

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
In Tecnologia Meccanica B

Analisi comparativa delle proprietà meccaniche di lamiere in
alluminio saldate laser: effetto del materiale d'apporto e della
strategia di movimentazione del laser.

CANDIDATO
Alessandro Zannoni

RELATRICE
Erica Liverani

Anno Accademico 2022/2023

*È sapiente solo chi sa di non sapere,
non chi s'illude di sapere e
ignora così perfino la sua stessa ignoranza.*

Indice

- 1. Introduzione** p.9
- 2. Teoria sull'alluminio** p.10
 - 2.1. Cenni sull'alluminio
 - 2.2. Classificazione delle leghe
 - 2.3. Struttura cristallina dell'alluminio e delle sue leghe
 - 2.3.1. Posti vacanti
 - 2.3.2. Dislocazioni
 - 2.3.3. Geminazione
 - 2.3.4. Impurezze
 - 2.4. Caratteristiche principali delle leghe da deformazione plastiche
 - 2.4.1. Serie 2XXX (Al-Cu)
 - 2.4.2. Serie 6XXX (Al-Mg-Si)
 - 2.4.3. Serie 7XXX (Al-Mg-Zn)
 - 2.5. Indurimento per precipitazione
- 3. La saldatura laser** p.24
 - 3.1. Introduzione
 - 3.2. Generalità sul laser
 - 3.3. Interazione laser materia
 - 3.4. Elementi caratteristici di una applicazione laser industriale
 - 3.5. Sorgente laser Yb: vetro in fibra
 - 3.6. Generalità sulla saldatura
 - 3.7. Difettologie delle saldature
 - 3.7.1. Ruolo della temperatura nella formazione dei giunti
 - 3.7.2. Tensioni e deformazioni in saldatura
 - 3.7.3. Cricche a caldo e a freddo
 - 3.7.4. Altre difettologie
 - 3.8. Problematiche legate alla saldabilità di componenti in alluminio tramite sorgente laser a fibra.
- 4. La prova di trazione** p.39
 - 4.1. Introduzione
 - 4.2. Cenni sulla prova di trazione
 - 4.3. Struttura della macchina per la prova di trazione
 - 4.4. Forza, Carico, Tensione
 - 4.4.1. Diagramma Forza/Spostamento
 - 4.4.2. Diagramma Carico/Allungamento
 - 4.4.3. Diagramma Tensione/Deformazioni
 - 4.5. Confronto tra i vari grafici esistenti in letteratura e l'utilizzo di diversi sistemi di raccolta dati

- 4.6. Differenza tra i grafici di materiali duttili e fragili e il fenomeno dell'incrudimento
- 4.7. Influenza nella variazione delle condizioni al contorno nei grafici della prova di trazione
 - 4.7.1. Temperatura
 - 4.7.2. Velocità
- 4.8. Le leghe d'alluminio e la prova di trazione
- 5. Metodi sperimentali utilizzati per l'analisi dei dati** p.48
 - 5.1. Confronto tra la presso fusione e la stampa 3D SLS
 - 5.1.1. Introduzione
 - 5.1.2. Cenni sulla stampa SLS
 - 5.1.2.1. Vantaggi e svantaggi
 - 5.1.3. Cenni sulla Presso Fusione
 - 5.1.3.1. Vantaggi e svantaggi
 - 5.2. Paragone tecnologico tra SLS e Presso fusione per una lega d'alluminio
 - 5.3. Realizzazione dei provini
 - 5.3.1. Parametri per la realizzazione dei provini
 - 5.3.2. Parametri per la saldatura
 - 5.4. Metodologia utilizzata per l'analisi delle deformazioni
 - 5.4.1. Funzionamento di Gom-Correlate
 - 5.4.2. Come Gom-Correlate determina le deformazioni
 - 5.4.3. Decomposizione polare del gradiente delle deformazioni
 - 5.4.4. Computazione in GOM
 - 5.4.5. Risultati del tensore delle deformazioni
 - 5.5. Formule utilizzate per il calcolo della σ_{eq}
- 6. Discussione dei dati sperimentali** p.64
 - 6.1. Introduzione
 - 6.2. 13sf_3
 - 6.3. 14sf_1
 - 6.4. 14sf_2
 - 6.5. 14sf_3
 - 6.6. 14W_A_3
 - 6.7. 18W_A_2
 - 6.8. 18W_A_3
 - 6.9. 16_1
 - 6.10. 16_2
 - 6.11. Trattazione dei risultati

7. Conclusioni	p.75
8. Bibliografia e Sitografia	p.77
8.1. Bibliografia	
8.2. Sitografia	
8.3. Indice delle figure	
8.4. Indici dei grafici	
8.5. Indice delle tabelle	

1. Introduzione

L'alluminio è uno dei materiali più comunemente utilizzati in molte applicazioni industriali, come quella automobilistica, aerospaziale e marina, con proprietà come leggerezza, resistenza alla corrosione e facilità di lavorazione.

La saldatura laser è una tecnica sempre più popolare per unire parti in alluminio e offre numerosi vantaggi, tra cui precisione, tolleranze strette e la capacità di produrre giunti di alta qualità.

Tuttavia, l'efficacia di questo processo è influenzata da molti fattori, come il materiale d'apporto utilizzato e l'uso del wobbling come tecnica di ottimizzazione del processo.

Lo scopo di questo studio triennale è quello di analizzare comparativamente le proprietà meccaniche di lamiere di alluminio saldate mediante tecnologia laser, con particolare attenzione agli effetti del metallo d'apporto e al wobbling. Il metallo d'apporto è una parte importante del processo di saldatura poiché influisce sulle proprietà chimiche e meccaniche del giunto saldato.

Allo stesso tempo, il wobbling, ovvero il movimento oscillatorio del raggio laser, può essere utilizzata per migliorare la profondità di penetrazione del laser e la distribuzione del calore all'interno del materiale, influenzando le proprietà del giunto saldato. Lo scopo di questo studio è comprendere meglio come questi due fattori influenzano le proprietà meccaniche delle saldature in alluminio.

Attraverso un'analisi sperimentale dettagliata, verranno studiati gli effetti del metallo d'apporto e della strategia di wobbling sulla resistenza alla trazione del cordone di saldatura.

I risultati ottenuti vengono utilizzati per determinare i migliori parametri per ottenere le migliori saldature con minor difetti ed elevata resistenza meccanica.

2. Teoria sull'alluminio

2.1 Cenni sull'alluminio

L'alluminio è un elemento della tavola periodica indicato dalla sigla Al, fa parte della famiglia dei metalli, ha un colore grigio-argenteo e ha come numero atomico il 13.

Le principali caratteristiche fisiche/meccaniche sono:

- Densità (ρ) 2700 kg/m³
- Calore specifico (C_s) 880 J/(K*kg)
- Calore latente di fusione (λ_f) $4.0 \cdot 10^5$ J/kg
- Punto di fusione (Θ_f) 933 K
- Punto di ebollizione (Θ_e) 2600 K
- Conducibilità termica (λ_t) 290 W/(m*K)
- Modulo elastico (E) $70 \cdot 10^9$ N/m²

La bassa densità, circa 1/3 rispetto a quella dell'acciaio, e la buona resistenza, fanno sì che l'alluminio venga impiegato in svariati ambiti quando si è alla ricerca della minimizzazione del peso e la massimizzazione delle prestazioni.

Altre caratteristiche che rendono l'alluminio un materiale estremamente versatile sono un'elevata duttilità e un'elevata malleabilità che lo rendono adatto a subire processi di lavorazione sia ad alta che a bassa temperatura.

Grazie alla generazione di uno strato di ossido superficiale l'alluminio possiede ottime qualità di resistenza alla corrosione.

Inoltre, l'alluminio possiede elevati coefficienti di conducibilità sia termica che elettrica; i quali gli permettono di essere impiegato sia nel campo alimentare che in quello elettronico.

2.2 Classificazione delle leghe

L'alluminio puro possiede proprietà meccaniche scadenti, le quali pregiudicano l'applicazione industriale a pochissimi casi particolari; dove invece le sue leghe trovano un più ampio margine di lavoro.

I principali elementi alliganti utilizzati nelle leghe d'alluminio sono:

- Rame (Cu)
- Zinco (Zi)
- Silicio (Si)
- Manganese (Mn)
- Magnesio (Mg)

	Cu	Mn	Si	Mg	Zn
Proprietà meccaniche	↑↑	↑	↑	↑	↑↑
Deformabilità a freddo	↓	↑	↓	↓	↓
Resistenza a corrosione	↓	↑	=	↑	=
Saldabilità	↓	↑	=	↑	↓

Tabella 1: Influenza dei principali elementi di lega sulle caratteristiche meccaniche delle leghe d'alluminio (↑ Migliora, ↓ Peggiora, = Rimane invariata). [1]

L'aggiunta degli elementi di lega permette di migliorare in maniera esponenziale le proprietà base dell'alluminio.

Le leghe d'alluminio vengono divise in due categorie:

- Leghe da deformazione plastica
- Leghe per getto

Le leghe da deformazione plastica vengono classificate in tal modo visto l'applicazione in operazioni di deformazione a freddo o a caldo; esse rappresentano la maggior parte delle applicazioni in ambito industriale delle leghe d'alluminio.

La designazione di questa famiglia si basa su di una classificazione numerica progressiva di quattro cifre che permettono l'immediata individuazione della composizione chimica.

La Designazione:

- La prima cifra indica la famiglia di appartenenza:
 - 1XXX alluminio puro (\cong 99% alluminio)
 - 2XXX alluminio-rame (Al-Cu)
 - 3XXX alluminio-manganese (Al-Mn)
 - 4XXX alluminio-silicio (Al-Si)
 - 5XXX alluminio-magnesio (Al-Mg)
 - 6XXX alluminio-magnesio-silicio (Al-Mg-Si)
 - 7XXX alluminio-zinco-magnesio (Al-Zi-Mg)
 - 8XXX leghe speciali
- La seconda cifra:

Definisce le eventuali varianti nella composizione originaria; se assume il valore zero significa che la lega contiene elementi conformi alla composizione base, mentre se è diversa da zero contiene altri elementi.
- Terza e quarta cifra:

Nella serie 1XXX indica il grado di purezza mentre in tutte le altre individua una lega specifica.

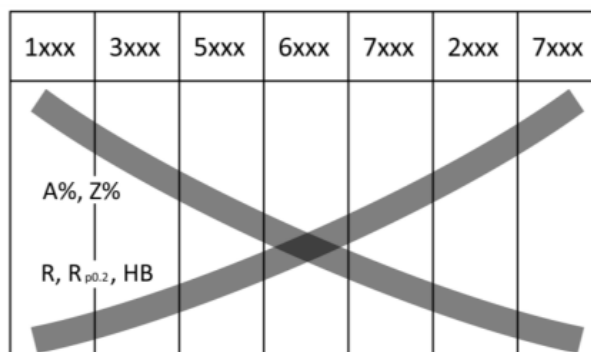


Grafico 1: Variazione qualitativa delle caratteristiche di allungamento percentuale (A%), coefficiente percentuale di strizione (Z%), durezza Brinell (HB), carico di snervamento ($R_{p0.2}$). [1]

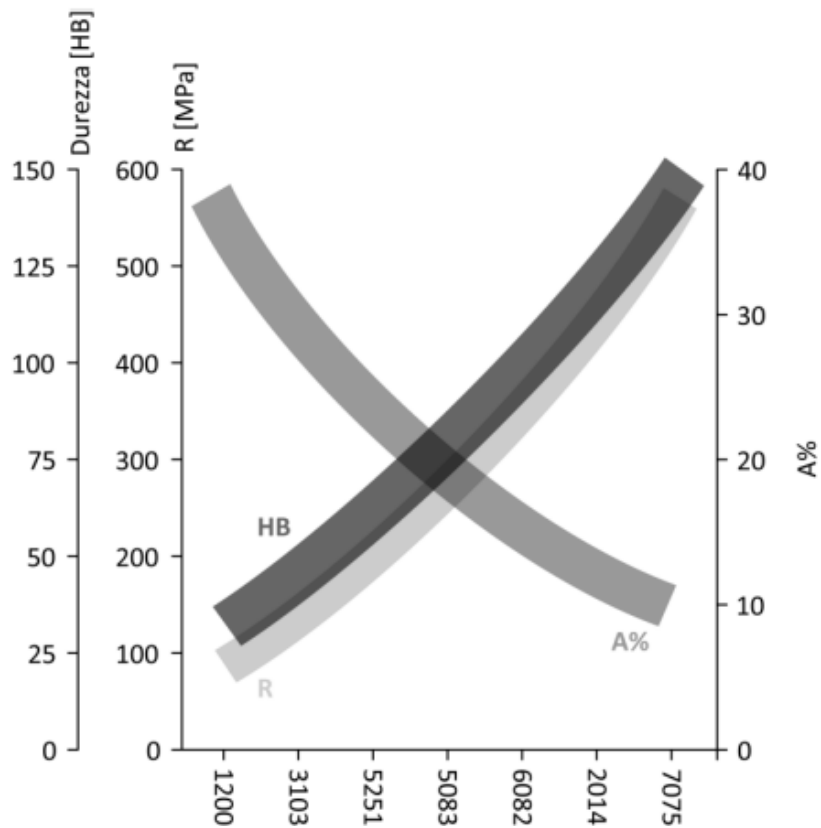


Grafico 2: Variazione numerica-qualitativa delle caratteristiche di allungamento percentuale (A%), durezza Brinell (HB), carico di rottura (R) per leghe d'alluminio. [1]

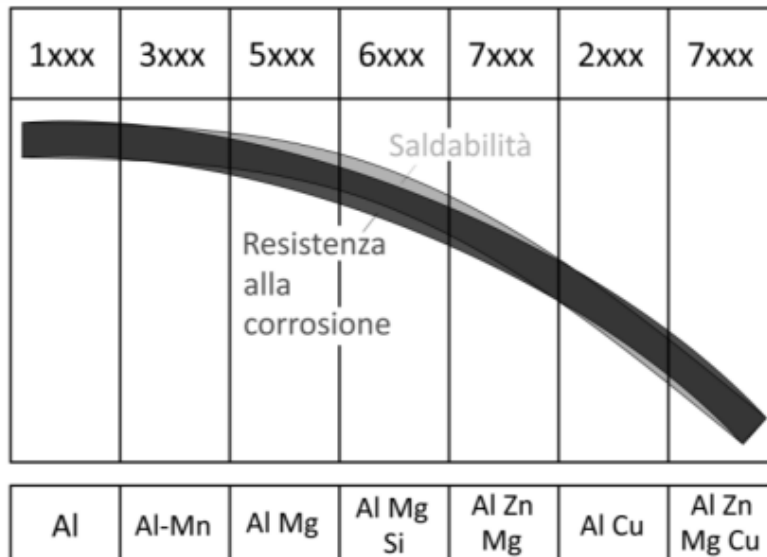


Grafico 3: Variazione qualitativa delle proprietà di saldabilità e resistenza alla corrosione. [1]

Un'ulteriore differenziazione viene fatta in base all'applicazione finale; infatti, vengono classificate:

- Leghe da trattamento termico
- Leghe da incrudimento

Partendo dalla descrizione delle leghe trattabili termicamente si differenziano in funzione del processo termico che subiscono; con l'aggiunta, dopo la nomenclatura numerica, della scritta TX:

- T1: Tempra diretta dal processo e invecchiamento naturale
- T2: Tempra diretta dal processo, incrudimento e poi invecchiamento naturale.
- T3: Tempra di solubilizzazione, incrudimento e poi invecchiamento naturale.
- T4: Tempra di solubilizzazione e invecchiamento naturale.
- T5: Tempra diretta dal processo e invecchiamento artificiale.
- T6: Tempra di solubilizzazione e invecchiamento artificiale.
- T7: Tempra e stabilizzazione e sovrainvecchiamento artificiale.
- T8: Tempra di solubilizzazione, incrudimento e invecchiamento artificiale.
- T9: Tempra di solubilizzazione, invecchiamento artificiale e poi incrudimento.

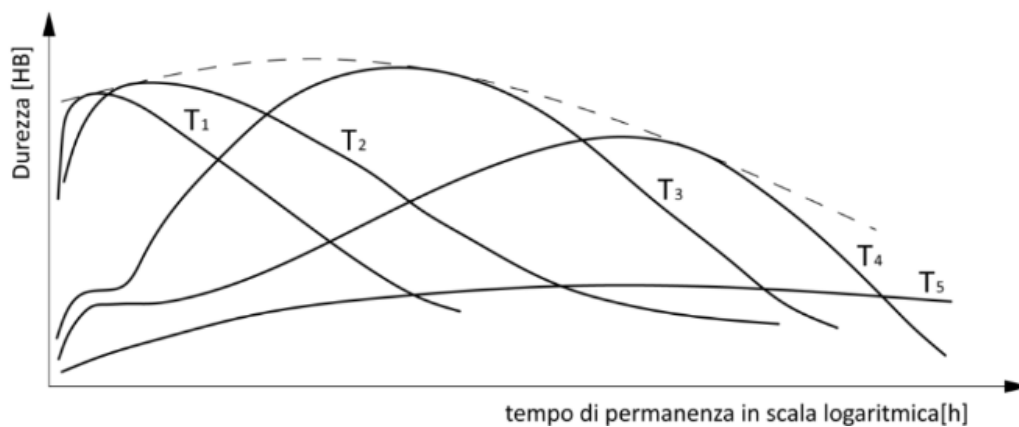


Grafico 4: Valutazione qualitativa che mette in relazione la durezza e il tempo dei vari processi di trattamento termico. [1]

Invece per quanto riguarda le leghe da incrudimento la nomenclatura cambia; infatti, la sigla diventa HXX:

- La prima X può assumere valori:
 - 1 semplicemente incrudita.
 - 2 incrudita e poi parzialmente ricotta.
 - 3 incrudita e successivamente stabilizzata.
 - 4 incrudita e verniciata.
- La seconda X può assumere valori:
 - 2 1/4 Incrudito.
 - 4 1/2 Incrudito.
 - 6 3/4 Incrudito.
 - 8 Completamente incrudito.
 - 9 Extra incrudito.

Esistono poi altri stati di trattamento oltre a quelli d'incrudimento e di trattamento termico quali:

- F: Grezzo di lavorazione.
- O: Ricottura completa.
- W: Solubilizzato.

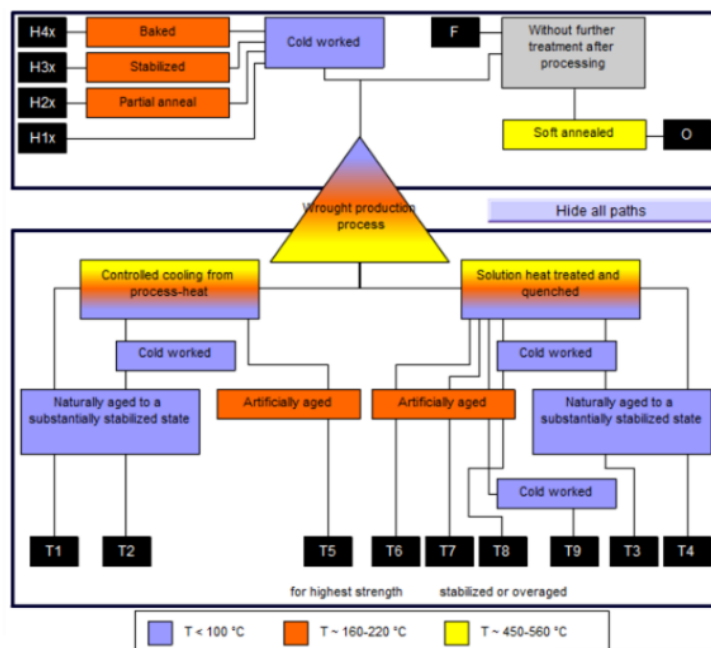


Figura 1: Riassunto dei vari trattamenti sulle leghe d'alluminio. [2]

2.3 Struttura cristallina dell'alluminio e delle sue leghe

L'alluminio ha struttura cubica faccia centrata (c.f.c.) con distanza reticolare di 4.049 Å ($1\text{Å}=10^{-8}\text{cm}$); risulta estremamente importante comprendere come il reticolo cristallino viene influenzato dalla presenza di anomalie, le quali possono modificare sostanzialmente la risposta del materiale.

Le principali anomalie che possiamo trovare all'interno del reticolo possono essere raggruppate come segue:

- Posti vacanti
- Dislocazioni
- Geminazione
- Impurezze

2.3.1 Posti vacanti

In un reticolo cristallino la mancanza di atomi in punti in cui normalmente dovrebbero essere presenti creano un'anomalia; le vacanze sono maggiormente presenti in superficie, visto che qui troviamo atomi che sono meno legati rispetto a quelli più interni.

La presenza di posti vacanti è alla base del trattamento termico d'invecchiamento delle leghe d'alluminio; la migrazione di atomi di soluto, per la formazione di precipitati, impiegherebbe un tempo spropositato se non fossero presenti le vacanze.

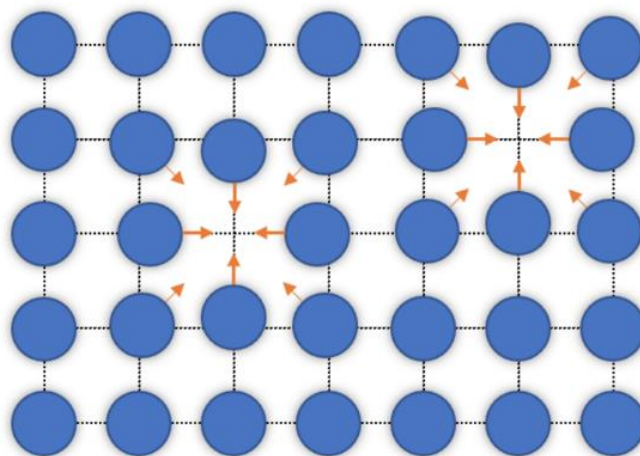


Figura 2: Rappresentazione di un reticolo cristallino con la presenza di vacanze al suo interno. [3]

2.3.2 Dislocazioni

Lo scorrimento del reticolo cristallino, a seguito dell'applicazione di forze esterne, danno origine a un reticolo distorto, le dislocazioni rendono possibile le deformazioni plastiche con bassi sforzi.

Esistono varie tipologie di dislocazioni:

- Spigolo (positivo o negativo)
- Vite
- Miste
- Anelli di dislocazione

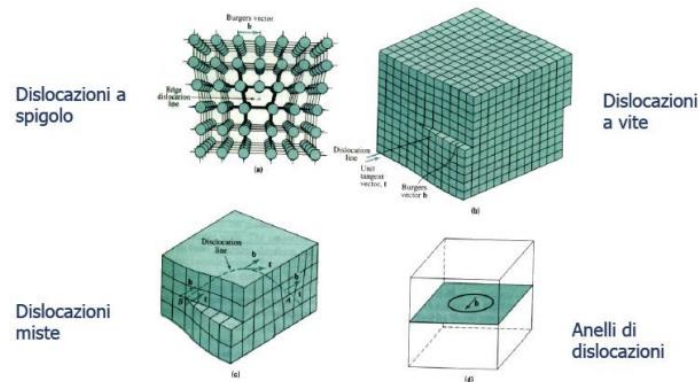


Figura 3: Rappresentazione delle varie tipologie di dislocazioni. [4]

2.3.3 Geminazione

Anomalia che consiste, a seguito di una deformazione del reticolo, in un diverso orientamento di quest'ultimo; l'energia di bordo dei geminati è molto minore rispetto a quella generica.

