250-20-04 D	21,59999	0,019524
1650-20-04	18,93736	0,019167
1650-20-04 D	19,03439	0,021475
ABS NON SALDATO	29,67178	0,027767

Tabella 5.4-Valori della tensione massima, deformazione massima e modulo elastico dei provini nelle diverse condizioni di saldatura e di un provino in ABS non saldato

Dal grafico 5.41 e dalla tabella 5.4 si è dedotto che:

- Nel caso delle saldature one side, all'aumentare della velocità di rotazione dell'utensile aumenta il valore della tensione massima raggiungibile: questo poiché l'aumento della velocità di rotazione dell'utensile comporta il raggiungimento di una temperatura più elevata in corrispondenza della zona di saldatura e ciò a sua volta porta a un incremento delle proprietà meccaniche del giunto. In particolare, si può notare come la tensione massima raggiungibile aumenti in maniera significativa, mentre la variazione della deformazione massima raggiungibile è più ridotta; infatti, passando da una ω di 1250 rpm a una di 1650 rpm e mantenendo invariati gli altri parametri di saldatura, la tensione massima passa da 16.44 Mpa a 18.94Mpa, mentre la deformazione massima da 0.018 a 0.019. Il grafico 5.42 riassume quanto detto.



Figura 5.42 – Confronto tra le curve tensione-deformazione dei provini ottenuti con parametri di processo di 1250-20-04 e 1650-20-04

- Al contrario di quanto visto sopra, nel caso delle saldature double side, all'aumentare della velocità di rotazione dell'utensile diminuisce il valore della tensione massima raggiungibile; infatti, quest'ultima passa da 21.6 Mpa per il provino 1250-20-04 D a 19.34 Mpa per il provino 1650-20-04 D.

Il grafico 5.42 riporta l'andamento delle curve tensione-deformazione dei due provini double side presi in esame.



Figura 5.42-Confronto tra le curve tensione-deformazione dei provini double side ottenuti con parametri di processo di 1250-20-04D e 1650-20-04D

- Le proprietà meccaniche delle saldature double side sono maggiori rispetto a quelle delle rispettive saldature one side; questo incremento è molto accentuato nel caso in cui la velocità di rotazione dell'utensile è di 1250 rpm mentre è meno accentuato quando ω è di 1650. Infatti, nel primo caso la tensione massima passa da 16,44 Mpa a 21,6 Mpa, mentre

nel secondo caso si passa da 18,94 Mpa a 19,03 Mpa. I grafici 5.43a e 5.43b mostrano quanto detto.