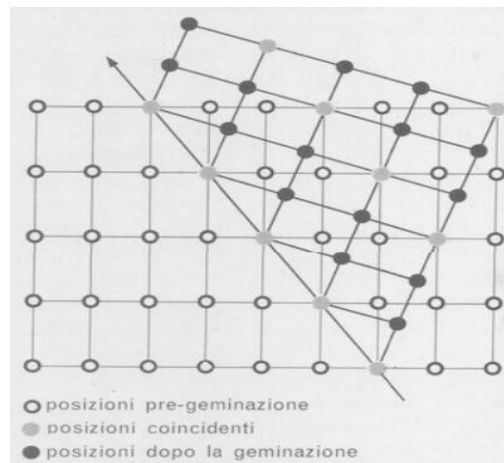


Figura 4: Reticolo che ha subito geminazione. [5]

I geminati, con il reticolo sostanzialmente differente rispetto alla loro forma base, possono porre in condizione migliorativa o peggiorativa, a seconda della disposizione, la sopportazione di sollecitazione esterne.

2.3.4 Impurezze

Vengono considerate impurezze qualsiasi altro atomo che non sia del materiale legante; la presenza d'impurezze sta alla base dei processi di trattamenti termici di qualsiasi lega metalli.

La presenza d'impurezze distorce il reticolo cristallino migliorando così le caratteristiche di resistenza della lega.

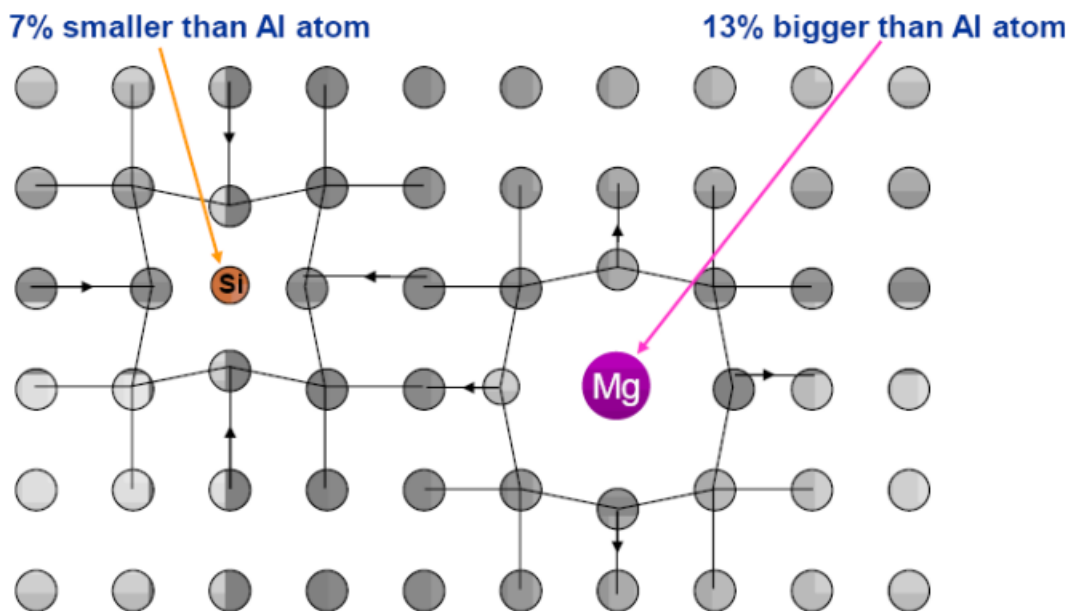


Figura 5: Rappresentazione d'impurezze in un reticolo cristallino di una lega d'alluminio. [2]

2.4 Caratteristiche principali delle leghe da deformazione plastica più utilizzate

In questo sottocapitolo si vogliono introdurre le principali caratteristiche delle leghe da deformazione plastica più comuni nell'ambito ingegneristico.

2.4.1 Serie 2XXX (Al-Cu)

Conosciuto commercialmente come "Avional", il principale elemento alligante è il rame con un valore minimo dello 0.3%.

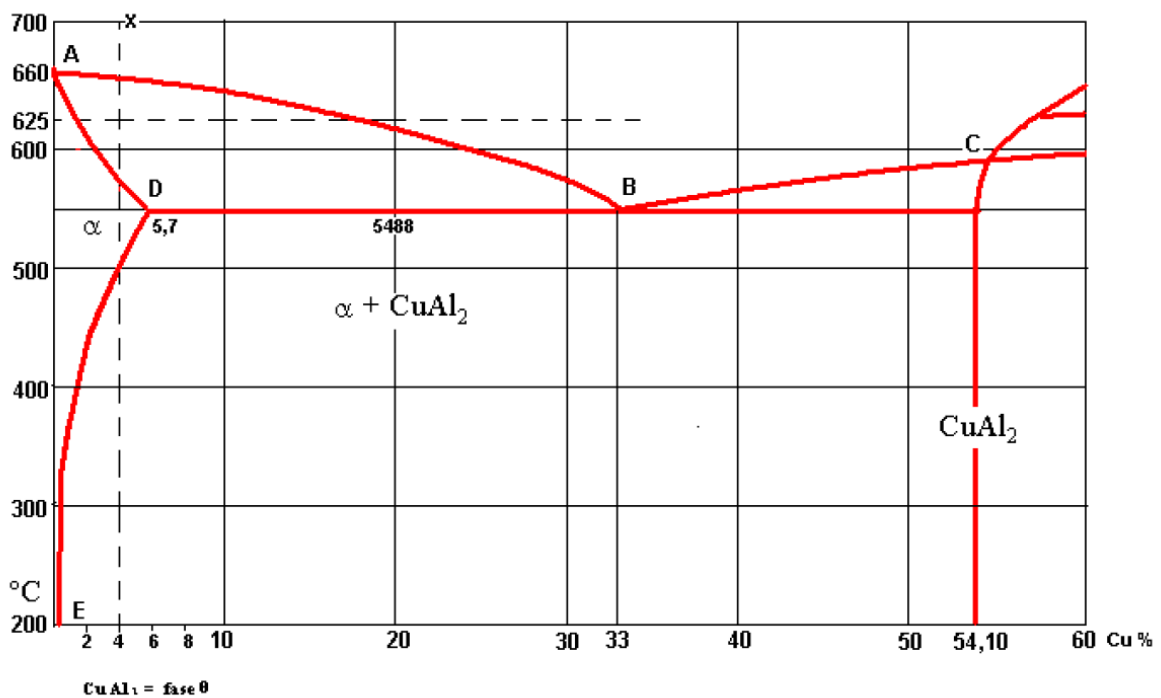


Grafico 5: Diagramma di stato della lega 2XXX. [6]

- Scarsa deformazione a freddo
- Scarsa resistenza alla corrosione
- Scarsa saldabilità
- Ottime qualità meccaniche:
 - Ru 400 ÷ 500 MPa (Carico di rottura)
 - Rs 300 ÷ 400 MPa (Carico di snervamento)

2.4.2 Serie 6XXX (Al-Mg-Si)

Conosciuto commercialmente come “Anticorodal”.

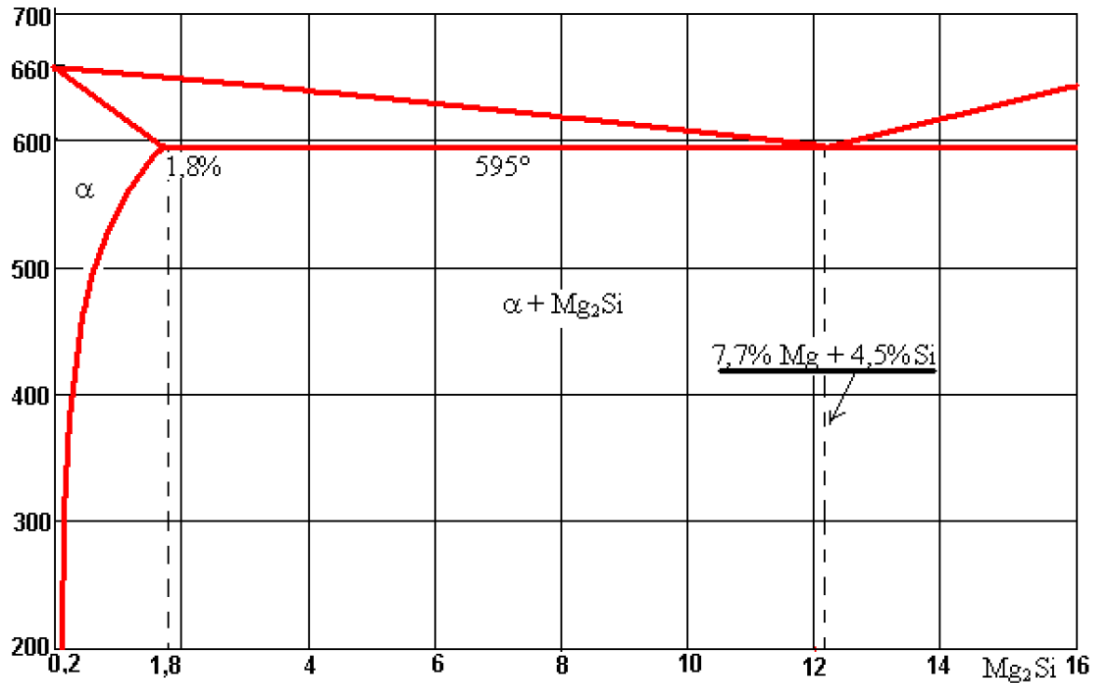


Grafico 6: Diagramma di stato della lega 6XXX. [6]

- Buona deformabilità a freddo
- Buona resistenza alla corrosione
- Buona saldabilità
- Buone qualità meccaniche:
 - Ru 250 ÷ 350 MPa (Carico di rottura)
 - Rs 200 ÷ 250 MPa (Carico di snervamento)

2.4.3 Serie 7XXX (Mg-Zn)

Conosciuto commercialmente come “Ergal”, il principale elemento di lega è lo zinco il cui tenore è compreso tra il 4% e il 9%.

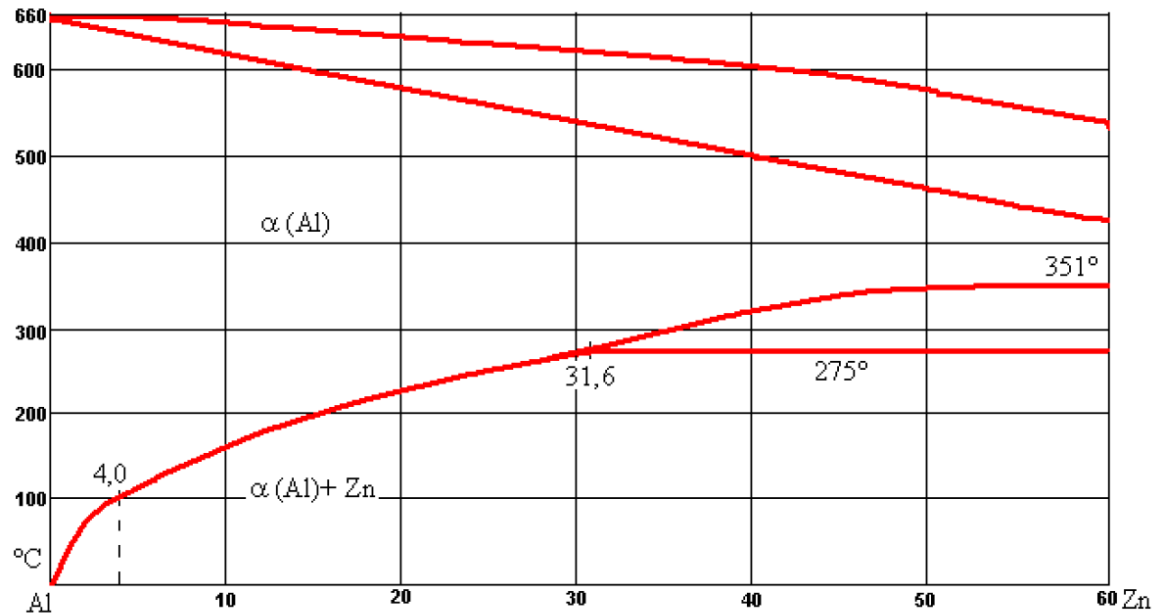


Grafico 7: Diagramma di stato della lega 7XXX. [6]

-Scarsa deformabilità a freddo.

-Ottime qualità meccaniche:

-Ru 450 ÷ 570 MPa (Carico di rottura)

-Rs 400 ÷ 500 MPa (Carico di snervamento)

2.5 Indurimento per precipitazione

Lo scopo degli elementi di lega, all'interno delle leghe d'alluminio, è quello di ottenere dei precipitati, che sono strutture estremamente dure ma fragili; se questi concentrati vengono distribuiti in maniera fine e uniforme riescono a influenzare il comportamento medio del materiale.

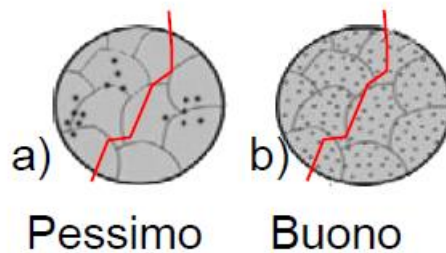


Figura 6: a) Precipitati ne fini ne uniformi b) Precipitati fini ed uniformi. [2]

Per ottenere un'architettura così complessa è necessario eseguire, sulla lega, dei processi termici ben presi.

Le leghe d'alluminio sono leghe bifasiche; nella fase α tutti gli elementi che sono presenti nella lega sono liberi e non combinati; nella fase β gli elementi sono invece combinati in forma d'intermetallici o precipitati; per ottenere questa fase è necessario raffreddare lentamente.

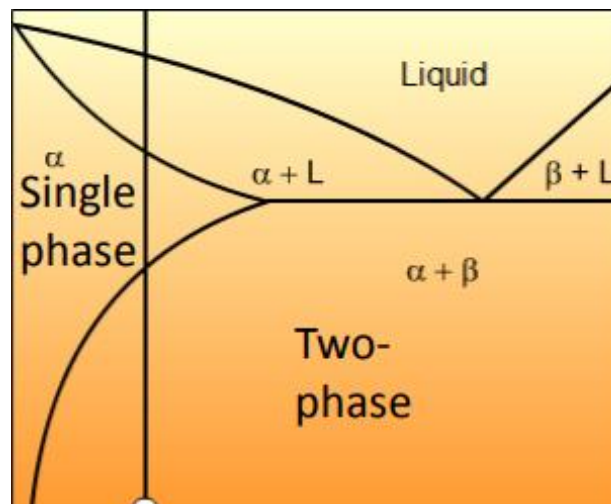


Grafico 8: Diagramma di stato di una genetica lega d'alluminio. [2]

Per ottenere precipitati fini e uniformi bisogna solubilizzare la lega, cioè fare in modo di ottenere solo fase α a temperatura ambiente; questa fase si chiama tempra di solubilizzazione ed è ottenibile raffreddando drasticamente il materiale.

La struttura di fase α a temperatura ambiente prende un nome ben specifico S.S.S.S. (Super Saturated Solid Solution).

Poi successivamente si applica un trattamento termico chiamato invecchiamento.

L'invecchiamento è un processo termico caratterizzato esclusivamente da due variabili: tempo e temperatura.

Lo scopo finale dell'invecchiamento è quello di ottenere precipitati fini e uniformi che migliorano in generale le caratteristiche meccaniche della lega, e per farlo si controlla la temperatura del forno, invecchiamento artificiale, oppure mantenendo la lega a temperatura ambiente, invecchiamento naturale.

Altro parametro estremamente importante, come citato precedentemente, è il tempo, il quale cambia a seconda della temperatura e delle dimensioni dei precipitati che si vogliono ottenere.

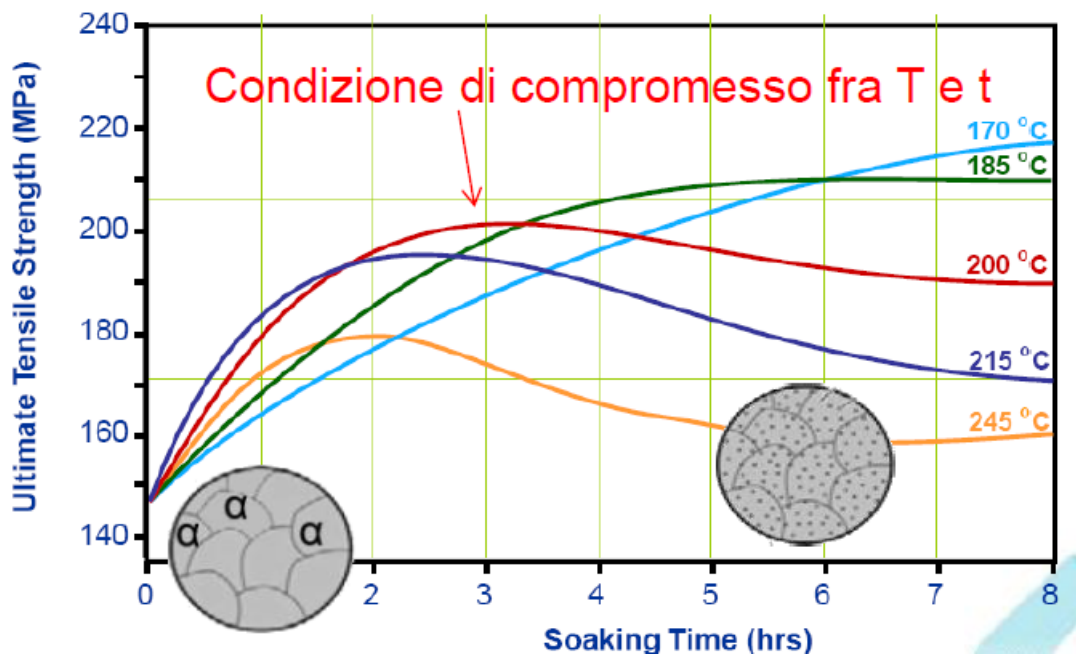


Grafico 9: Relazione tra tempo e temperatura in diverse curve d'invecchiamento. [2]

3. La saldatura laser

3.1 Introduzione

Questo capitolo tratterà nello specifico la saldatura autogena per fusione tramite una sorgente laser a fibra di vetro drogata con itterbio, passando dalla generalità delle sorgenti laser industriali alle generalità delle saldature questo per poter introdurre pregi e difetti delle tecnologie utilizzate; con lo scopo di trattare a fine capitolo tutte le problematiche legate alla saldabilità delle leghe di alluminio e nello specifico trattare tutte le problematiche che sono emerse nella realizzazione dei provini utilizzati nella prova di trazione per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche.

3.2 Generalità sul laser

La sorgente laser genera un fascio di radiazioni elettromagnetiche che hanno unica frequenza e fase e con divergenza limitata ciò significa che la radiazione si propaga in modo focalizzato e diretto verso un obiettivo specifico.

L'energia delle onde elettromagnetiche è trasportata e ripartita in maniera simmetrica tra un campo elettrico e uno magnetico i quali vengono generalmente rappresentati rispettivamente tramite un vettore E e B i quali $\forall t$ risultano ortogonali tra loro; allora il loro prodotto scalare standard risulta pari a zero:

$$E * B = 0$$

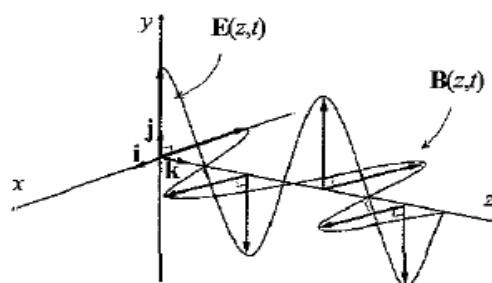


Figura 7: Generica onda elettromagnetica. [7]

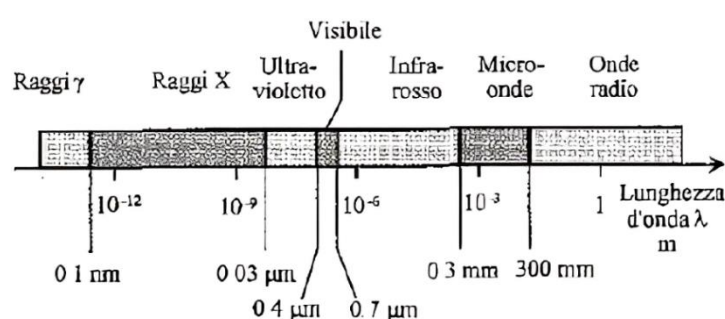


Figura 8: Spettro delle radiazioni elettromagnetiche. [7]

Le sorgenti utilizzate tipicamente nel campo industriale ricadono nella lunghezza d'onda dell'infrarosso, pertanto, il laser non risulterà visibile.

La velocità di propagazione delle onde è indipendente dalla lunghezza di quest'ultima tale che è definita come:

$$v = \lambda f$$

Dove f è la frequenza ($f = 1/\tau$ dove τ è il periodo dell'onda elettromagnetica).

3.3 Interazione laser materia

Il principale fenomeno che nel campo industriale lega la materia con la radiazione elettromagnetica è indubbiamente l'assorbimento delle onde infrarosse; l'entità di questo fenomeno dipende dalle proprietà del materiale in esame e dalle caratteristiche della radiazione elettromagnetica.

L'assorbimento è la capacità, di un materiale, di assorbire una radiazione elettromagnetica; l'intensità d'assorbimento è descrivibile dalla legge di Lambert-Beer:

$$I(z) = I_0 * e^{-K\lambda z}$$

Dove $I(z)$ rappresenta l'intensità a una quota generica z mentre I_0 è l'intensità della superficie, $K\lambda$ è il coefficiente di assorbimento il quale dipende dal materiale e dalla lunghezza d'onde.

Definendo T come la trasmittanza il rapporto tra $I(z)/I_0$ allora possiamo definire l'assorbimento come:

$$A = -\ln(T)$$

Possiamo così ottenere la formula precedentemente citata semplificata in:

$$A = K\lambda z$$

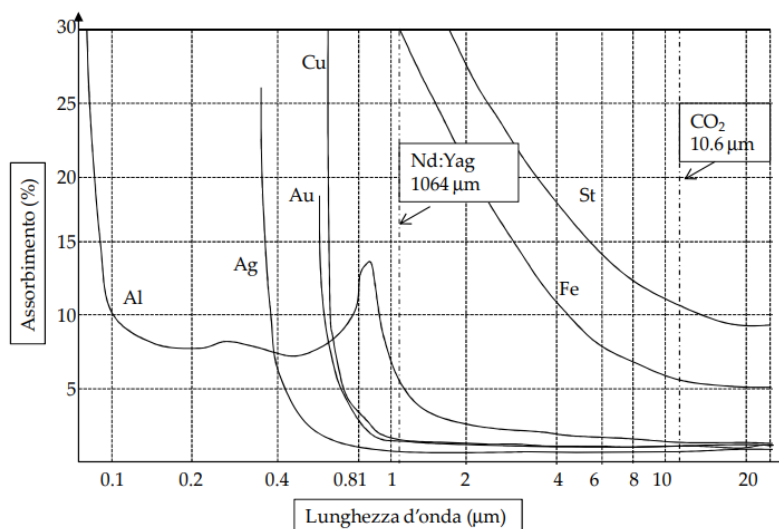


Grafico 10: Variazione dell'assorbimento in funzione della variazione della lunghezza d'onda. [7]

Possiamo notare dal grafico soprastante che minore è la lunghezza d'onda maggiore è l'assorbimento; le principali caratteristiche fisiche che influenzano l'assorbimento sono la finitura superficiale e la tempera.

3.4 Elementi caratteristici di una applicazione laser industriale

La sorgente laser costituisce il nucleo del sistema, responsabile di generare il fascio con le caratteristiche desiderate; molti fattori legati al fascio influenzano il processo di lavorazione tra questi, la potenza, la lunghezza d'onda della radiazione, il tipo di emissione (continua o impulsata) e la distribuzione di densità di potenza.

Dal punto di vista energetico, le sorgenti laser sono dispositivi caratterizzati da un'efficienza limitata pertanto è consuetudine accompagnare la sorgente con un'unità di raffreddamento in grado di dissipare il calore prodotto durante la generazione del fascio.

Una volta generato, il fascio viene guidato verso la zona di lavorazione attraverso un sistema di trasporto dedicato.

Per deviare il fascio e controllarne la direzione, vengono utilizzati specchi in rame opportunamente orientati; in alternativa, se la lunghezza d'onda della radiazione laser lo permette, è possibile impiegare una fibra ottica per il trasporto.

Attraverso il sistema di focalizzazione, il fascio laser viene concentrato in prossimità del pezzo da lavorare; la lavorazione laser sfrutta l'elevato flusso termico che il fascio può trasferire al pezzo; un flusso maggiore si traduce in una maggiore efficienza della lavorazione; poiché la potenza viene determinata al momento della generazione del fascio, per aumentare il flusso termico che raggiunge il pezzo è necessario restringere la sezione trasversale del fascio.

Spesso, nelle applicazioni laser, è presente anche un sistema di movimentazione che permette di generare un movimento relativo tra il fascio e il pezzo da lavorare.

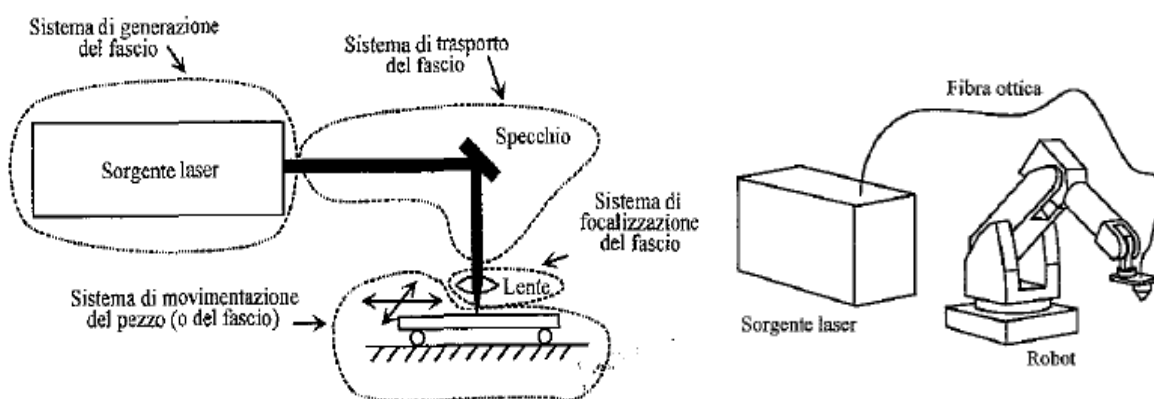


Figura 9: Schema generico di una sorgente laser con movimentazione tramite robot antropomorfo. [7]

3.5 Sorgente laser Yb: vetro in fibra

Nelle sorgenti laser a fibra di vetro, il mezzo attivo è il "core" di una normale fibra ottica che viene drogato con ioni itterbio (Yb), mentre il rivestimento esterno è simile a quello di una normale fibra di vetro. La fibra così ottenuta viene "pompa" utilizzando la radiazione emessa da una serie di diodi, inviata nel rivestimento esterno della fibra che avvolge il "core".

Questo processo fa sì che la radiazione "di pompa" attraversi più volte il mezzo attivo, stimolando l'emissione di un fascio laser ad alta potenza.

Laddove nelle sorgenti tradizionali gli specchi sono utilizzati per creare la cavità risonante, nelle sorgenti in fibra vengono impiegati due reticoli di Bragg incisi nella fibra per svolgere la stessa funzione.

Un grande vantaggio delle sorgenti laser a fibra è la loro compattezza e facilità di raffreddamento tramite convezione con l'aria.

Tuttavia, esiste un limite superiore alla potenza massima generabile, di circa qualche centinaio di watt (tipicamente 300 W).

Per superare il limite di potenza, è possibile utilizzare più moduli in parallelo e sommare le potenze dei singoli moduli; questo permette di raggiungere potenze anche molto elevate, fino a circa 10 kW, ma al crescere del numero dei moduli, la qualità del fascio può peggiorare.

La caratteristica più interessante da un punto di vista applicativo è che il fascio generato possiede una distribuzione di potenza gaussiana, garantendo comunque una qualità elevata.

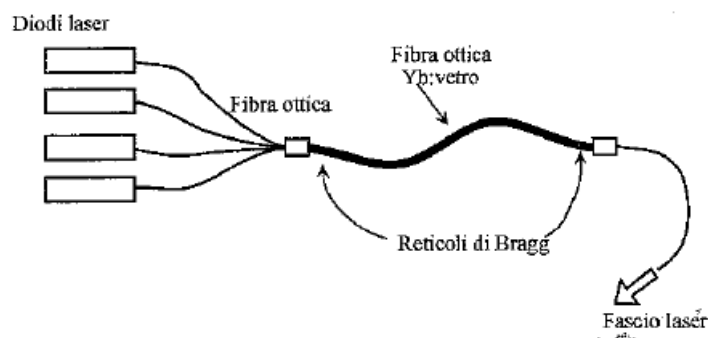


Figura 10: Schema sorgente Yb: vetro in fibra. [7]

3.6 Generalità sulla saldatura

La saldatura è un processo di giunzione permanente di componenti solidi con continuità microstrutturale; i materiali coinvolti nel processo di saldatura sono il materiale base cioè il materiale da vincolare tramite saldatura, e il materiale d'apporto che non sempre è presente soprattutto quando si parla di saldatura di pochi mm e se presente viene aggiunto esternamente sotto forma di bacchette, anelli o placche.

Possiamo classificare i processi di saldatura in:

- Saldature autogene dove il materiale base raggiunge sempre la temperatura di fusione; questa categoria può essere ulteriormente suddivisa in:
 - Saldature autogene per fusione.
 - Saldature autogene per pressione.
- Saldature eterogene dove il materiale non raggiunge mai la temperatura di fusione.
- Saldature allo stato solido dove la saldatura avviene tramite rimescolamento plastico del materiale base.

Il risultato del processo di saldatura è il cordone di saldatura dove i parametri dimensionali caratteristici sono:

- Penetrazione P : indica l'altezza della saldatura può essere a penetrazione totale cioè pari allo spessore del materiale base oppure a penetrazione parziale inferiore allo spessore del materiale.
- Larghezza L
- Sormonto S
- Sovra penetrazione s : che può essere presente a seconda della profondità P di saldatura.
- Larghezza alla base del sormonto l .
- Sottopenetrazione s

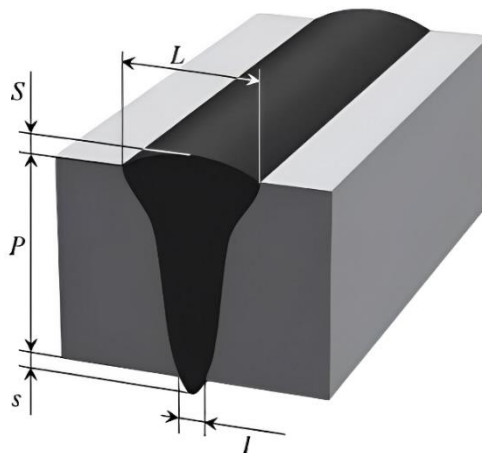


Figura 11: Cordone di saldatura. [8]

3.7 Difettologie delle saldature

3.7.1 Ruolo della temperatura nella formazione dei giunti

Il processo di saldatura comporta un rapido riscaldamento e poi successivamente un altrettanto rapido raffreddamento e ciò inevitabilmente comporta modifiche microstrutturali degli elementi da giuntare.

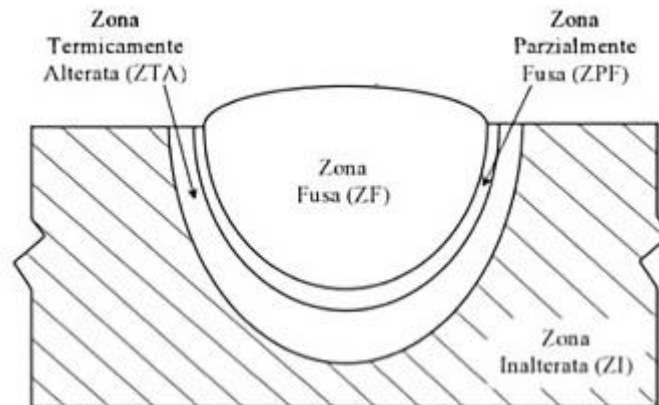


Figura 12: Sezione trasversale di un cordone di saldatura. [8]

Come possiamo notare dalla figura numero 12 si possono distinguere quattro zone, le quali possiedono caratteristiche e proprietà meccaniche estremamente diverse:

- Zona Fusa (ZF): il materiale, durante il processo di saldatura, raggiunge la temperatura di fusione prendendo il nome caratteristico di bagno di fusione. La fase liquida sarà circoscritta dal materiale solido non liquefatto del materiale base che compongono il giunto; la solidificazione della pozza porta ad avere in quest'area una struttura di tipo dendritico.

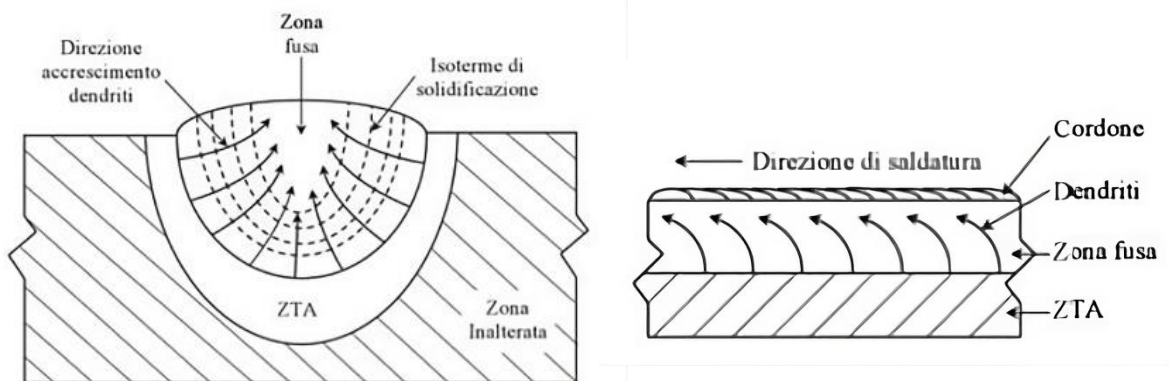


Figura 13: Direzione accrescimento strutture dendritiche rispettivamente in sezione trasversale e parallela alla saldatura. [8]

Il bagno di fusione presenta una disomogeneità metallurgica elevata causata da:

- Micro e Macro segregazione tipica delle strutture dendritiche, le quali comportano una mancata diffusione degli elementi leganti a causa di una velocità di raffreddamento troppo elevata.
- Impurezze e sporco: che nuovamente per via di una rapida solidificazione, da parte del materiale base, non riescono ad arrivare in superficie per essere eliminate.
- Presenza di bolle: che rimangono intrappolate nel bagno fuso.

Tutte queste difettologie all'interno della zona fusa fanno sì che le caratteristiche meccaniche del cordone di saldature siano estremamente inferiori rispetto al materiale base.

- Zona Parzialmente Fusa (ZPF): in quest'area la temperatura è compresa tra quella di liquido e solido; gli elementi che passano in fase liquida sono impurezze, ossidi e inclusioni pregiudicando così nuovamente in maniera importante le caratteristiche meccaniche del giunto.
- Zona Termicamente Alterata (ZTA): non si arriva mai alla temperatura di liquido; comunque, la temperatura risulta elevata tale da andare a modificare leggermente le proprietà meccaniche del materiale base.
- Zona Inalterata (ZI): non si raggiunge nessuna temperatura critica e le proprietà meccaniche del materiale base non vengono alterate.

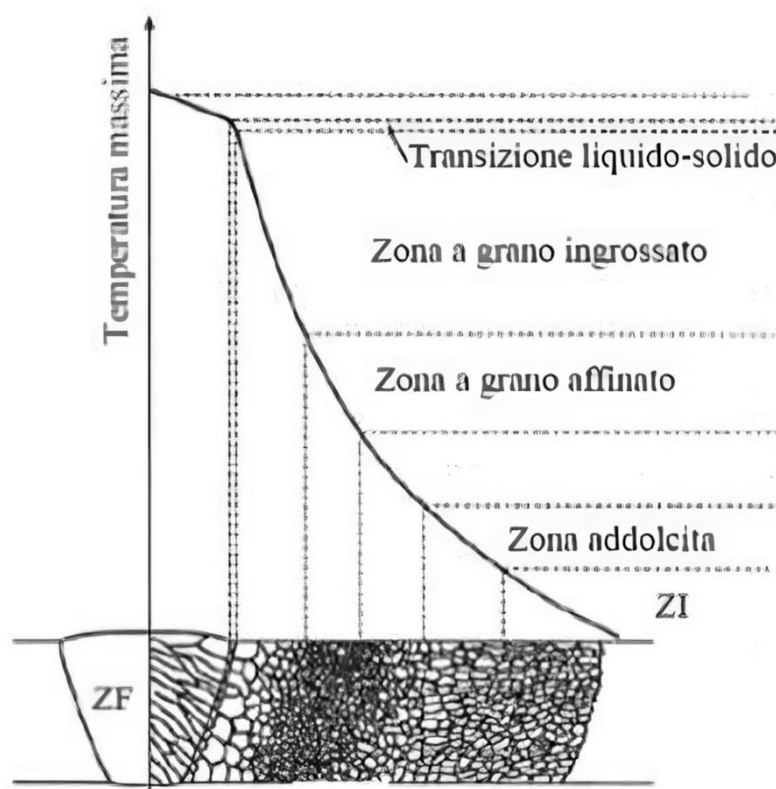


Figura 14: Trasformazioni metallografiche che il materiale subisce dopo il processo di saldatura. [8]

3.7.2 Tensioni e deformazioni in saldatura

A causa delle dilatazioni termiche a cui sono sottoposti i materiali, all'interno dei componenti saldati nascono forti stati tensionali.

Supponendo di semplificare il cordone di saldatura in una sua parte microscopica possiamo pensarlo come una bielletta incastrata a entrambe le estremità; poi successivamente di sottoporla a un ciclo termico che comprende un rapido riscaldamento e un altrettanto rapido raffreddamento come accade durante il processo di saldatura.

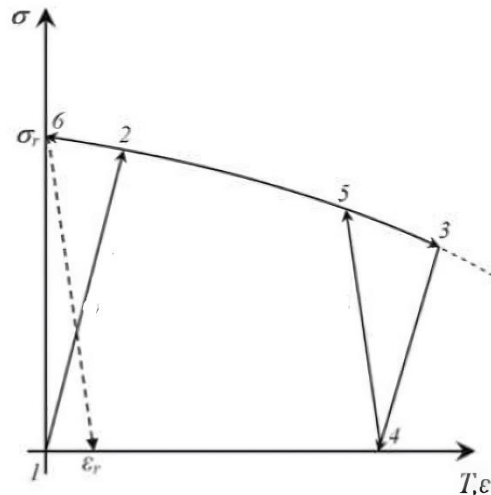


Grafico 11: Valutazione qualitativa delle tensioni all'interno del cordone di saldatura. [8]

Facendo riferimento al grafico 11 analizziamo lo sviluppo dello stato tensionale all'interno della bielletta:

- Tratto 1-2: compressione dovuta alla dilatazione termica della bielletta a causa dell'aumento di temperatura e allo stato di vincolo a cui il componente è assoggettato.
- Punto 2: raggiungimento del limite elastico e successivo passaggio in campo plastico.
- Tratto 2-3: deformazione plastica.
- Punto 3: fine somministrazione di calore, pertanto, si avrà anche la fine della deformazione plastica.
- Tratto 3-4: raffreddamento della bielletta che avviene in campo elastico.
- Punto 4: le tensioni sono pari a zero ($\sigma = 0$) ma la temperatura è diversa da zero ($T \neq 0$).
- Tratto 4-5: nuovo stato tensione di trazione opposto a quello nel tratto 1-2 che era di compressione, questo dovuto alla continuazione del raffreddamento della bielletta.
- Punto 5: raggiungimento nuovamente del campo elastico.

- Tratto 5-6: deformazione plastica.
- Punto 6: fine della deformazione in quanto la temperatura è uguale a zero ($T = 0$); presenza di tensioni residue.

Definendo la deformazione termica subita dall' i -esima sezione trasversale del cordone di saldatura come ΔL_i , e se indichiamo con ΔT come la differenza di temperatura a cui la sezione è sottoposta, α costante di proporzionalità termica lineare (che per l'alluminio vale $0.24 \cdot 10^{-6} \text{ m}/^\circ\text{C}$), mentre il valore della lunghezza iniziale della i -esima sezione è indicata da L_{oi} si avrà che:

$$\Delta L_i = \alpha * \Delta T * L_{oi}$$

Prendendo così un generico cordone di saldatura possiamo istantaneamente notare (come si vede in immagine 11) che in superficie il cordone ha una larghezza L maggiore che in profondità e ciò comporta, avendo definito la dilatazione termica proporzionale alla lunghezza di partenza, che la sezione superficiale avrà una maggiore dilatazione rispetto agli elementi in profondità.

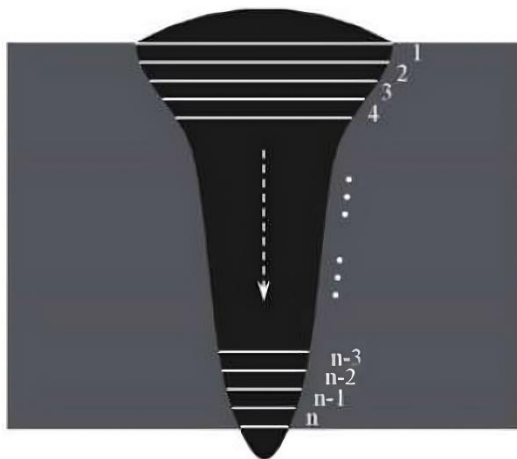


Figura 15: Sezione trasversale di un generico cordone di saldatura. [8]

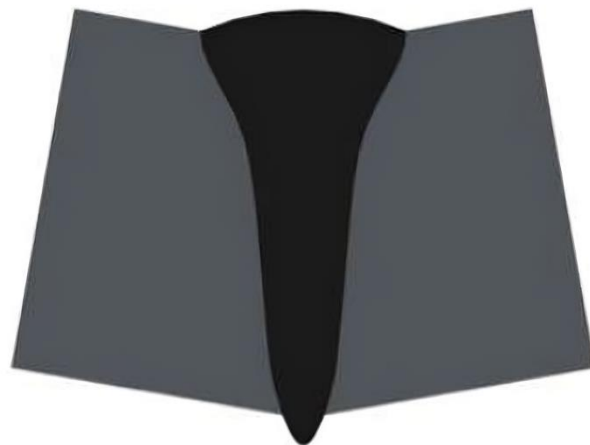
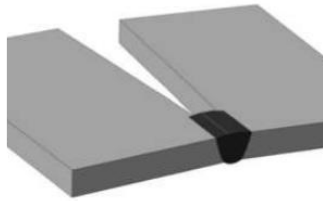


Figura 16: Ritiro qualitativo a causa delle tensioni residue all' interno del cordone di saldatura. [8]

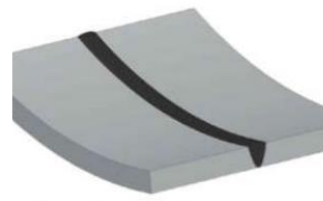
Come già citato in precedenza all'interno del cordone si genera un forte stato tensionale che causano una delle tipiche difettologie delle saldature; i ritiri di saldatura.

Questi oltre che dal ciclo termico a cui il giunto è sottoposto dipendono anche dalla presenza di ulteriori tensioni già all'interno dei componenti.

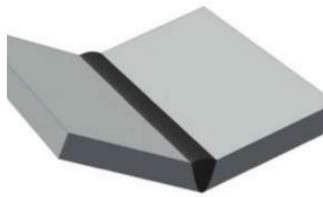
Questi ritiri possono presentarsi in diverse forme come illustrando dalle seguenti immagini:



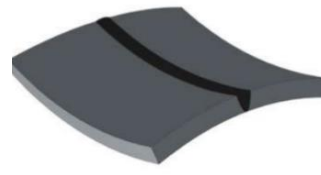
[a]



[c]



[b]



[d]

- Ritiri trasversali: si esprime in direzione trasversale al cordone [a]
- Ritiri angolari: [b]
- Ritiri longitudinali: si esprime in direzione parallela al cordone [c]
- Ritiri combinati: combinazione di più di un ritiro [d]

3.7.3 Cricche a caldo e a freddo

Durante la fase di solidificazione del processo di saldatura si possono ottenere tensioni estremamente elevate tali da rompere i legami intergranitici che si erano appena creati; questa difettologia viene detta cricca a caldo visto che si forma quando la temperatura del cordone è ancora elevata.

Le cricche a freddo differiscono da quelle a caldo per il fatto che non avvengono ad alta temperatura ma bensì a basse temperature, tipicamente tra i 100÷150 °C, e sono più ostiche rispetto alle precedenti perché si possono presentare fino a 48 ore dopo l'esecuzione del cordone; invece, il principio di formazione è il medesimo; a causa dell'elevato stato tensionale i legami tra i grani si rompono.

Quest'ultimo tipo di cricca risulta estremamente influenzata dal legame che la materia ha con gli ioni dell'idrogeno (H^+).

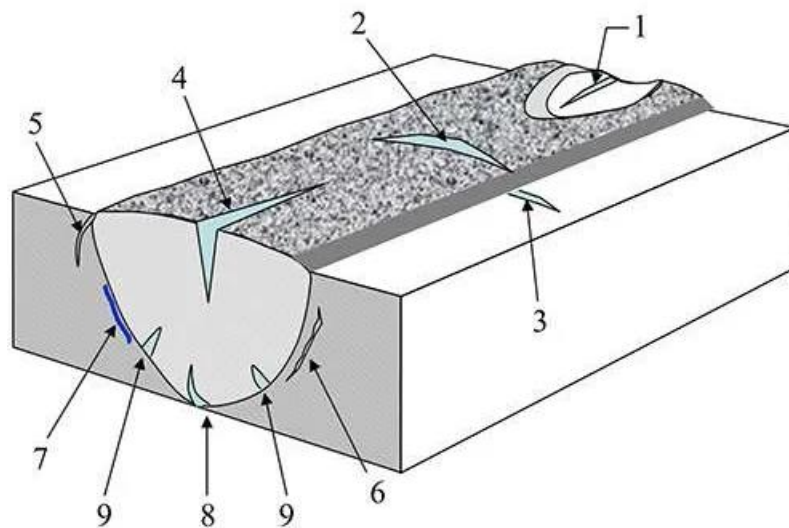


Figura 17: Rappresentazione delle possibili disposizioni delle cricche. [9]

Facendo riferimento all'immagine:

1. Cricca di cratere nel cordone di saldatura.
2. Cricca trasversale nel cordone di saldatura.
3. Cricca trasversale nella ZTA.
4. Cricca longitudinale nel cordone di saldatura.
5. Cricca nel metallo base al margine del cordone di saldatura.
6. Cricca nella ZTA verso il metallo base.
7. Cricca sotto cordone o sulla linea di fusione.
8. Cricca alla radice del cordone di saldatura.
9. Cricche al bordo nel cordone di saldatura.