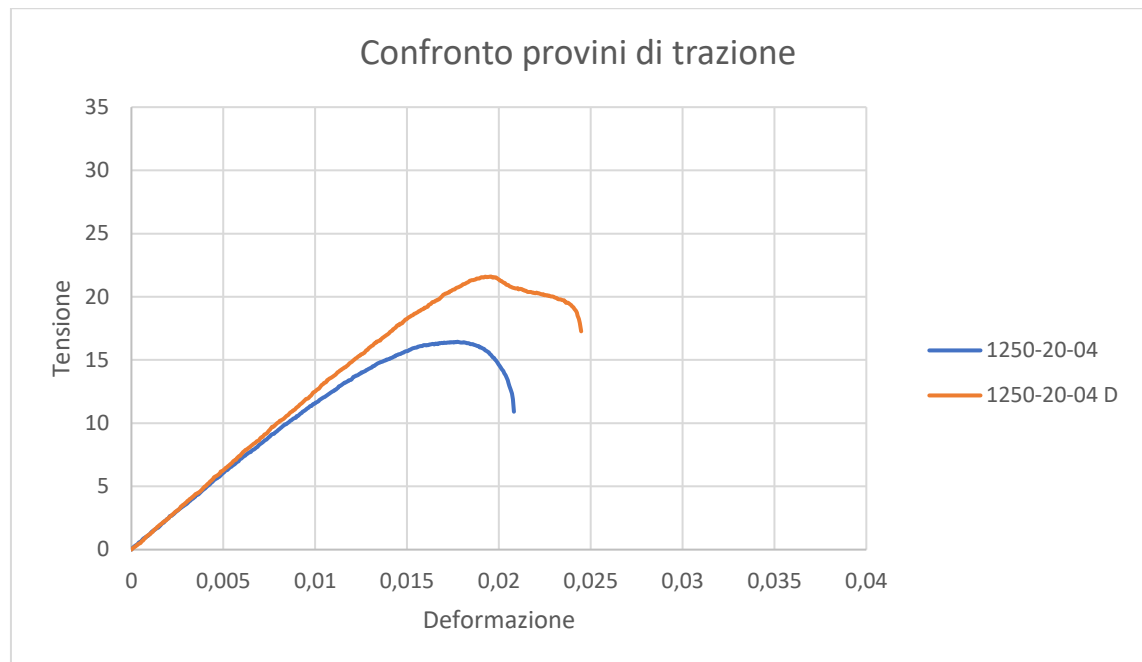


Figura 5.43a-Confronto tra le curve tensione-deformazione dei provini ottenuti con parametri di processo di 1250-20-04 e 1250-20-04D



Figura 5.43b- Confronto tra le curve tensione-deformazione dei provini ottenuti con parametri di processo di 1650-20-04 e 1650-20-04D

- La tensione massima e la deformazione massima raggiunta da tutti e quattro i provini saldati risulta essere molto inferiore rispetto a quella del provino in ABS non saldato; infatti, nel caso del provino non saldato la tensione massima raggiunta è di 29,671 Mpa e la deformazione massima è di 0,028 mentre, come visto in precedenza, nei provini saldati la tensione massima e la deformazione massima assumono valori inferiori.

5.41. OSSERVAZIONE ALLO STEREO-MICROSCOPIO DEI PROVINI SOTTOPOSTI A TRAZIONE

Dopo aver eseguito le prove di trazione, è stata svolta un'analisi allo stereomicroscopio dei provini arrivati a rottura. In questo caso le osservazioni allo stereomicroscopio sono state condotte impostando l'ingrandimento a 8x e bloccando il provino in posizione verticale.

Questa analisi si è rivelata particolarmente interessante in quanto con questo livello di ingrandimento è stato possibile studiare il rimescolamento interno del materiale avvenuto durante la saldatura e anche osservare con chiarezza fino a che profondità sia avvenuta la saldatura identificando di conseguenza la zona che non è stata interessata dal rimescolamento del materiale. In particolare grazie alle immagini 5.44 (a, c) è stato possibile calcolare lo spessore del materiale non saldato che si è rivelato essere di circa 1mm nel provino 1250-20-04, mentre di circa 0.8 mm per il provino 1650-20-04. Nelle immagini 5.44 (b, c) non è stato possibile identificare questa zona in quanto, trattandosi dei provini double side, la saldatura ha interessato l'intero spessore del provino, ma è stato possibile notare come la zona maggiormente interessata dal rimescolamento del materiale sia stata quella centrale.