3.7.4 Altre difettologie

Altre difettologie che possono presentarsi nei processi di saldatura sono:

- Porosità: sono bolle di gas o impurezze che non sono riuscite a uscire dal bagno di fusione a causa di una velocità di raffreddamento troppo elevata.
- Fusione incompleta: è la mancata fusione del materiale base o del materiale d'apporto; se presente la sezione di tenuta della saldatura sarà inferiore a quella progettata.
- Penetrazione incompleta: quando la sorgente della saldatura è troppo poco potente e non riesce a penetrare per l'intero spessore richiesto dal progetto.
- Incisione marginale: sono delle incisioni che si presentano all' interfaccia tra cordone e materiale base e compromettono seriamente le caratteristiche meccaniche del giunto.

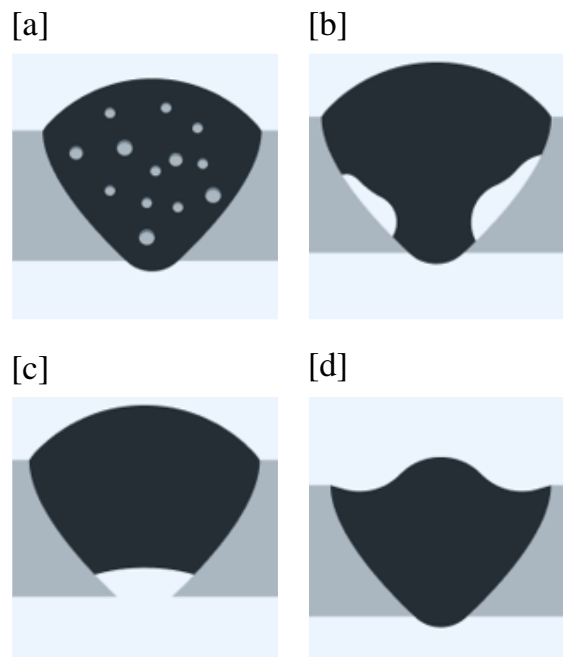


Figura 18: [a] Porosità; [b] Fusione incompleta; [c] Penetrazione incompleta; [d] Incisione marginale. [10]

3.8 Problematiche legate alla saldabilità di componenti in alluminio tramite sorgente laser a fibra.

Partendo da un'analisi più generale possibili possiamo individuare come una delle più grandi problematiche dell'alluminio, come materiale saldabile, le sue caratteristiche fisiche; più nello specifico per il suo coefficiente di assorbimento che risulta particolarmente basso; e per avere un'elevata conduttività termica; tutto ciò non rende l'alluminio un materiale particolarmente saldabile con tutte le sorgenti disponibili in commercio.

Ecco perché per sviluppare i provini della prova si è utilizzata una sorgente laser a fibra, la quale riesce a generare un'elevata potenza specifica per ottenere la fusione del materiale.

Tuttavia, è possibile migliorare la saldabilità dell'alluminio anodizzandolo, visto che il leggero strato di ossido migliora la caratteristica di assorbimento, ma la presenza di ossido può causare una maggiore formazione di porosità all'interno del cordone stesso.

Altra peculiarità dell'alluminio è la sua eccessiva fluidità, la quale comporta inevitabilmente problematiche di drop-out.

Passando a un'analisi più specifica problematiche come fusione e penetrazione incompleta non si sono presentati all'interno dei cordoni dei vari provini per via dell'elevata potenza specifica del laser.

Per quanto riguarda le porosità all'interno del cordone si è notato che a seconda di diversi apporti energetici, più o meno utilizzo del materiale d'apporto oppure utilizzando tecniche di saldature particolari come il wobbling (la quale consiste nel ripetere figure geometriche come cerchi, infiniti e linee ad alta frequenza) una più o meno elevata presenza di porosità.

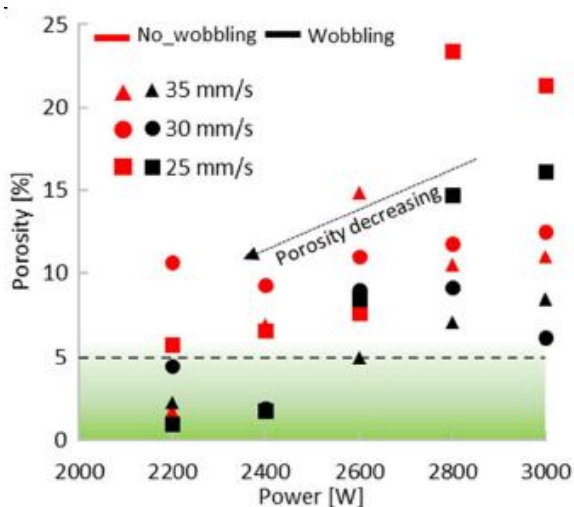


Grafico 12: Relazione tra apporto energetico, filo d'apporto e porosità all'interno del cordone. [12]

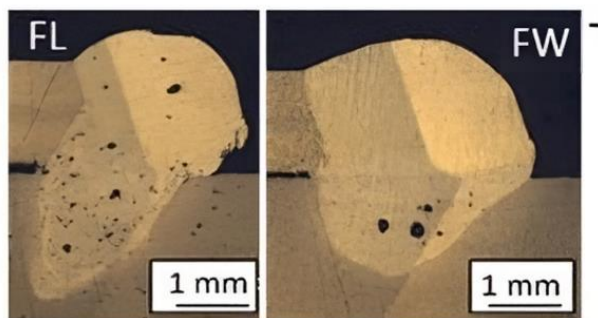


Figura 19: A sinistra saldatura lineare con filo d'apporto; a destra saldatura con tecnica wobbling e filo d'apporto. [12]

Come si può notare dal grafico numero 12, nelle saldature in cui si utilizza il materiale d'apporto, è presente una correlazione tra la diminuzione di apporto energetico e la minor formazione di porosità all'interno del cordone; la situazione migliora notevolmente quando si passa dalla tecnica di saldatura classica lineare a quella di tipo wobbling.

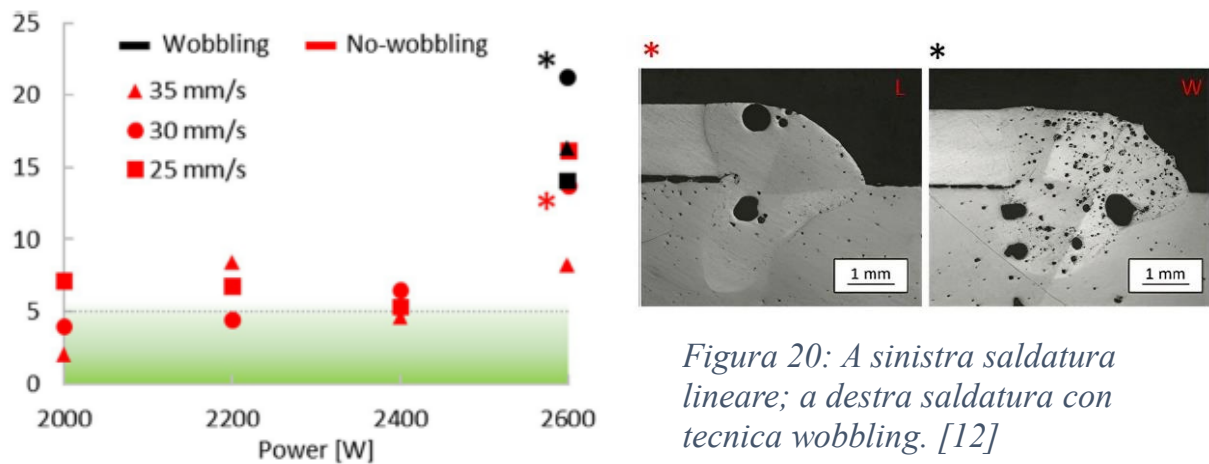


Grafico 13: Relazione tra apporto energetico e porosità all'interno del cordone. [12]

Invece sono di tutt'altro avviso i risultati che si ottengono tramite la saldatura senza materiale d'apporto; infatti, possiamo notare nel grafico numero 13 l'inversione del fenomeno della formazione delle porosità che risulta estremamente maggiore nelle saldature che avvengono tramite wobbling; questo molto probabilmente è dovuto al fatto che la tecnica wobbling incorpora più gas all'interno del bagno di fusione e che quest'ultimi non riesca a fuoriuscire in tempo.

Invece per quanto riguarda le modifiche microstrutturali che i provi hanno subito:

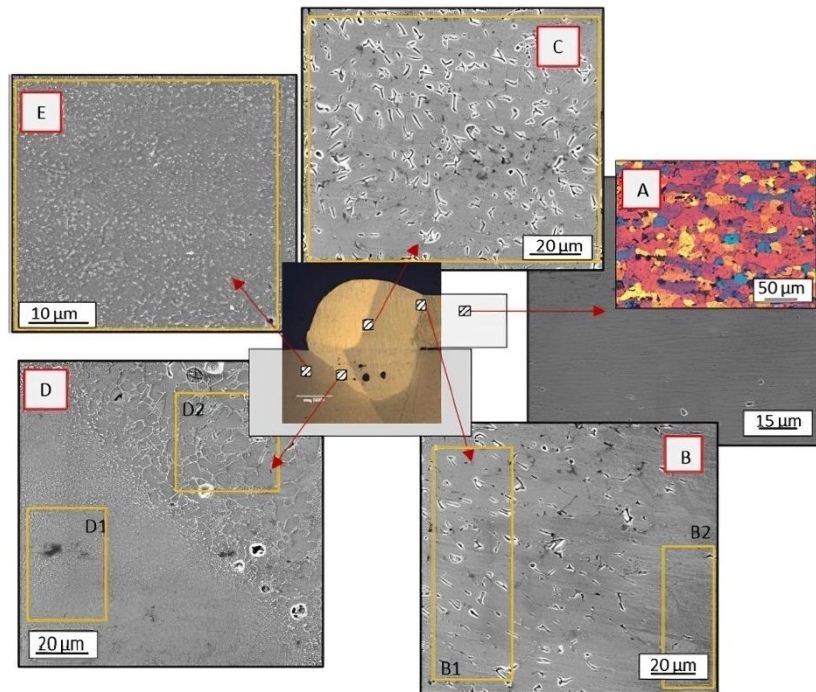


Figura 21: Micrografia FEG-SEM che mostra la microstruttura di un provino saldato con tecnica wobbling e materiale d'apporto. [12].

Rifacendoci all'immagine 21: partendo dalla descrizione delle zone termicamente inalterate (ZI) le quali sono rappresentate dall'immagine (A) per quanto riguarda la lastra in 6082 laminata a caldo si può notare una deformazione dei grani nella direzione della laminazione conseguenza della precedente lavorazione e non si nota nessuna variazione strutturale dovuta all'apporto termico della saldatura; mentre nell'immagine (E) che rappresenta la microstruttura della placchetta stampata in 3D in AlSi10Mg mostra le particelle di Si finemente ed equamente distribuiti nella matrice α -Al.

Passando alle zone termicamente alterate (ZTA) per quanto riguarda la lamina di 6082 facciamo riferimento all'immagine (B) possiamo notare rami di silicio circondati da alluminio; mentre per quanto riguarda la zona d'interconnessione tra la placca di AlSi10Mg e il cordone si può notare un ingrossamento del reticolo eutettico di Si.

Per quanto riguarda il centro del cordone vero e proprio, cioè nella zona fusa (ZF): (C) possiamo notare una struttura simile a quella proposta in (B) ma con precipitati di Si estremamente più grandi.

4. La prova di trazione

4.1 Introduzione

In questo capitolo si introdurrà la teoria alla base della prova di trazione per poter comprendere l'analisi dei grafici generati dai provini saldati.

4.2 Cenni sulla prova di trazione

La prova di trazione fa parte della famiglia delle prove distruttive per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali.

Le prove vengono realizzate su delle presse che vengono classificate in base alla forza che riescono a generare.

La prova di trazione è una prova monoassiale, viene definita così visto che ogni elemento infinitesimo del provino verrà sollecitato in un'unica direzione.

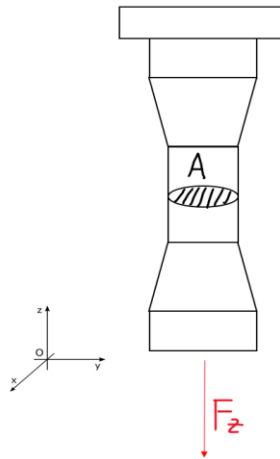


Figura 22: Rappresentazione di uno stato tensionale monoassiale

Facendo riferimento alla figura precedente definendo la tensione come:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A}$$

per definizione dello stato monoassiale avremo che le tensioni equivalenti saranno uguali alle tensioni in z in formule:

$$\sigma_{eq} = \sigma_z$$

questo perché prendendo la definizione di tensione equivalente secondo Von-Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

visto che $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ sono pari a zero inevitabilmente torna la dimostrazione tale per cui:

$$\sigma_{eq} = \sigma_z$$

4.3 Struttura della macchina per la prova di trazione

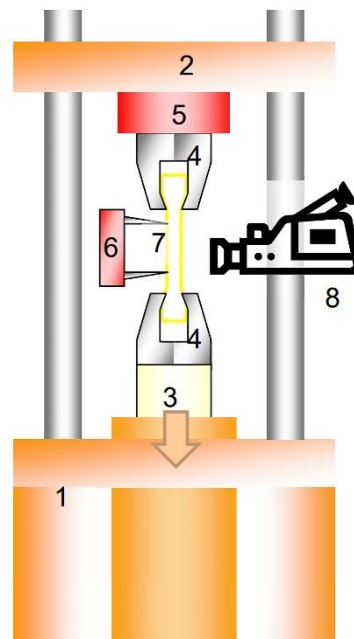


Figura 23: Macchina per la prova di trazione. [2]

Gli elementi caratteristici di una pressa per la prova di trazione, come si nota dall'immagine numero 23, sono:

- Basamento (1).
- Trave fissa (2).
- Pistone (3).
- Afferragli (4).
- Cella di cariche (5): è un componente elettronico impiegato per la misurazione delle forze applicate su un componente tramite la misura di un segnale elettronico che varia a causa delle deformazioni che il provino subisce.
- Estensimetro (6): rileva l'allungamento istante per istante, si disinserisce prima che il provino raggiunge la strizione per evitare danneggiamenti.
- Provino (7).
- Videocamera+Software (8): verifica istante per istante l'area effettiva del provino.

4.4 Forza, Carico, Tensione

La prova di trazione restituisce diversi grafici in funzione degli out-put desiderati; infatti, possiamo avere:

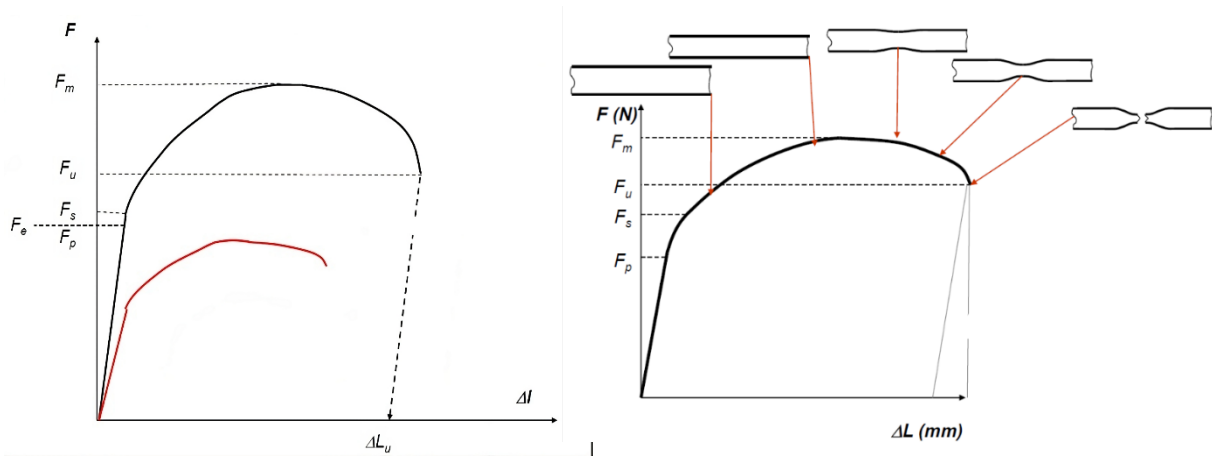


Grafico 14: Differenza di risultati di due provini con dimensioni diverse nel diagramma Forza/Spostamento. [2]

4.4.1 Diagramma Forza/Spostamento

I punti caratteristici di questo grafico sono indubbiamente i punti indicati da: F_s che rappresenta la fine del campo elastico e il passaggio in quello plastico; F_m che rappresenta il massimo della forza raggiunta e l'inizio della strizione, è una problematica caratteristica della prova di trazione e consiste nella diminuzione del diametro del provino; F_u che rappresenta il punto di rottura del provino.

Questi grafici non sono spesso utilizzati nel campo dell'ingegneria visto che non si riescono a confrontare i risultati di provini di dimensioni diversi, come accade nel grafico numero 14 dove il grafico rosso fa riferimento a un provino dello stesso materiale ma con dimensione nettamente inferiori a quelle del provino del grafico nero.

4.4.2 Diagramma Carico/Allungamento

Per ovviare alla problematica di non poter confrontare i risultati di provini di diametri diversi ma dello stesso materiale si sono introdotti le tensioni/deformazioni ingegneristiche o nominali, dove definiamo le prime come:

$$R = \frac{F}{A_0}$$

dove A₀ fa riferimento all'area iniziale del provino.

Mentre identifichiamo le deformazioni come:

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Dove L_0 è la lunghezza iniziale del tratto libero del provino mentre L è la lunghezza istantanea.

I grafici ottenibili sono di due tipi che dipendono dalle caratteristiche di snervamento del materiale più o meno evidenti; come si può notare dall'immagine numero 4:

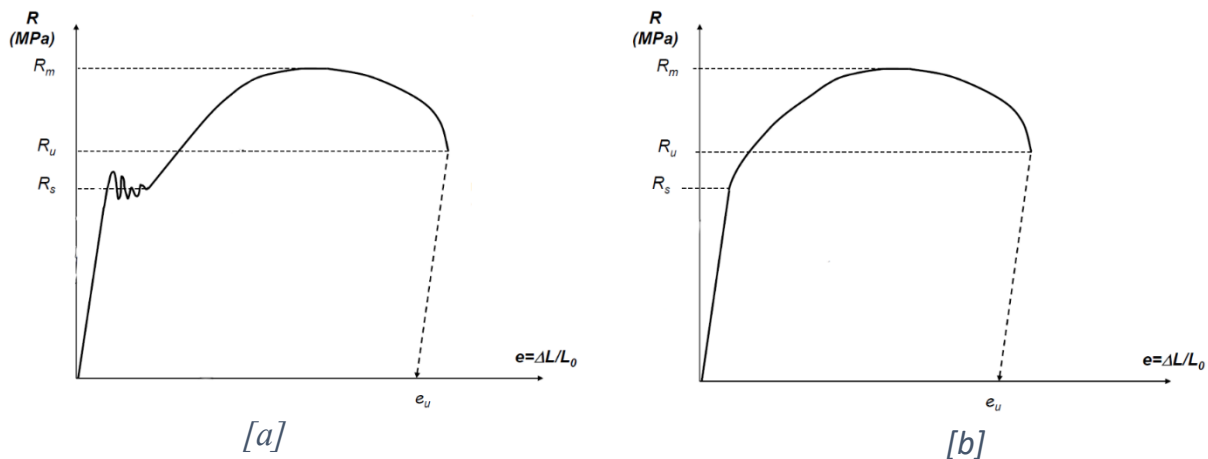


Grafico 15: [a] diagramma Carico/Allungamento di un materiale con snervamento evidente; [b] diagramma Carico/Allungamento di un materiale con snervamento non evidente. [2]

Nel primo caso [a] il materiale presenta uno snervamento particolarmente evidente e per identificare il passaggio a campo elastico a campo plastico per questo materiale si prende una media della variazione riscontrata nel grafico; mentre per quanto riguarda l'immagine [b] il passaggio dal campo elastico a quello plastico non è particolarmente evidente quindi per identificare lo snervamento si utilizza una normativa che identifica lo snervamento pari a una deformazione e pari allo 0.002 oppure 0.2%.

Anche in questi grafici come i precedenti dopo la formazione della strizione, che avviene nel massimo della prova, avremo un calo virtuale delle prestazioni questo è dovuto al fatto che R , il carico, è stato definito come F/A_0 ma dopo R_m con la strizione avremo un calo del diametro del provino che non viene conteggiato all'interno del calcolo di R e ciò comporta una diminuzione virtuale di R .

4.4.3 Diagramma Tensione/Deformazioni

Per eliminare la problematica legata al calo virtuale delle prestazioni dovute alla strizione si sono introdotte le prove di trazione reali o vere le quali definiscono la tensione σ come:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dove con A identifica l'area istante per istante del provino, questo è possibile solamente tramite una videocamera e software di riconoscimento delle immagini.

Mentre le deformazioni ε sono definite come:

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0}$$

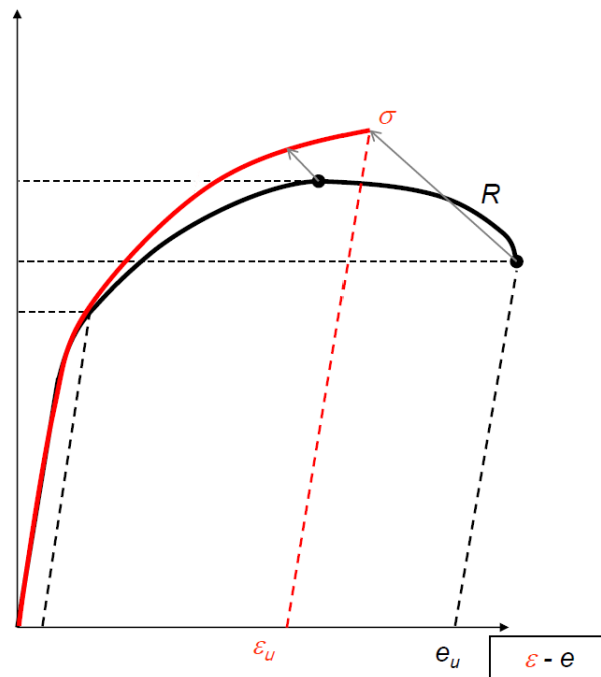


Grafico 16: confronto tra grafici di Tensione/Deformazione e Carico/Allungamento. [2]

Come si può notare dalla figura qui sopra il grafico in rosso che rappresenta Tensioni/Deformazioni dopo il raggiungimento della strizione continua ad aumentare cosa che in vece non accade nel grafico nero che rappresenta una prova di trazione Carico/Allungamento.

4.5 Confronto tra i vari grafici esistenti in letteratura e l'utilizzo di diversi sistemi di raccolta dati

In questo sottocapitolo si vuole confrontare le differenze tra i vari grafici precedentemente citati e l'utilizzo di diversi sistemi di acquisizione dati come il trasduttore di posizione, estensimetro, videocamera.

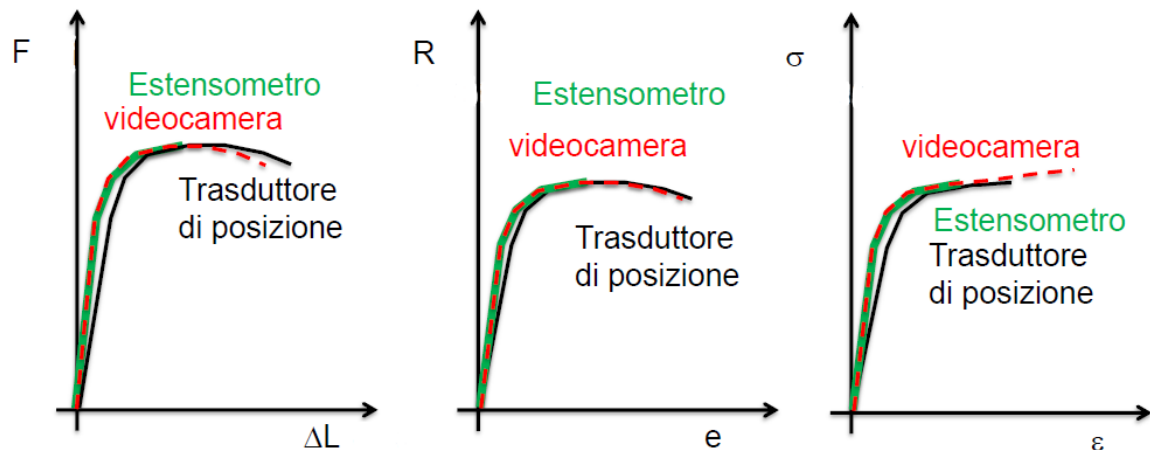


Grafico 17: Confronto tra i vari sistemi di acquisizione dati nella prova di trazione. [2]

Come si può notare le differenze nell'acquisizione di dati sono molteplici, partendo dal trasduttore di posizione questo sistema risulta il più inaccurato dei tre in quanto non riesce con efficacia a determinare l'inclinazione del campo elastico, essendo quest'ultimo legato alla determinazione del modulo elastico del materiale comporterà inevitabili errori sull'identificazione di quest'ultimo; mentre con videocamera ed estensimetro non abbiamo questa tipologia d'errore ma la principale differenza consiste nel fatto che l'estensimetro si disarma dalla prova poco prima dell'arrivo della strizione per evitare un danneggiamento mentre la videocamera no e questo ci permette di mappare con efficacia il campo plastico.

4.6 Differenza tra i grafici di materiali duttili e fragili e il fenomeno dell'incrudimento

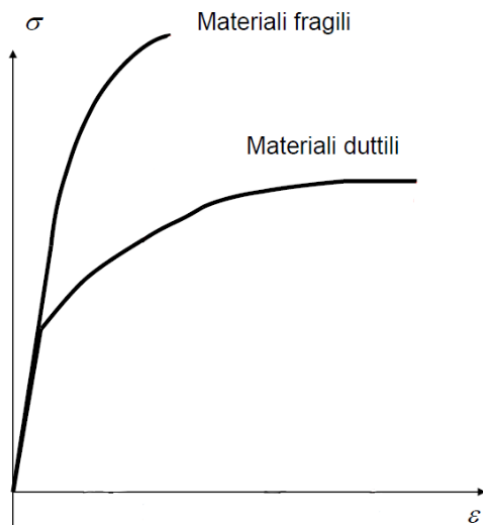


Grafico 18: Differenza tra un materiale duttile ed uno fragile sul grafico Tensioni/Deformazioni [2]

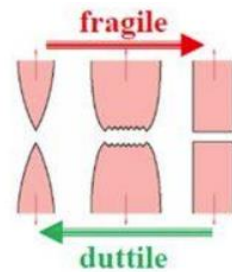


Figura 24: Differenza tra la rottura di provini fragile e duttili. [11]

Le principali differenze tra i materiali duttili e fragili, oltre al profilo di rottura del provino come si nota dall'immagine numero 24, sono il campo elastico e la deformazione possibile.

Infatti, per un materiale fragile avremo un campo elastico molto elevato e di conseguenza un valore della sigma di snervamento elevata ma la deformazione ultima sarà particolarmente limitata.

Mentre per quanto riguarda i materiali duttili la situazione si ribalta visto che in generale possiedono deformazioni ultime elevate ma basso valore della sigma di snervamento, e di conseguenza campo elastico basso.

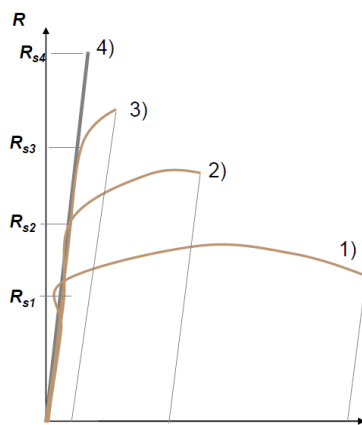


Grafico 19: Stesso provino ma con incrudimenti diversi.

Il fenomeno dell'incrudimento consiste in un aumento del carico di snervamento a discapito di una minor deformazione finale.

Il materiale risulta incrudito quando dopo aver subito una deformazione plastica, che non lo ha portato a rottura; il provino viene poi disteso; la condizione di incrudimento massimo, che nel grafico corrisponde alla curva (4), avrà solamente campo elastico e a ciò corrisponderà la condizione di snervamento massimo ma inevitabilmente avrà la minor deformazione possibile tale che una volta in campo plastico il provino si romperà istantaneamente.

4.7 Influenza nella variazione delle condizioni al contorno nei grafici della prova di trazione

4.7.1 Temperatura

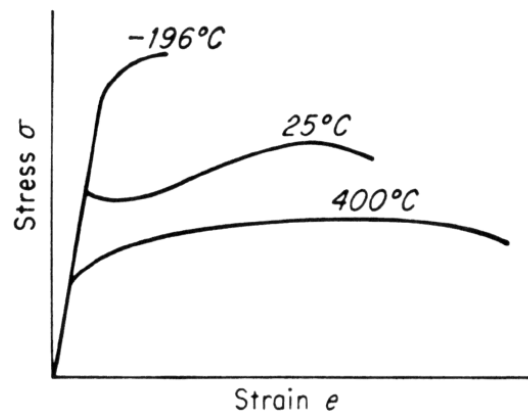


Grafico 20: Influenza della temperatura sul grafico Tensione/Deformazioni. [2]

Come si può osservare dal grafico qui sopra all'aumentare della temperatura il materiale risulta sempre più duttile mentre quando diminuisce il materiale si comporta come un materiale fragile.

4.7.2 Velocità

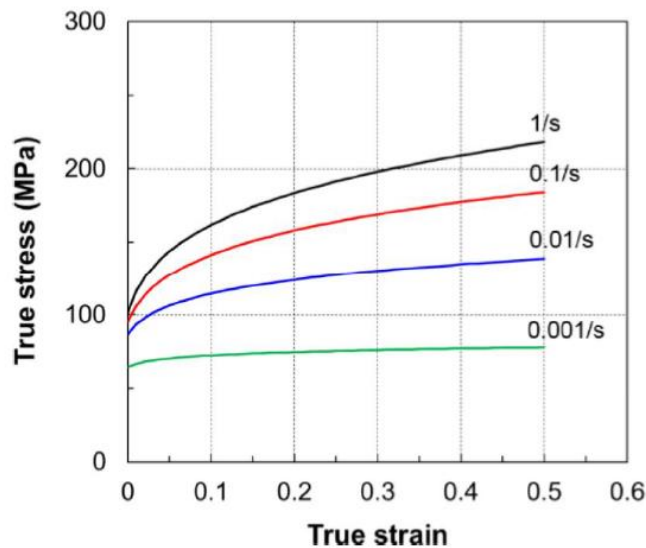


Grafico 21: Influenza della velocità sul grafico Tensioni/Deformazioni [2]

Come si può osservare dal grafico qui sopra all'aumentare della temperatura il materiale risulta sempre più duttile mentre quando diminuisce il materiale si comporta come un materiale fragile.

4.8 Le leghe d'alluminio e la prova di trazione

Essendo l'alluminio un materiale particolarmente duttile sarà caratterizzato da una deformazione elevata ma da un campo elastico limitato; come si può osservare nella figura sottostante.

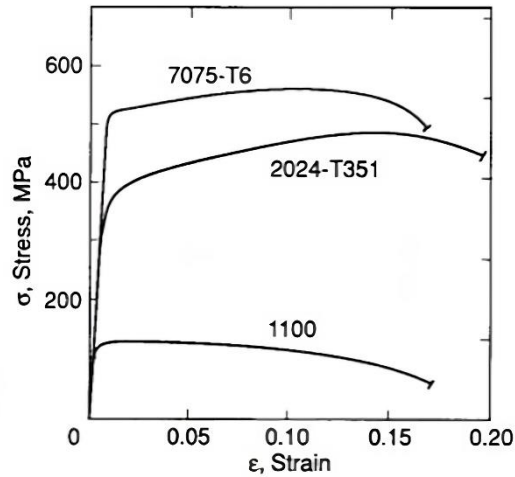


Grafico 22: Risultati della prova di trazione su diverse leghe d'alluminio. [2]

Come si può notare le differenze tra le varie leghe d'alluminio sono sostanziali; nelle leghe 1XXX, che sono quelle con la maggior quantità di alluminio tali da paragonarlo all'alluminio puro, hanno campo plastico elevato ma snervamento molto basso.

Mentre le leghe, come quelle 2XXX e 7XXX, presentano un miglioramento notevole nel campo elastico quindi inevitabilmente un aumento dello snervamento.

5. Metodi sperimentali utilizzati per l'analisi dei dati

5.1 Confronto tra la pressofusione e la stampa 3D SLS

5.1.1 Introduzione

In questo capitolo si vogliono introdurre le basi della stampante 3D tramite processo SLS e sulla pressofusione per poter elencare i parallelismi tecnologici che esistono tra le due tecnologie.

5.1.2 Cenni sulla stampa SLS

Conosciuta come Selected Laser Sintering (SLS) si basa sulla fusione di layer di polvere mediante un fascio laser.

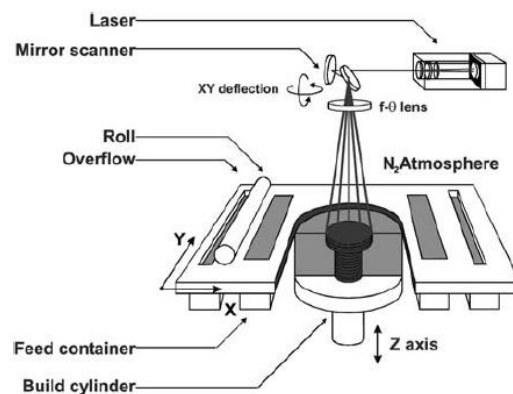


Figura 25: Schema rappresentativo di una macchina SLS. [13]

Il procedimento di realizzazione del componente stampato in 3D può essere riassunto come segue:

In primo luogo, tramite il sistema di distribuzione della polvere, che nell'immagine precedente è rappresentato dal "Roll", viene steso un letto di polvere spesso qualche micron su tutta la grandezza utile di stampa della macchina, la polvere in eccesso cade in appositi contenitori, successivamente viene attivato il fascio laser che fonde il layer di polvere.

In seguito, il piatto mobile che si sposta in direzione z, si abbassa in modo tale da permettere la stesura di un nuovo layer di polvere così da dare inizio a un nuovo ciclo.

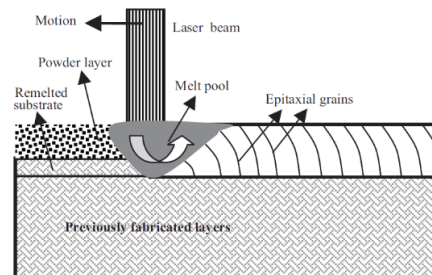


Figura 26: Procedimento di realizzazione di un layer. [13]

5.1.2.1 Vantaggi e svantaggi

Il principale vantaggio che questa tecnologia possiede rispetto a tutte le altre tipologie di stampa 3D è la non necessità di realizzare supporti per la creazione dei componenti; inoltre, le proprietà meccaniche dei componenti realizzati tramite tecnologie SLS sono superiori a tutte le altre tecnologie di stampa.

Il processo di stampa SLS possiede un'elevata produttività data dal laser, il quale infatti possiede una scansione rapida, e inoltre le polveri utilizzate necessitano di una breve esposizione per fondere.

Invece i principali svantaggi che possiede questa tipologia di stampa sono la presenza di porosità e l'elevata ruvidità superficiale; essendo un principio tecnologico simile alla sinterizzazione è presente, inoltre, un tasso di ritiro che può raggiungere anche il 5% del volume totale del componente.

I rifiuti generati dalla stampa tramite tecnologia SLS sono sicuramente più elevati rispetto alle altre tipologie di stampe 3D; questi scarti sono dovuti al fatto che le polveri all'interno della camera di sinterizzazione vengono preriscaldate andando così a perdere le proprietà meccaniche originali.

5.1.3 Cenni sulla Presso Fusione

Fa parte dei processi fusori delle leghe metalliche e consiste nel riempire le cavità di uno stampo, tipicamente realizzati in acciaio, tramite un sistema ad alta pressione.

Sono stampabili tutte le leghe metalliche a eccezione delle leghe ferro-carbonio per evitare problematiche di affinità con gli stampi che comprometterebbero tutto il procedimento di fusione; quindi, è possibile stampare leghe di Alluminio, Magnesio, Rame, Zinco.

Possiamo identificare due diversi impianti tecnologici per la realizzazione del processo fusorio a pressione, differenziando in base alla temperatura di fusione della lega:

- Camera calda: se la lega è basso fondente come il Rame o lo Zinco.
- Camera fredda: se la lega è alto fondente come Alluminio o Magnesio.

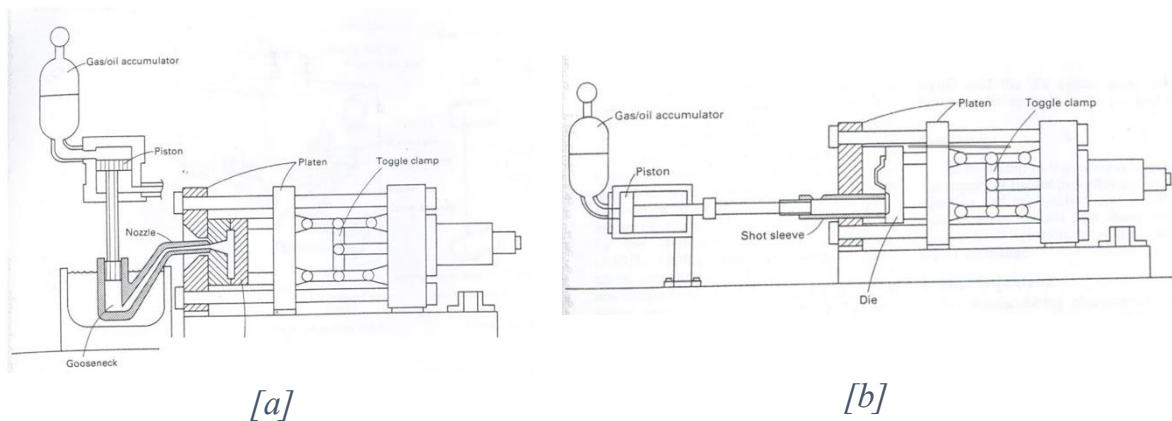


Figura 27: [a] rappresentazione di un impianto produttivo a camera calda; [b] rappresentazione di un impianto produttivo a camera fredda. [2]

5.1.3.1 Vantaggi e svantaggi

Il principale svantaggio presente in questa tecnologia è la presenza elevata di porosità all'interno del pezzo fuso a causa dell'elevata velocità di inserimento della lega fusa all'interno dello stampo; le porosità, come già citato in precedenza nel capitolo sulle difettologie delle saldature, compromettono severamente l'integrità del componente e le sue proprietà meccaniche.

Inoltre, uno degli aspetti che più affligge questa tecnologia è l'elevato costo iniziale e ciò restringe il campo di utilizzo della presso fusione solamente ad applicazioni in serie di grandi quantità.

Invece i vantaggi che troviamo nell'utilizzare questo tipo di tecnologia sono: l'ottima finitura superficiale, realizzazione di componenti complessi anche con spessori di qualche millimetro adatti alla meccanica di precisione, un'elevata efficienza produttiva che gli permette di ammortizzare il costo iniziale il quale veniva individuato come uno dei principali svantaggi nell'utilizzo di questa tecnologia.

5.2 Paragone tecnologico tra SLS e Presso fusione per una lega d'alluminio

La necessità di paragonare la presso fusione e la stampa 3D con metodo SLS di componenti in alluminio nasce dall'impossibilità di realizzare tramite presso fusione una serie estremamente ridotta di provini per le prove sperimentali necessari per la caratterizzazione meccanica delle saldature laser; perciò, si è adottato un principio di somiglianza tecnologia, per la creazione degli elementi necessari.

Come riportato dall'articolo di Bharath et al. [14] che mette a confronto i risultati delle prove di trazioni di provini in AlSi10Mg stampati tramite SLS sia in direzione orizzontale che verticale, e provini realizzati con tecnologia presso fusa in A360, la quale verosimilmente corrisponde a una lega AlSi10Mg a eccezione di qualche "impurità" con valori differenti i grafici risultano molto simili.

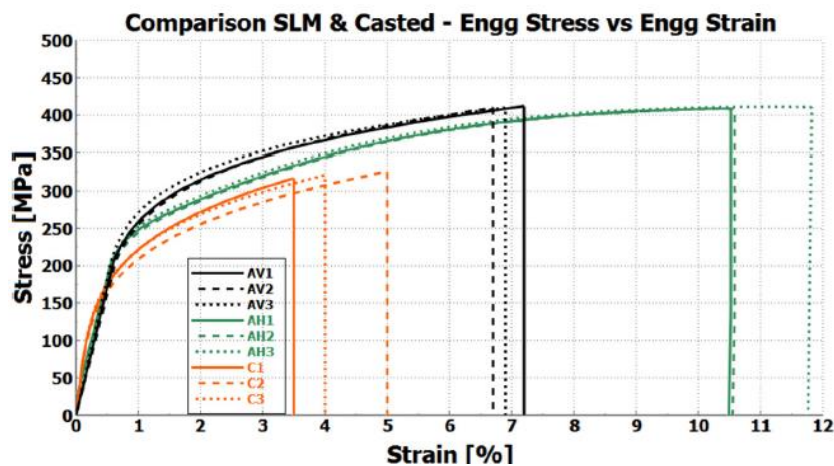


Grafico 23: Confronto tra i risultati dei provini utilizzati nell'articolo; in nero sono rappresentati i provini stampati in SLS verticalmente; in verde sono rappresentati i provini stampati in SLS orizzontalmente; mentre in arancione i provini pressofusi. [14]

Test result comparison AlSi10Mg Vs A360.

Coupon	Brinell HardnessHB	Yield Stress[MPa]	Ultimate Tensile Stress[MPa]Engineering	% elongation at break Engineering
A1	118	240.3	408	10.5
A2	121	241.7	408	10.5
A3	121	243.8	411	11.7
AV1	125	225	412	7
AV2	120	223	410	6.5
AV3	124	225	408	6.7
C1	75	165	317	3.5
C2	75	155	326	5
C3	73	168	321	4

Tabella 2: Risultati analitici delle prove di trazione. [14]

Material	Copper	Iron	Magnesium	Manganese	Nickel	Silicon	Tin	Zinc
A360	0.60	1.3	0.60	0.35	0.50	10	0.15	0.50
AlSi10Mg	0.05	0.55	0.45	0.45	0.05	10	0.05	0.1

Tabella 3: Analisi chimica delle due diverse leghe. [14]

Come si può notare dalla tabella n°2 riportata nella pagina precedente è possibile notare una somiglianza tra le caratteristiche meccaniche dei provini stampati tramite tecnica SLS e quelli realizzati tramite presso fusione, questo accade finché si rimane in campo elastico e non tanto in campo plastico dove le differenze invece si fanno sostanziali.

Per lo scopo di questa tesi, la quale si occupa della caratterizzazione meccaniche dei giunti saldati tramite tecnologia laser, non occorre addentrarsi in campo plastico; quindi, possiamo avvalorare i risultati della prova di trazione generati dai provini analizzati per questa tesi.

5.3 Realizzazione dei provini

5.3.1 Parametri per la realizzazione dei provini

Per quanto riguarda il primo componente, abbiamo una placchetta 50 x 50 x 4 mm in AlSi10Mg realizzata tramite stampa 3D SLS; la polvere necessaria alla realizzazione della placchetta è stata fornita da Carpenter (Carpenter Additive, Carpenter Technology Corporation, USA) le dimensioni dei grani metallici si assestano tra i 20-63 μm ; l'immagine riportata qui sotto, ottenuta tramite SEM (Scanning Electron Microscopy), rappresenta la polvere utilizzata per la stampa.

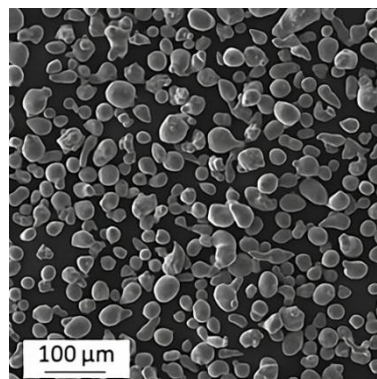


Figura 28: Immagine SEM dei grani di polvere di AlSi10Mg. [12]

I provini sono stati prodotti con macchina SISMA MYSINT100 a piatto freddo, in atmosfera controllata a base d'azoto con una presenza di ossigeno $< 0.1\%$.

I parametri utilizzati per la realizzazione dei campioni sono riportati nella seguente tabella.

Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Layer thickness (μm)	Hatch space (μm)	Scan strategy	Support category
175	500	20	70	3 x 3mm ²	Wall roto-trans-lating chess-board

Tabella 4: Parametri di fabbricazione per la stampa dei provini. [12]

Successivamente è stato eseguito un trattamento termico a una temperatura di 300 °C per 120 min, seguito da un lento raffreddamento.

Mentre per quanto riguarda il secondo elemento da giuntare si è utilizzata una placchetta 50 x 50 x 1.5 mm in AA6082 laminato a caldo le quali caratteristiche chimiche sono: Cr ≤ 0.25%, Fe ≤ 0.5%, Mg 0.6–1.2%, Mn 0.4–1%, Si 0.7–1.3%, altri elementi < 0.2%.

5.3.2 Parametri per la saldatura

La saldatrice laser utilizzata per la realizzazione dei provini si compone di: IPG YLS-6000 a fibra ottica equipaggiata con D50 a doppia scansione ottica, i quali parametri sono riportati nella seguente tabella.

Maximum power	6 kW
BPP	4 mm
Collimation focal length	200 mm
Focalization focal length	300 mm
Magnification factor	1.5
Fiber core diameter	100 μm
Spot diameter	150 μm
Maximum wobbling frequency	350 Hz

Tabella 5: Paramenti fonte laser. [12]

Per il processo di saldatura viene utilizzato anche del materiale d'apporto sotto forma di filamento con un diametro di 1.2 mm, il quale viene alimentato da un sistema Fronius KD7000 push-pull; il materiale utilizzato come apporto anch'esso fa parte delle leghe d'alluminio in particolare risulta una lega AA5356 la cui composizione: Si ≤ 0.25%, Fe ≤ 0.40%, Cu ≤ 0.05%, Mn 0.5-1.1%, Mg 1.6-2.5%, Cr ≤ 0.3%, Zn ≤ 0.2%, Ti ≤ 0.15%, altri elementi ≤ 0.15%.

Sia il laser che il sistema d'alimentazione del materiale d'apporto sono montati su di un braccio antropomorfo, nello specifico su di uno Yaskawa-Motoman HP-20 6-assi.

Inoltre, per il processo di saldatura è presente un'atmosfera controllata, il gas utilizzato per quest'ultima è una miscela composta all' 85% di Ar e al 15% di He.