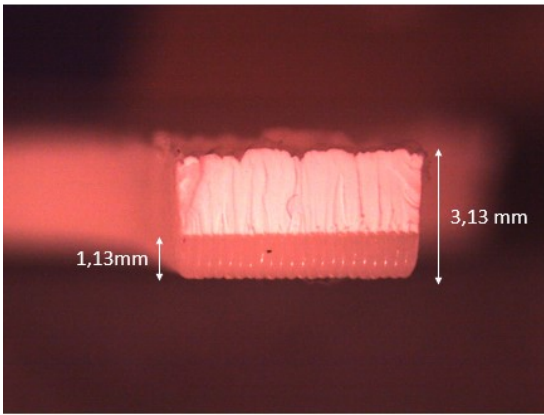


Figura 5.44(a) – Sezione del provino

1250-20-04

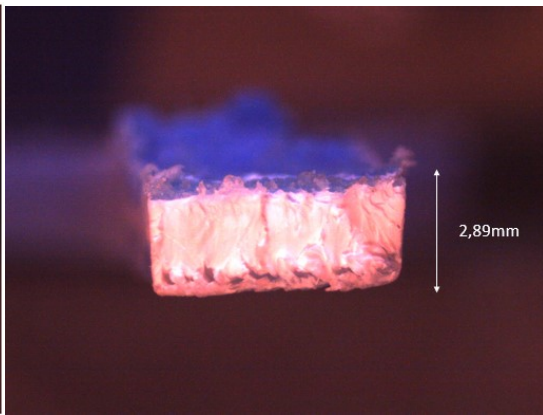


Figura 5.44(b) – Sezione del provino

1250-20-04D

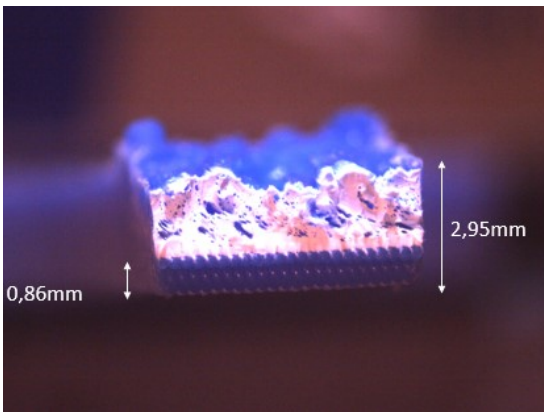


Figura 5.44(c) – Sezione del provino

1650-20-04

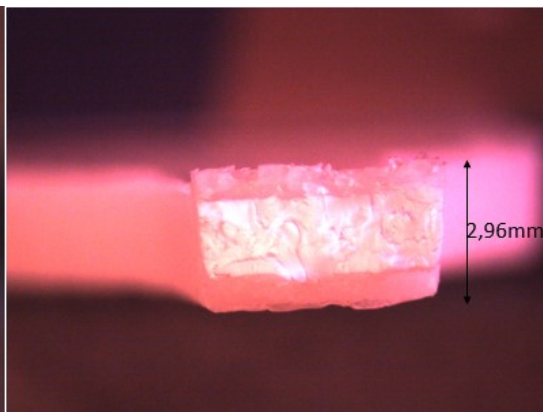


Figura 5.44 (d) – Sezione del provino

1650-20-04D

CAPITOLO 6-CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto l'obiettivo di studiare il comportamento meccanico di piastre in ABS realizzate mediante la tecnica di additive manufacturing FDM e sottoposte al processo di saldatura FSW. L'attenzione si è focalizzata, in particolar modo, sullo studio delle proprietà meccaniche del cordone di saldatura al variare dei parametri di processo, mediante prove di piegatura e di trazione. Il tutto è stato integrato con osservazioni allo stereomicroscopio e con l'analisi delle temperature raggiunte durante il processo di saldatura.

I principali risultati ottenuti possono essere sintetizzati come segue:

- L'aumento della velocità di rotazione dell'utensile durante il processo di saldatura genera un incremento della temperatura a causa del maggior calore generato per attrito;
- La velocità di avanzamento non ha particolari ripercussioni sulla temperatura raggiunta e sulle proprietà meccaniche;
- L'incremento dell'affondamento genera un aumento della temperatura in quanto, rimescolando un maggior volume di materiale, si genera maggior calore;
- La saldatura double side permette di chiudere il giunto saldato eliminando così il problema della mancanza di penetrazione della saldatura;
- Le saldature eseguite con i parametri di processo di 1650-20-03 e 1650-40-04 hanno generato dei cordoni di saldatura che sono stati ritenuti non idonei in quanto con questi parametri di saldatura non si è riuscito ad ottenere un rimescolamento omogeneo del materiale e il gradino formatosi tra il cordone e il materiale non saldato si è rivelato essere troppo marcato;

- A parità degli altri parametri di processo, la saldatura double side migliora le prestazioni meccaniche a trazione dei giunti saldati, mentre peggiora le prestazioni meccaniche a flessione;
- A parità degli altri parametri di processo, l'aumento della velocità di rotazione dell'utensile provoca un aumento delle proprietà meccaniche a trazione e un calo di quelle a flessione;
- I giunti saldati ottenuti mediante i parametri di processo investigati hanno proprietà meccaniche inferiori rispetto a quelle dell'ABS non saldato sia a trazione che a compressione.