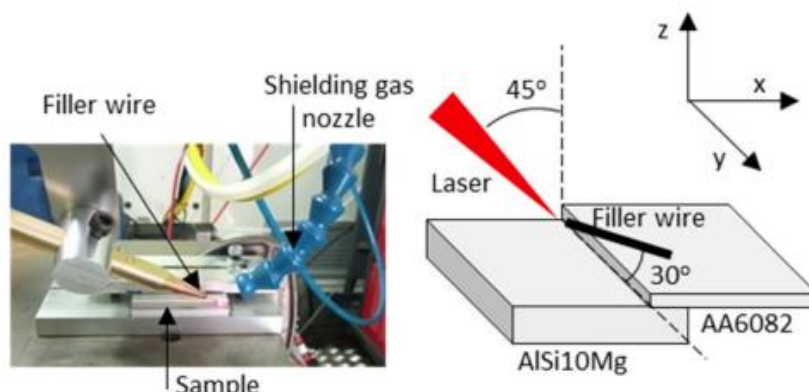


Figura 29: Schema di fabbricazione dei provini. [12]

I due elementi che compongono il provino sono stati poi bloccati tramite un'attrezzatura progettata hoc dove la fonte laser è indirizzata a 45° rispetto al cordone di saldatura nel piano zx, mentre il flusso d'alimentazione del gas è posizionato sul piano zy con un'inclinazione di 30° rispetto alla sede della saldatura.

Test	Laser power (kW)	Welding speed (mm/s)	Wire speed (m/min)	Wobbling frequency (Hz)	Wobbling amplitude (mm)
Welding with filler wire, linear motion					
1-5 (FL)	2.2-3 every 0.2	25	1.5	/	/
6-10 (FL)		30	1.8		
11-5 (FL)		35	2.1		
1-18 (FL)	2.6	30	1.2, 1.4, 1.6		
Welding with filler wire, wobbling					
1-8 (FW)	As above (see 1-18 FL)			200	1
Welding without filler wire, linear motion					
1-4 (L)	2-2.6 every 0.2	25	/	/	/
5-8 (L)		30			
9-12 (L)		35			
Welding without filler wire, wobbling					
1-3 (W)	2.6	25, 30, 35	/	100	1

Tabella 6: Parametri di fabbricazione provini. [12]

La tabella qui sopra riporta tutti i dati di riferimento utilizzati per la realizzazione dei provini per questa tesi.

5.4 Metodologia utilizzata per l'analisi delle deformazioni

I provini così realizzati sono stati montati su di una pressa per la prova di trazione dotata di una videocamera ad alta frequenza per l'acquisizione delle immagini; questo ci ha permesso di utilizzare un software, nello specifico Gom-Correlate, per la determinazione delle deformazioni reali.

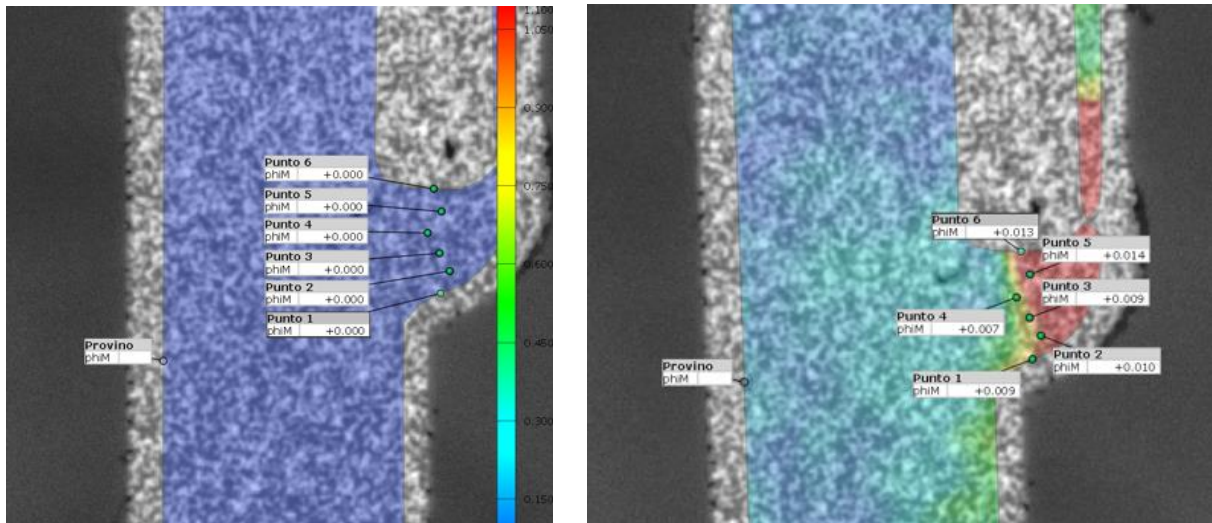


Figura 30: Rappresentazione dell'analisi eseguita sui provini.

Una volta importate le immagini di una singola prova di trazione dentro al software è stato necessario definire una scala su cui l'algoritmo potesse fare affidamento per la determinazione delle deformazioni; come riferimento si è deciso di prendere lo spessore della placchetta in AlSi10Mg che risulta di quattro millimetri; successivamente si sono impostate le ROY una sul provino, che nell'immagine numero 30 risulta di colore blu, ed un'altra per i punti su cui si è deciso di calcolare le deformazioni, i punti sono stati posizionati sull'ipotetico piano di rottura del cordone di saldatura, il posizionamento di questo piano è stato identificato da precedenti prove sperimentali.

Una volta che si sono impostati i parametri come Facet e distanza tra i punti si può dare il via all'analisi; la quale restituirà, per ogni immagine scattata in precedenza dalla videocamera, un'immagine modifica con il valore di deformazione per ogni punto da noi indicato più un codice colore dell'intensità di deformazione che spazia dal blu, non presente, al rosso, massimo valore rilevato, come si può notare dall'immagine numero 30.

Quindi una volta ottenute le immagini con i valori delle deformazioni dei singoli punti si è andati a svolgere il calcolo di media classica, andando ad escludere altri metodi di media come quella ponderata in quanto la differenza dei risultati risultava minima, e di deviazione standard; andando ad ottenere così, per ogni immagine, un singolo valore di deformazione.

5.4.1 Funzionamento di Gom-Correlate

In questo capitolo viene riportato il funzionamento matematico di Gom-Correlate tutte le informazioni riportate successivamente sono state riprese dalla libreria di Gom-Correlate [15]

5.4.2 Come Gom-Correlate determina le deformazioni

Le posizioni nello spazio \vec{X} e nel tempo t di un solido possono essere descritte dalla seguente funzione traiettoria:

$$\vec{x} = \chi(\vec{X}, t)$$

Le coordinate nella configurazione iniziale \vec{X} possono essere descritte utilizzando i vettori unitari cartesiani:

$$\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$$

tali che:

$$\vec{X} = \sum_{i=1}^3 X_i \vec{e}_i$$

La deformazione di un solido è il cambiamento della sua forma nello spazio nel tempo.

Il cambiamento di una funzione nello spazio è il suo gradiente:

$$\mathbf{F} := \text{grad}(\vec{\chi}(\vec{X}, t)) = \frac{d\chi_i}{dX_j} \vec{e}_i \otimes \vec{e}_j = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{pmatrix}$$

Dove:

$$F_{ij} = \frac{\partial \chi_i}{\partial X_j}$$

Poiché la differenziazione avviene alle coordinate del materiale, F viene anche chiamato gradiente di deformazione del materiale o tensore di deformazione di Green-Lagrange.

Il gradiente di deformazione può anche essere considerato come una conversione dell'elemento $d\vec{X}$ a $d\vec{x}$ dove $d\vec{x}$ è:

$$d\vec{x} = \mathbf{F} \cdot d\vec{X}$$

L'elemento $d\vec{X}$ che nel suo stato originale ha un volume V , viene convertito grazie a \mathbf{F} in $d\vec{x}$, che ha un volume v .

Poiché il materiale non cambia con lo stato di aggregazione, la conversione è biiettiva.

Sia l'inversione che la decomposizione polare possono essere applicate al tensore \mathbf{F} .

5.4.3 Decomposizione polare del gradiente delle deformazioni

La decomposizione polare di un operatore lineare è generalizzabile nella scomposizione di un numero complesso in una parte lineare e una parte rotazionale.

Poiché il gradiente di deformazione è un operatore lineare ma non necessariamente una matrice simmetrica, può essere soggetto a decomposizione polare; pertanto, il gradiente di deformazione è diviso in una parte lineare e una parte rotazionale.

La decomposizione polare $\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}$ fornisce i due nuovi tensori \mathbf{R} e \mathbf{U} ; \mathbf{R} contiene la parte rotazionale e invece \mathbf{U} quella lineare.

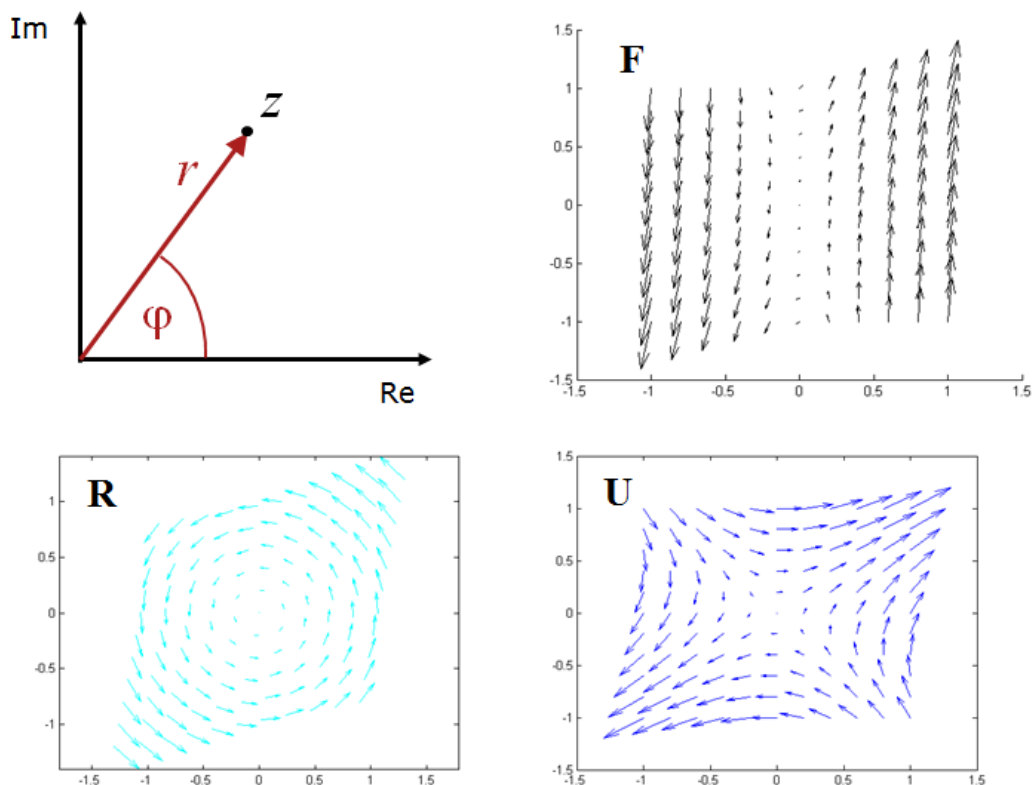


Figura 31: Scomposizione in parte lineare e rotazionale di una generica componente. [15]

Quando si trasformano i punti dallo stato originale allo stato attuale, il tratto lineare viene eseguito per prima; quindi, i punti allungati vengono ruotati.

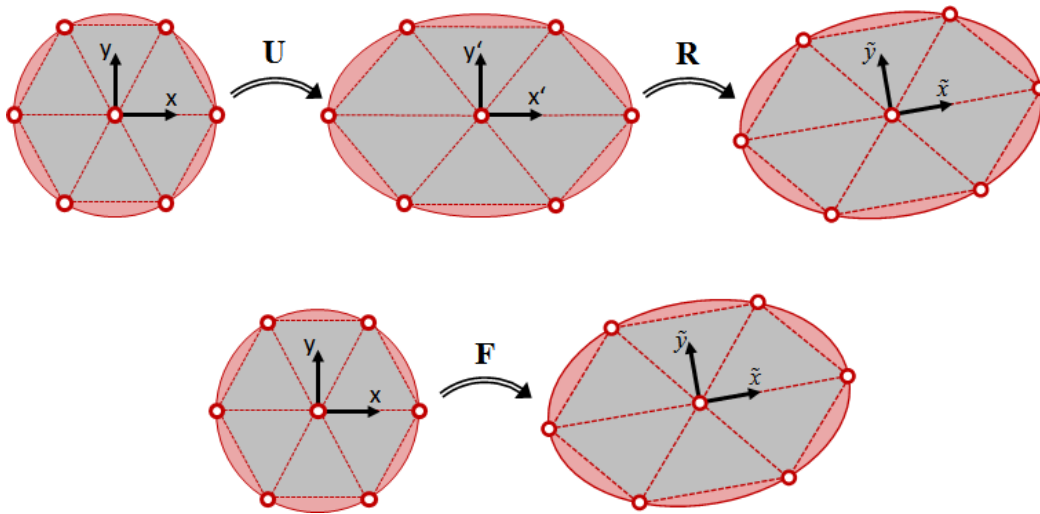


Figura 32: Rappresentazione dell'operazione sul tensore U . [15]

È possibile calcolare il tensore di stiramento grazie al tensore di Cauchy: $C = F^T F$

Il tensore di stiramento contiene i rapporti di stiramento e quindi le tensioni:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}^T \mathbf{F} &= \mathbf{U}^T \mathbf{R}^T \mathbf{R} \mathbf{U} = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{U}^T \mathbf{U} \\
 \Rightarrow \mathbf{U} &= +\sqrt{\mathbf{F}^T \mathbf{F}} \\
 \mathbf{U} &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{11} & \mathbf{U}_{12} & \mathbf{U}_{13} \\ \mathbf{U}_{21} & \mathbf{U}_{22} & \mathbf{U}_{23} \\ \mathbf{U}_{31} & \mathbf{U}_{32} & \mathbf{U}_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} \\ \Lambda_{31} & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

5.4.4 Computazione in GOM

Nel software GOM è sempre presente un sistema globale di coordinate; il sistema di coordinate globale iniziale è definito dalla prima immagine.

Le deformazioni in direzione X sono sempre calcolate in coordinate materiali, es. in coordinate locali che si muovono con il materiale, così, ogni punto ha un proprio sistema di coordinate; il software calcola gli sforzi nei sistemi di coordinate mobili e non nel sistema di coordinate globale.

Il software utilizza l'asse Z come direzione dello spessore.

Per consentire un allineamento comune, il software utilizza la componente normale di un piano \vec{n}_{LP} di compensazione intorno al punto come direzione Z \vec{e}'_z

L'asse X \vec{e}'_x locale risulta dal prodotto scalare del vettore normale del piano e dell'asse Y \vec{e}_y globale.

L'asse Y \vec{e}'_y locale risulta dal prodotto scalare dell'asse Z locale e dell'asse X locale.

$$\begin{aligned}\vec{e}'_z &= \vec{n}_{LP} \\ \vec{e}'_x &= \vec{e}_y \times \vec{e}'_z \\ \vec{e}'_y &= \vec{e}'_z \times \vec{e}'_x\end{aligned}$$

Il sistema di misurazione ARAMIS misura i punti su una superficie; con questi punti, è possibile determinare le deformazioni della superficie, specialmente nel piano di riferimento corrente tangente alla superficie.

Per farlo, tutti i punti che vengono utilizzati per il calcolo sono prima calcolati per essere in un piano di compensazione locale, il piano è determinato dalla media dei triangoli coinvolti.

Ciò significa che le posizioni puntuali utilizzate per la determinazione dei valori di deformazione sono le posizioni dei punti di compensazione proiettate nei piani di compensazione locali.

Finora, le considerazioni sono valide solo per le coordinate materiali, se un elemento si

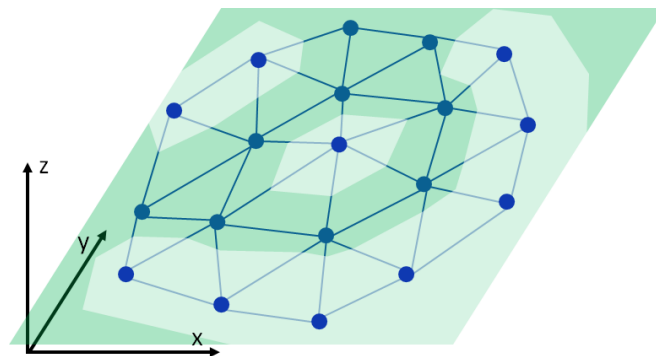


Figura 33: Rappresentazione della compensazione planare. [15]

muove nello spazio durante la deformazione, questo movimento deve essere considerato in aggiunta.

Il movimento di n punti nello spazio 2D può essere preso in considerazione utilizzando un vettore di spostamento $\vec{u} * \vec{u}$.

Il movimento è la deformazione di un elemento costituito da più punti p_i che sono descritti come segue:

$$\vec{p}'_i = \vec{u} + \mathbf{F} \cdot \vec{p}_i \quad \Leftrightarrow \quad \begin{pmatrix} p'_x \\ p'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix}$$

L'equazione contiene sei incognite in due dimensioni ($u_x, u_y, u_z, F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22}$) quindi, sono necessari almeno tre punti con coordinate e deformate note per calcolare lo spostamento e la deformazione.

L'obiettivo del software è quello di calcolare un tensore 2D tratto da una quantità di punti.

La topologia della distribuzione del punto nell'immagine di misura si basa su triangoli; poiché sono necessari almeno tre punti per determinare le incognite, un triangolo è teoricamente sufficiente per calcolare una deformazione.

Tuttavia, per ottenere un migliore supporto dei singoli punti di misura, il software utilizza ulteriori punti adiacenti al punto da calcolare.

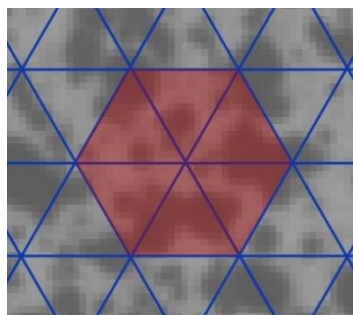


Figura 34: Topologia della distribuzione puntuale. [15]

Questo metodo di calcolo si traduce in un sistema di equazioni sovradeterminate.

Il tensore calcolato rappresenta le deformazioni della superficie circondata dall'esagono equilatero.

La densità dei punti coinvolti e le loro distanze dal centro della rispettiva superficie possono differire da punto a punto; per prendere questo in considerazione, i punti ottengono un fattore di ponderazione w_i .

Tramite una minimizzazione iterativa, è possibile risolvere il sistema di equazioni overdetermine:

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i \|p'_i - \mathbf{F} \cdot p_i\|^2$$

5.4.5 Risultati del tensore delle deformazioni

Dai punti proiettati nel piano di compensazione locale, il software calcola il gradiente delle deformazioni tramite il metodo dei minimi quadrati, il gradiente può essere scomposto in una parte rotazionale e in una parte lineare.

Il tensore dello stress contiene i valori di stress del materiale; quindi, si possono ottenere le deformazioni dal tensore di stiramento:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \Lambda_x & \Lambda_{xy} \\ \Lambda_{yx} & \Lambda_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x + 1 & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y + 1 \end{pmatrix}$$

Dove:

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$$

È possibile calcolare l'angolo di taglio dal tensore di stress.

L'angolo θ_{xy} di taglio è calcolato sapendo che:

$$\theta_{xy} = \theta_x + \theta_y$$

$$\theta_x = \arctan\left(\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x + 1}\right)$$

$$\theta_y = \arctan\left(\frac{\varepsilon_{yx}}{\varepsilon_y + 1}\right)$$

Per piccole deformazioni, è spesso possibile trovare l'approssimazione:

$$\varepsilon_x \rightarrow 0, \varepsilon_y \rightarrow 0, \arctan(x) = x$$

E questo è quello che si ottiene:

$$\theta_{xy} = \arctan\left(\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x + 1}\right) + \arctan\left(\frac{\varepsilon_{yx}}{\varepsilon_y + 1}\right) = \arctan(\varepsilon_{xy}) + \arctan(\varepsilon_{yx}) = 2 \cdot \varepsilon_{xy}$$

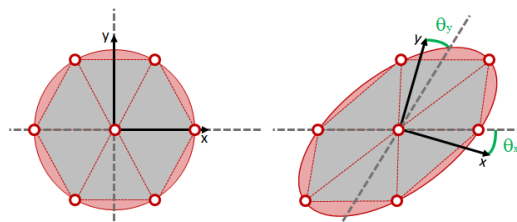


Figura 35: Rappresentazione grafica dell'angolo di taglio. [15]

Per calcolare la riduzione di spessore, viene utilizzato il primo e la secondo principio delle deformazioni.

La trasformazione dell'asse principale fornisce gli autovalori e autovettori e sposta il tensore in una nuova base ortonormale costituita da autovettori.

L'autovalore più grande è lo sforzo maggiore (ϵ_1), mentre l'autovalore più piccolo è lo sforzo minore (ϵ_2).

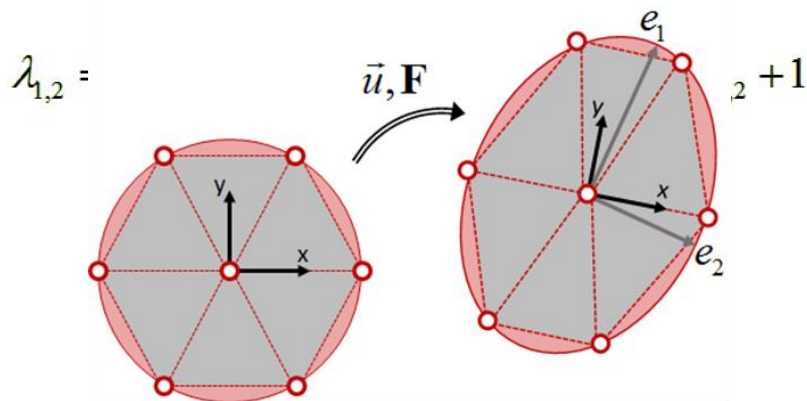


Figura 36: Rappresentazione del passaggio ad un sistema principale. [15]

Le rispettive direzioni sono rappresentate dai corrispondenti autovettori.

5.6 Formule utilizzate per il calcolo della σ_{eq}

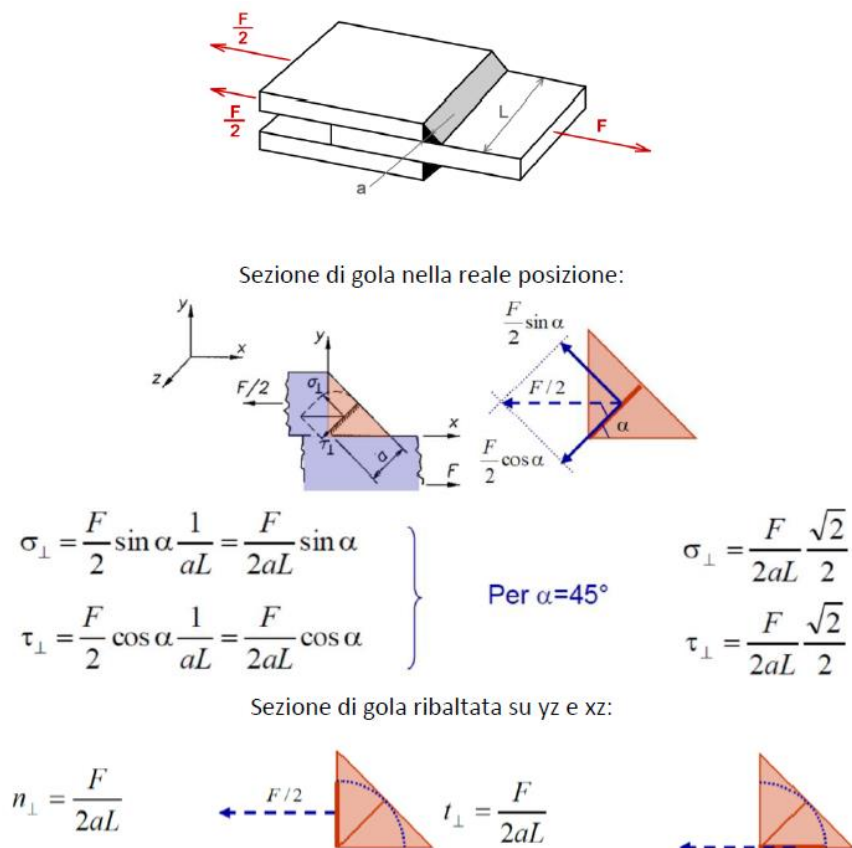


Figura 37: Formulario utilizzato per il calcolo delle sigma e delle tau. [16]

Le formule utilizzate per il calcolo delle sigma e delle tau sono riportate nell'immagine numero 37 dove l'unica accortezza riportata nei calcoli è l'eliminazione del dimezzamento della forza visto che nell'applicazione sperimentale prova erano presente solamente una saldatura e non due.

6. Discussione dei dati sperimentali

6.1 Introduzione

Nei seguenti sottocapitoli sono riportati i dati sperimentali ottenuti da ogni prova di trazione per ogni singolo cordone di saldatura.

La prima colonna contiene un numero progressivo che indica le foto scattate dalla videocamera per la determinazione delle deformazioni, la seconda colonna invece contiene il carico che in quell'istante la pressa, per la prova di trazione, stava esercitando; poi nelle successive tre colonne sono riportati i calcoli della σ e della τ che risultano dall'utilizzo delle formule del capitolo precedente, dove come parametri geometrici si sono utilizzati quelli unici del singolo cordone di saldatura; invece per la determinazione della σ equivalente si è optato per l'utilizzo del principio di Von-Mises.

Nelle ultime due colonne sono riportati i dati del calcolo delle deformazioni ottenute tramite Gom-Correlate, nello specifico il calcolo della media delle deformazioni e della deviazione standard.

Con questi dati si sono poi creati i grafici della singola prova di trazione per la determinazione dei parametri come quello di snervamento, sforzo massimo e deformazione ultima.

In alcune tabelle le prime righe sono annerite e non sono state utilizzate all'interno dei grafici, questo perché il sistema di riferimento della pressa ha rilevato spostamenti negativi, che possono essere dovuti a problematiche di assestamento del sistema stesso; quindi, non sono state utilizzate per non compromettere i risultati finali.

6.2 13sf_3

					Def.vere	Dev.standard
	CARICO [N]	σ_o [MPa]	τ [MPa]	σ_{eq} [MPa]	μ	σ^2
N°1	32,8	0,9	0,5	1,2	0,0005	0,0005477
N°2	199,7	5,4	2,9	7,3	0,0001667	0,0004082
N°3	336,8	9,1	4,9	12,4	0,0005	0,0005477
N°4	392,7	10,6	5,7	14,4	0,0001667	0,0004082
N°5	592,0	15,9	8,5	21,7	0,0005	0,0005477
N°6	623,3	16,8	9,0	22,9	0,0003333	0,0005164
N°7	744,2	20,0	10,7	27,3	0,0006667	0,0005164
N°8	957,4	25,7	13,8	35,1	0,0006667	0,0005164
N°9	994,5	26,7	14,3	36,5	0,001	0,0000000
N°10	1102,3	29,6	15,9	40,4	0,0008333	0,0004082
N°11	1224,0	32,9	17,6	44,9	0,001	0,0000000
N°12	1444,1	38,8	20,8	53,0	0,0008333	0,0004082
N°13	1631,8	43,9	23,5	59,9	0,001	0,0000000
N°14	1657,9	44,6	23,9	60,8	0,001	0,0000000
N°15	1725,1	46,4	24,9	63,3	0,001	0,0000000
N°16	1830,5	49,2	26,4	67,2	0,001	0,0000000
N°17	1964,1	52,8	28,3	72,1	0,001	0,0000000
N°18	2106,6	56,6	30,4	77,3	0,001	0,0000000
N°19	2189,1	58,8	31,6	80,3	0,0008333	0,0004082
N°20	2340,9	62,9	33,7	85,9	0,001	0,0000000
N°21	2457,9	66,1	35,4	90,2	0,001	0,0006325
N°22	2567,1	69,0	37,0	94,2	0,0011667	0,0004082
N°23	2662,4	71,6	38,4	97,7	0,0011667	0,0004082
N°24	2788,1	74,9	40,2	102,3	0,0011667	0,0004082
N°25	2911,6	78,3	42,0	106,8	0,0011667	0,0004082
N°26	3031,5	81,5	43,7	111,2	0,0013333	0,0005164
N°27	3147,9	84,6	45,4	115,5	0,0013333	0,0005164
N°28	3296,8	88,6	47,5	121,0	0,0015	0,0005477
N°29	3394,1	91,2	48,9	124,5	0,0013333	0,0005164
N°30	3548,4	95,4	51,2	130,2	0,0018333	0,0004082
N°31	3647,7	98,1	52,6	133,8	0,0023333	0,0005164
N°32	3776,2	101,5	54,4	138,5	0,0025	0,0005477
N°33	3870,1	104,0	55,8	142,0	0,0031667	0,0007528
N°34	3990,6	107,3	57,5	146,4	0,005	0,0015492

Geometria del cordone di saldatura:

b	24,8	mm
l	2,797	mm
S1	4	mm
S2	1,5	mm
A	2,0978	mm ²
ip	3,1738	mm
h	1,3219	mm
α	1,0785	
$\text{sen}\alpha$	0,8813	
$\text{cos}\alpha$	0,4726	

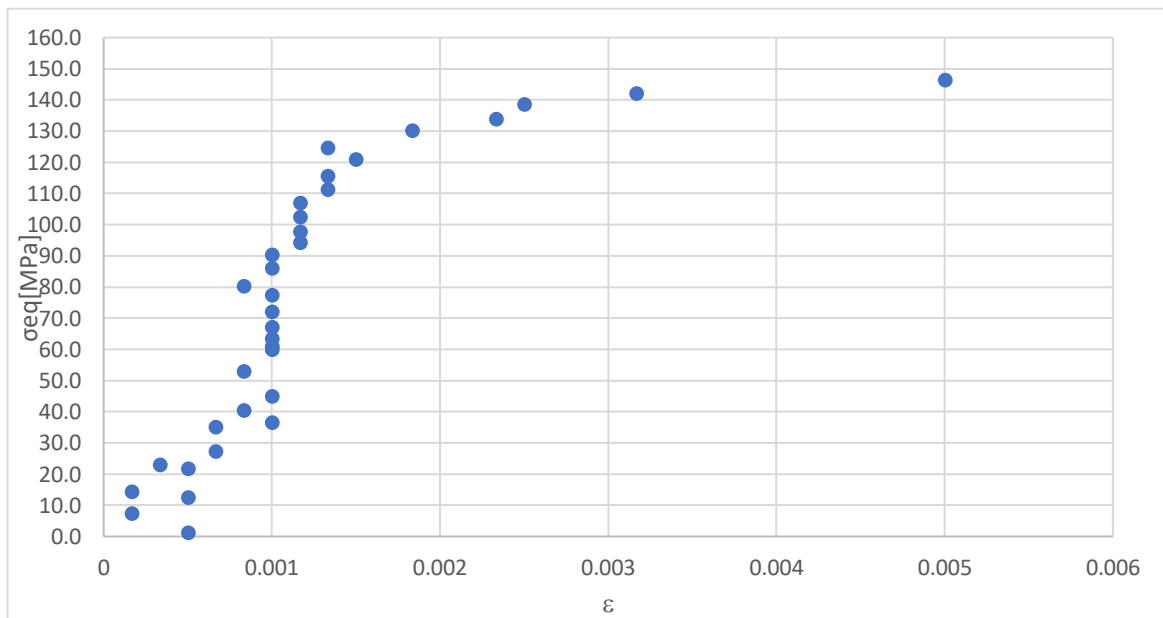
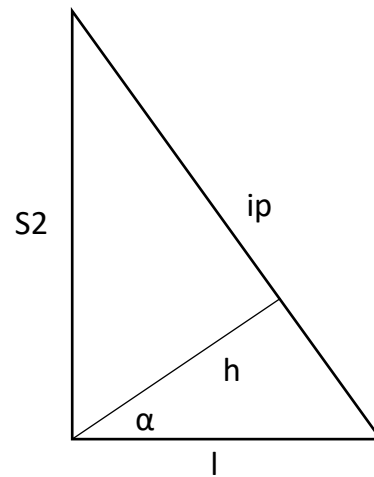