I risultati ottenuti in questo lavoro di tesi dimostrano come il processo di saldatura FSW, già ampiamente utilizzato per le leghe di alluminio, possa trovare un'importante applicazione anche nelle lavorazioni delle materie plastiche come l'ABS, confermandosi essere un processo innovativo e a basso impatto ambientale.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri relativi all'ottimizzazione del processo FSW sul materiale ABS è sicuramente necessario svolgere ulteriori studi investigando altri parametri e condizioni di processo; per esempio, potrebbe essere interessante rilevare mediante un termometro laser le temperature che il materiale raggiunge durante il processo di saldatura in modo da poter misurare in tempo reale la temperatura effettiva in prossimità della saldatura senza errori con un metodo totalmente non invasivo. Si potrebbero inoltre studiare le proprietà meccaniche del giunto ottenuto mediante la saldatura Friction Stir Spot Welding, generando così un giunto sovrapposto che permetterebbe di realizzare manufatti dalla geometria più complessa.

Bibliografia

- [1] L. Caligaris, S. Fava e C. Tomasello, Manuale di Meccanica, Hoepli, 2015.
- [2] G. Roventi, «Slide del corso "Tecnologie dei materiali"».
- [3] A. Forcellese, «Slide del corso "Studi di Fabbricazione"».
- [4] M. Merli, «Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica - Processi di saldatura allo stato solido di piastre in materiale termoplastico ottenute mediante manifattura additiva».
- [5] L. Fioretti, «Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica- Studio di processi di friction stir welding di piastre in materiale termoplastico ottenute mediante manifattura additiva».
- [6] Gibson I., Rosen D. W., Stucker B., 2010, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, New York, USA.
- [7] Hanzlicek I., Pentek M., 2014, Computational Modeling of Stereolithography. In: IEEE GSC
- [8] D. Lamberti «Tesi di laurea magistrale in Ingegneria dei Materiali- Materiali polimerici per l'additive manufacturing: caratteristiche dei precursori e prestazioni meccaniche dei prodotti».
- [9] Gibson I., Rosen D. W., Stucker B., 2010, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, New York, USA.
- [10] Mohamed O. A., Syed H. M., Jahar L. B., 2015, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. Advances in Manufacturing.
- [11] R. De Camillis, «Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei materiali - Comportamento anisotropo di materiali compositi a matrice polimerica realizzate mediante additive manufacturing: effetto dell'orientazione del rinforzante».
- [12] Prajapati D., Swapnil N., and Vibhor A., Fused Deposition Modelling.
- [13] Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., Ifju P., 2017, Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics.
- [14] L. Franceschetti, «Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali - AM di PA/CF e funzionalizzazione laser».

[15] I. Pirozzi, «Tesi di Dottorato- Ottimizzazione di Processi FSW "Butt Joint", "Lap Joint" mediante RSM,» 2006-2007.

[16] C. Mignanelli, «Tesi 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».

[17] A. Bagheri, T. Azdast e A. Doniavi, «Uno studio sperimentale sulle proprietà meccaniche dei fogli di ABS saldati con mescolamento per attrito,» 2012.
<https://www.sciencedirect.com>

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento importante va al Prof. Archimede Forcellese per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro di tesi, riguardante tematiche molto attuali e interessanti.

Ringrazio inoltre la Prof.ssa Michela Simoncini, il Dott. Ing. Tommaso Mancina, la Dott. Ing. Serena Gentili e il tecnico di laboratorio Massimiliano che con la loro disponibilità, professionalità e competenza mi hanno seguito e aiutato durante questo percorso.

Infine, il grazie più grande va sicuramente alla mia famiglia che ha sempre creduto in me e mi ha sostenuto in questo percorso di studi.