Grafico 24: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 13sf_3

6.3 14sf_1

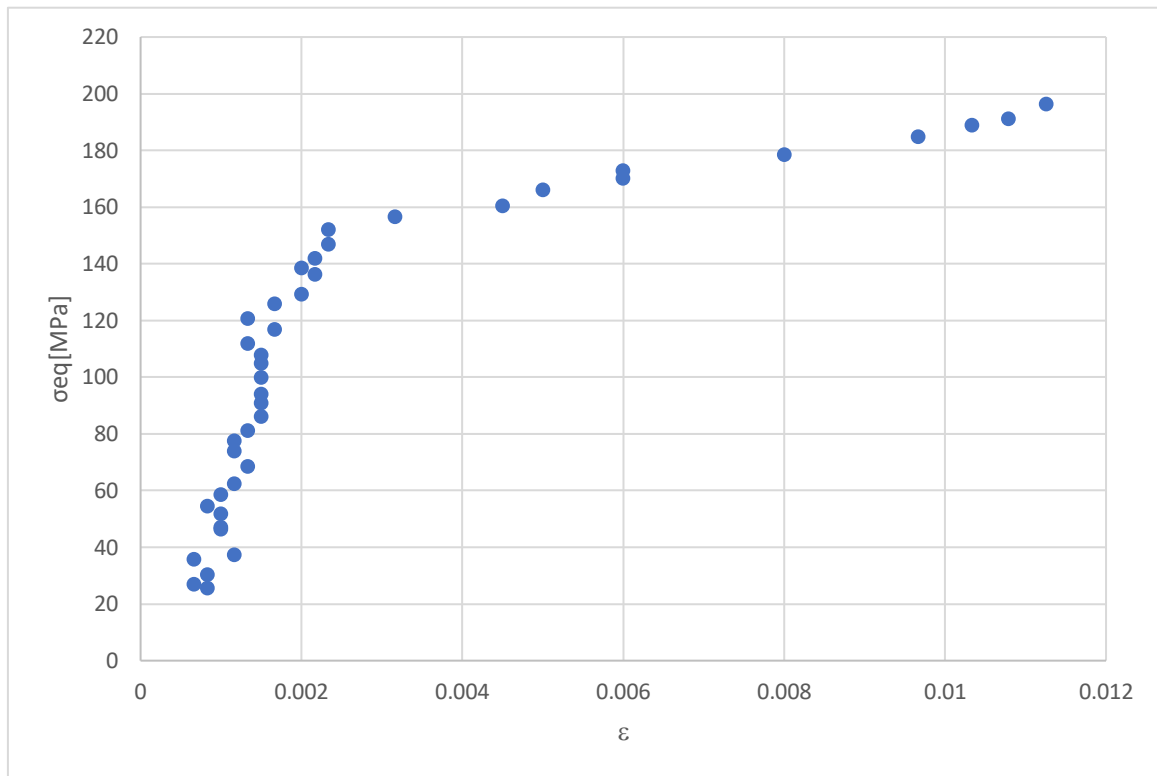


Grafico 25: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14sf_1

6.4 14sf_2

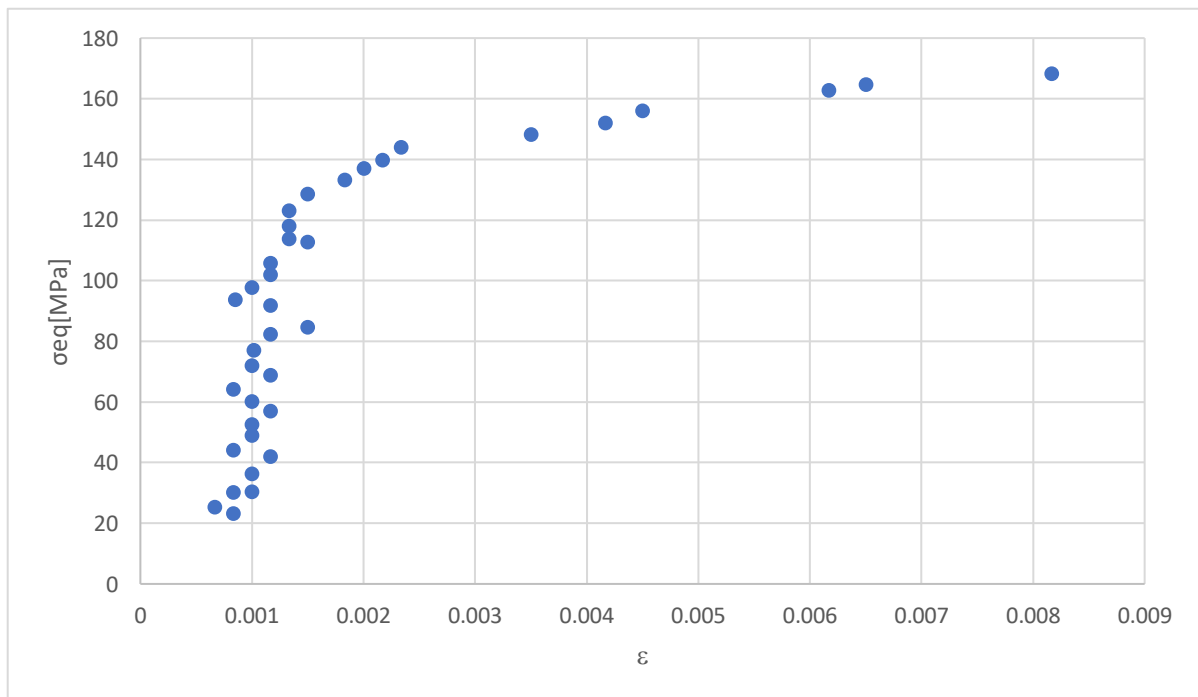


Grafico 26: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14sf_2

6.5 14sf_3

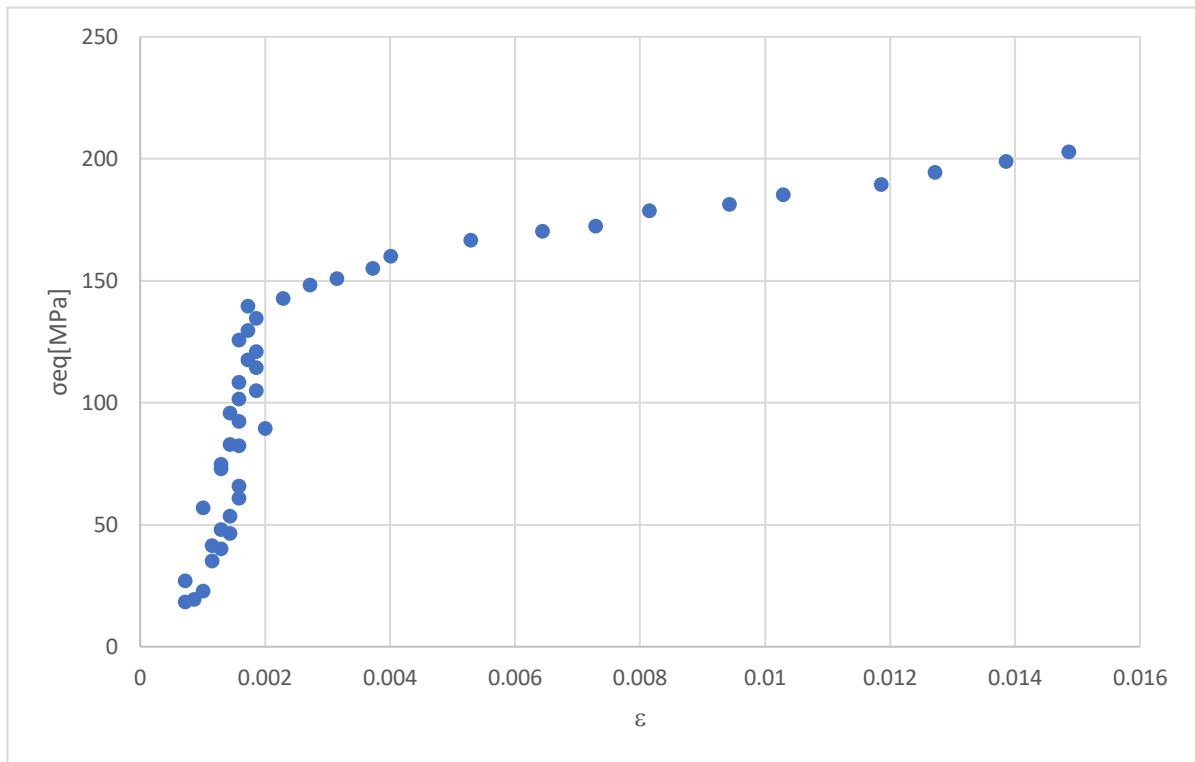


Grafico 27: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14sf_3

6.6 14W_A_3

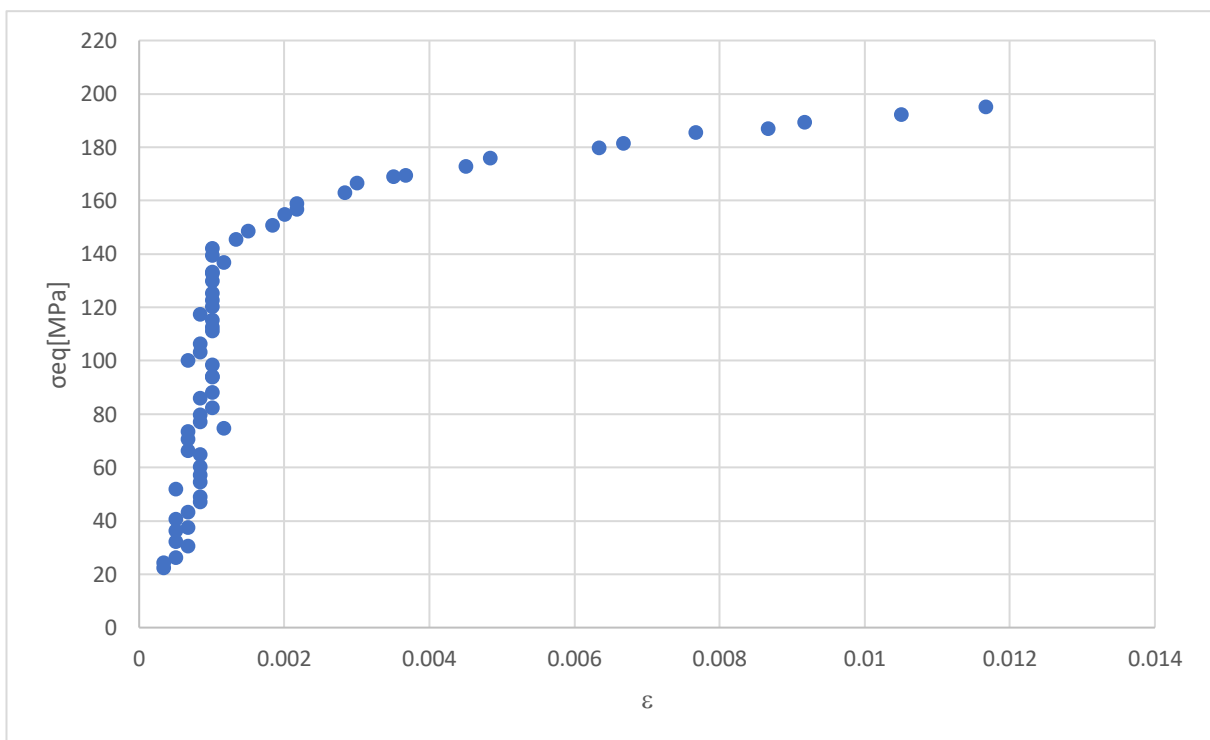


Grafico 28: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14W_A_3

6.7 18W_A_2

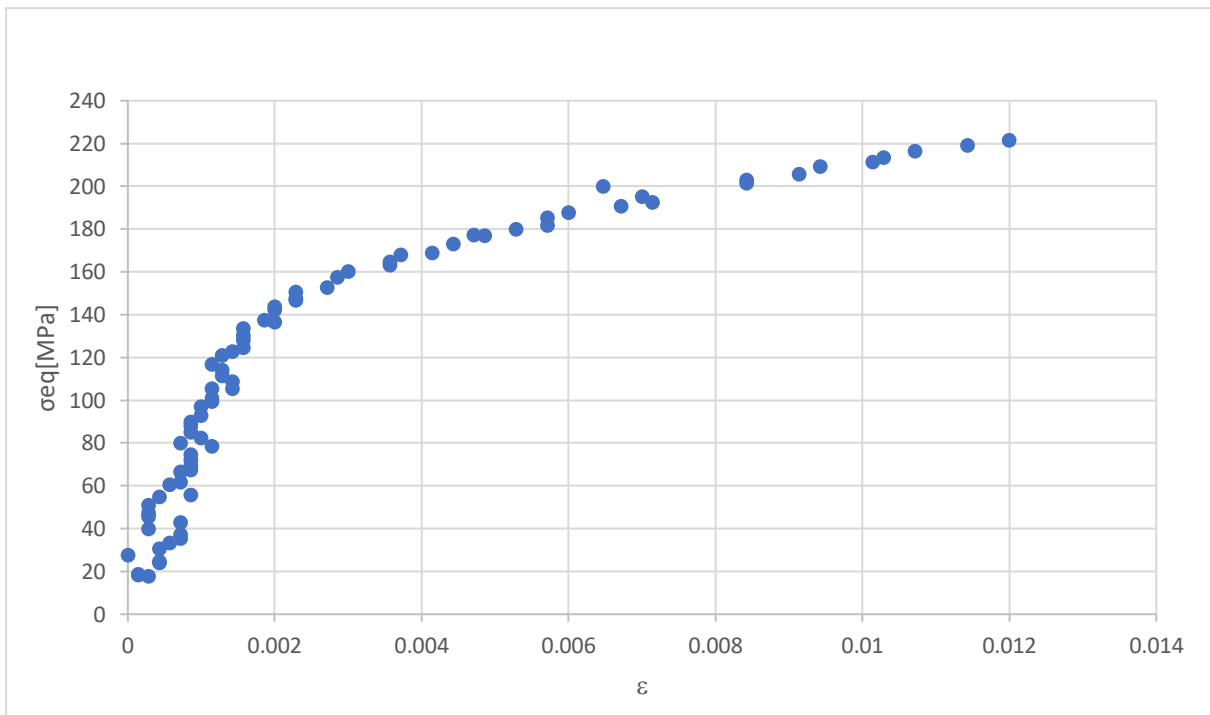


Grafico 29: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 18W_A_2

6.8 18W_A_3

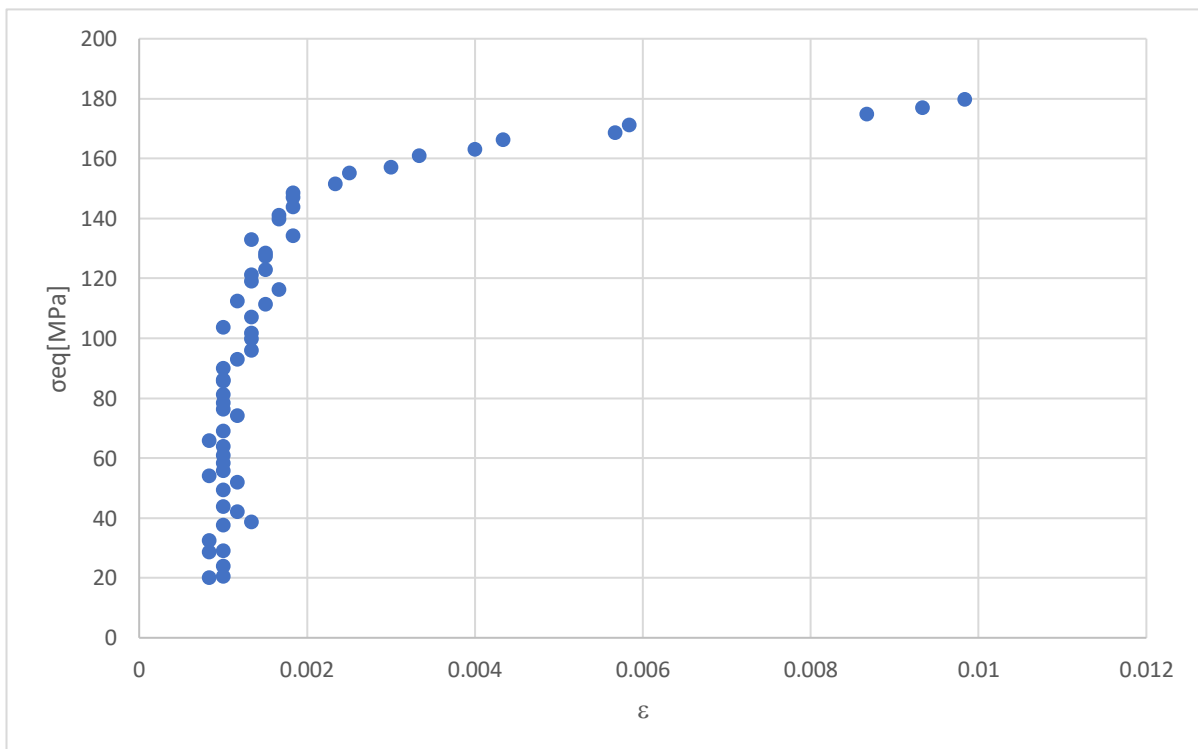


Grafico 30: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 18W_A_3

6.9 16_1

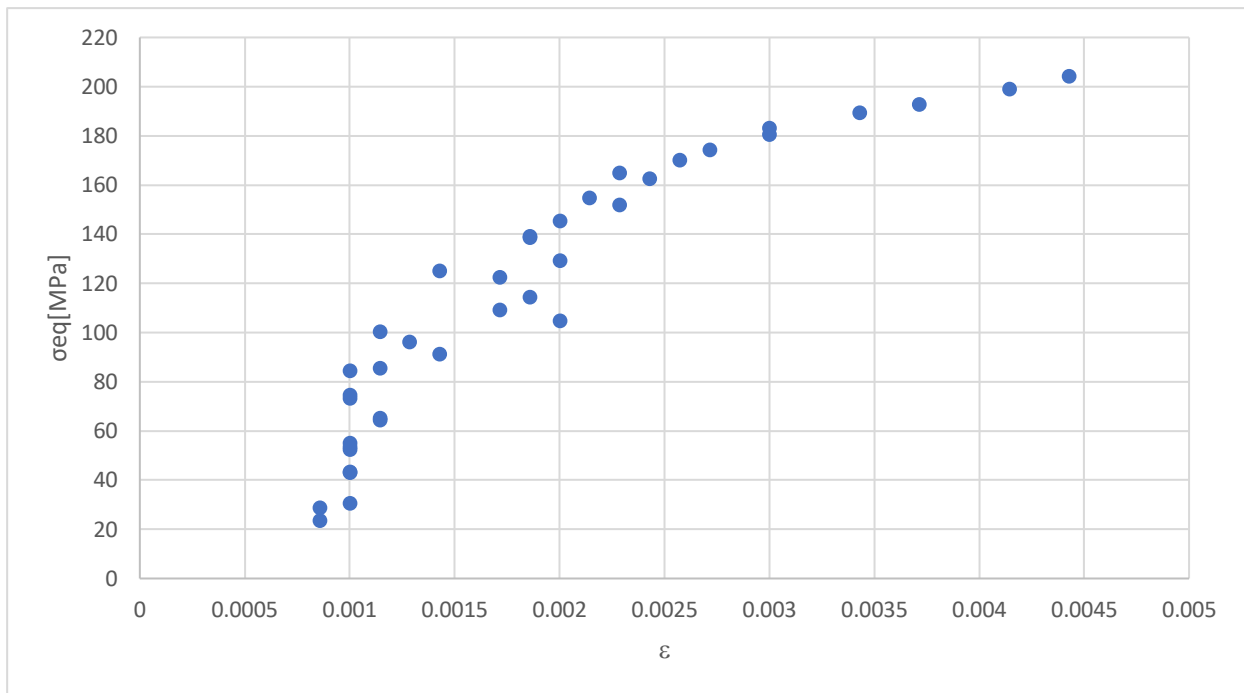


Grafico 31: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 16_1

6.10 16_2

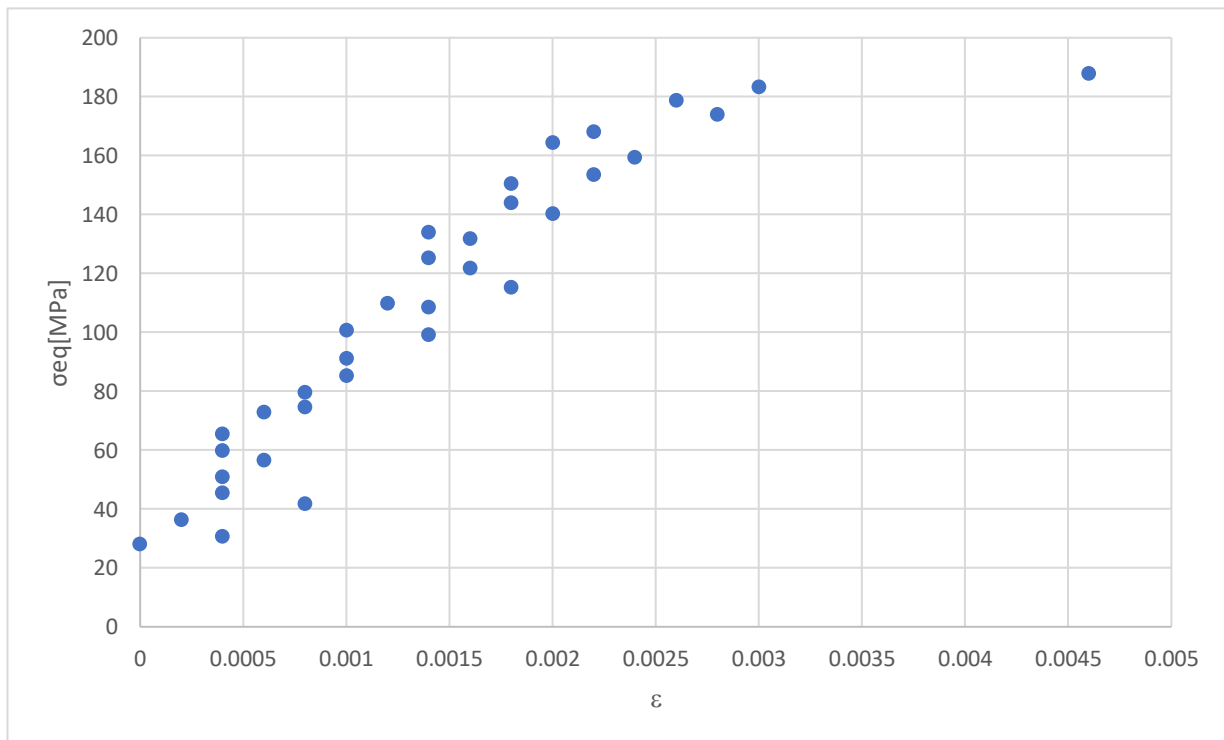


Grafico 32: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 16_2

6.11 Trattazione dei risultati

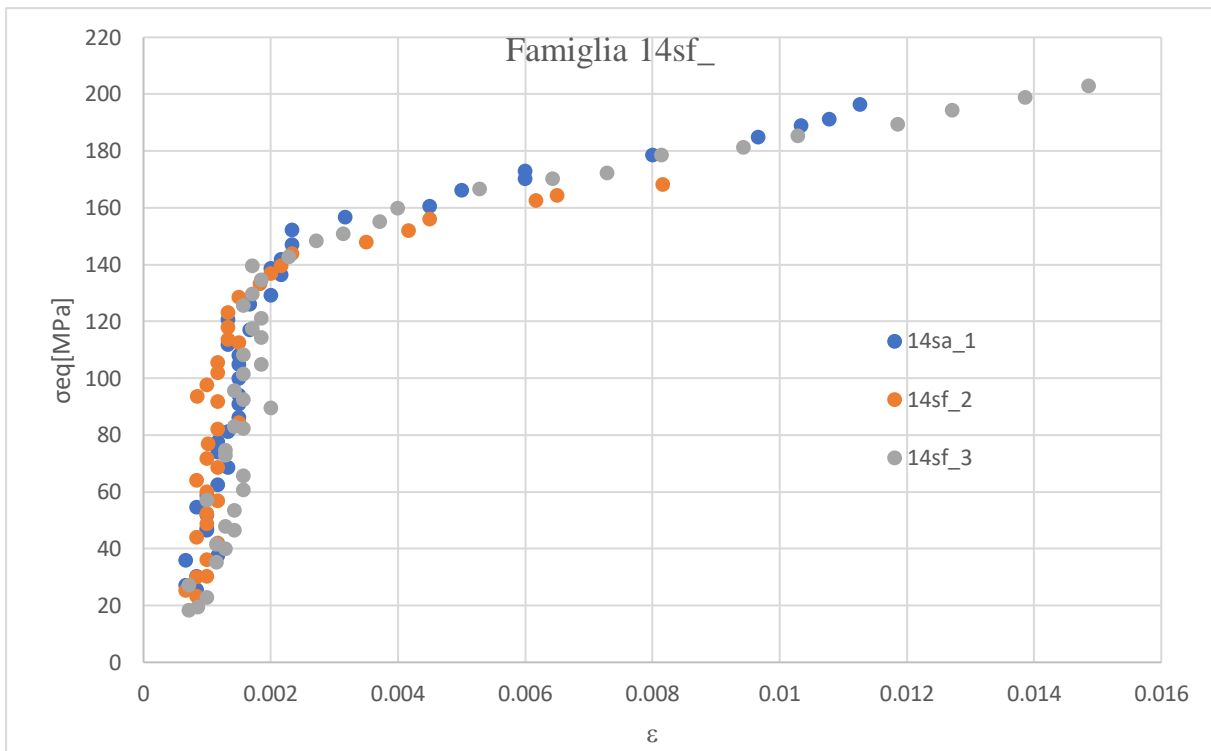


Grafico 33: Diagramma Tensioni/Deformazione per la famiglia dei provini 14sf_.

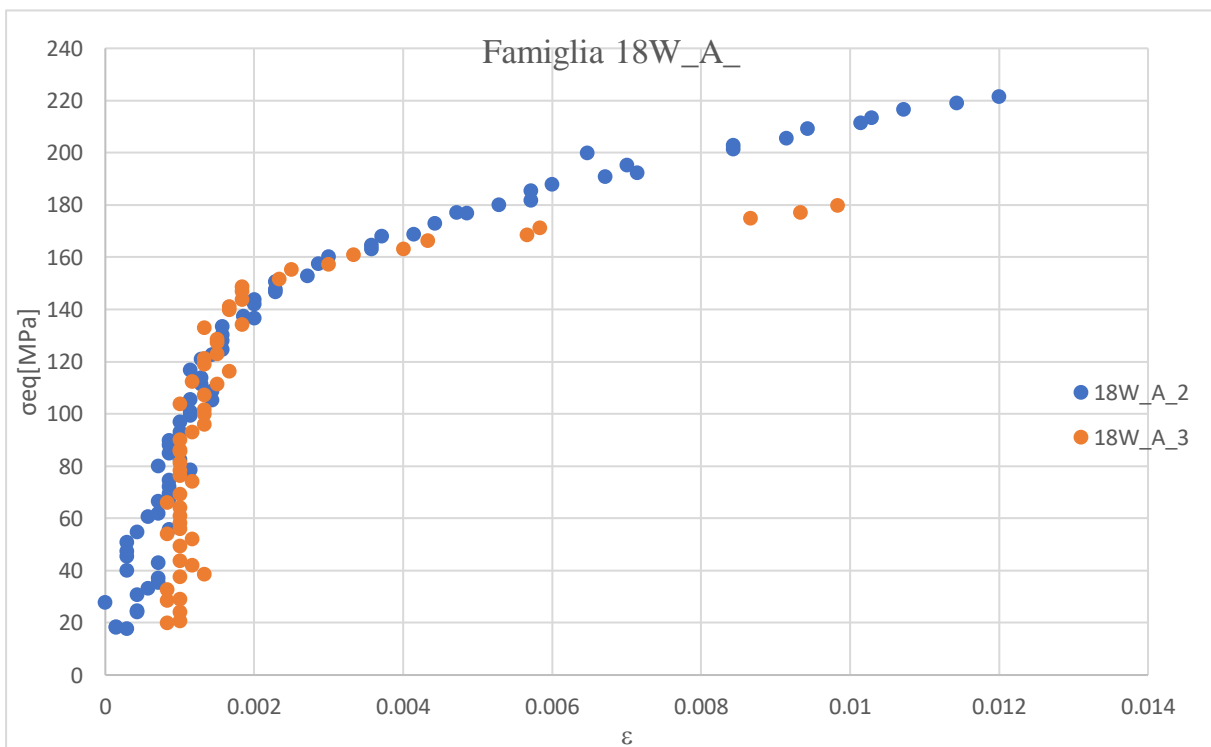


Grafico 34: Diagramma Tensioni/Deformazione per la famiglia dei provini 18W_A_.

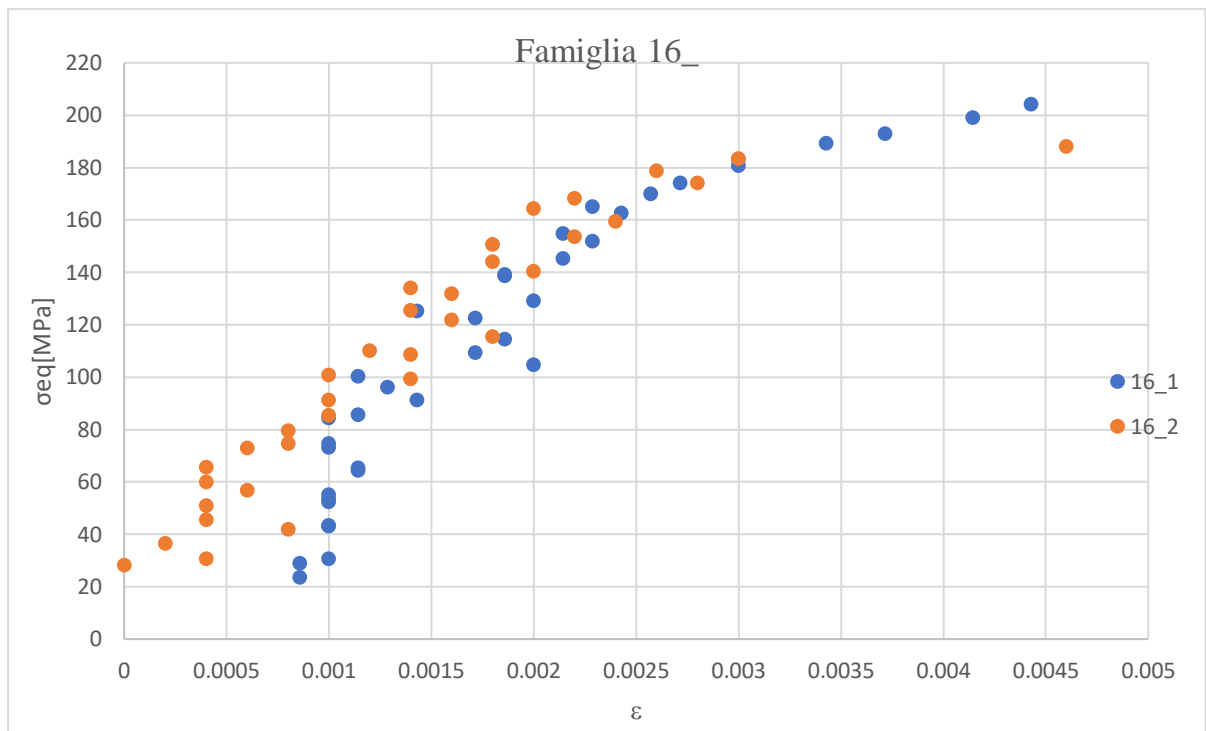


Grafico 35: Diagramma Tensioni/Deformazione per la famiglia dei provini 16_.

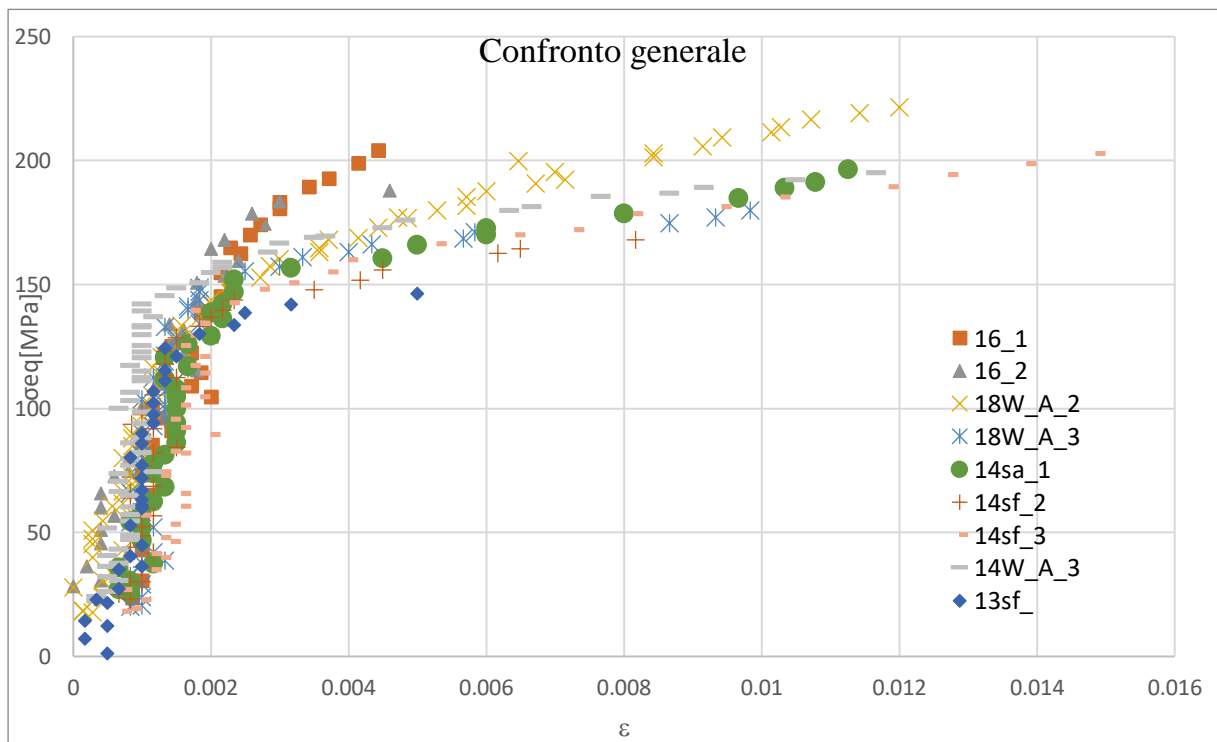


Grafico 36: Diagramma Tensioni/Deformazione generale di tutti i provini.

	σ snervamento [MPa]
13sf_3	130÷140
14sf_1	140
14sf_2	
14sf_3	
14W_A_3	150÷160
18W_A_2	145÷150
18W_A_3	
16_1	140÷145
16_2	

Tabella 7: Riassunto dei risultati della σ di snervamento ottenuti dalle prove sperimentali.

Purtroppo per problematiche legate alla realizzazione dei provi stessi e nelle necessarie modifiche per far rientrare il giunto all' interno delle pinze utilizzate dalla pressa di trazione alcuni provini sono stati danneggiati irrimediabilmente.

La serie di provini che indubbiamente ha fruttato di più e stata quella della classe 14sf_, questo perché su tre provini a disposizione è stato possibile eseguire la prova di trazione su tutti gli elementi, e ciò ci ha permesso di ottenere una serie di dati estremante concordi tra di loro tale che siamo riusciti ad individuare con estrema precisione il valore del sigma di snervamento il cui valore risulta pari a 140 MPa.

Invece nella serie 18W_A_ un elemento della serie è stato distrutto, mentre per quanto riguarda i due componenti superstiti possiamo notare un comportamento sostanzialmente diverso sintomo della mal riuscita del processo di aggiustaggio dei provini per la messa in macchina in particolare nel provino 18W_A_3 è presente il fenomeno dell'incrudimento, infatti, il valore dello snervamento per il provino denominato 18W_A_2 risulta pari a 137 MPa mentre per il 18W_A_3 ha un valore di snervamento pari a 151 MPa.

Mentre per quanto riguarda la famiglia dei provini con la denominazione 16_ a parte un primo tratto dove gli andamenti divergono, assimilabili a problematiche di assestamento della macchina, il comportamento risulta pressoché simile.

Per quanto riguarda invece le serie denominate 13sf_ e 14W_A_ non abbiamo altro che un'unica prova, la quale ci permette di capire il comportamento generale di quello specifico cordone ma non e possiamo avvalorare con estrema sicurezza ed estendere i risultati a tutta la classe dei provini i dati raccolti in quanto abbiamo un campionario estremante ristretto.

Come si può notare dal grafico riassuntivo i cordoni che presentano una maggiore tensione di snervamento sono la classe di provini 14W_A_3; mentre invece i provini che presentano una maggior deformazione sono i provi appartenenti alla famiglia 14sf_.

I parametri che ci permettono di ottenere il connubio tra una bassa percentuale di porosità all'interno del cordone di saldature e le massime prestazioni meccanici in termini di σ di snervamento sono: per quanto riguarda la configurazione con materiale d'apporto e movimentazione wobbling (FW) la potenza della saldatrice deve assestarsi ad un valore di 2200 W e la velocità di saldatura deve essere pari a 25 mm/s; mentre per la configurazione di saldatura classica con un movimento lineare senza materiale d'apporto (L) l'opzione migliore risulta quella quando la potenza della saldatrice risulta pari a 2000 W con una velocità di saldatura di 35 mm/s.

Bisogna prestare molta attenzione nell'utilizzo di una configurazione rispetto ad un'altra perché otteniamo forme dei cordoni sostanzialmente diverse dove il rateo d'aspetto per la configurazione FW risulta 0.34 mentre per la configurazione L è di 0.67.

7. Conclusioni

Dai grafici riportati nelle pagine precedenti possiamo affermare che il comportamento a trazione dei vari cordoni di saldatura sia strettamente influenzato dalle variazioni di ogni singolo parametro che entra in gioco nel processo di saldatura.

In generale possiamo notare una perdita significativa delle proprietà meccaniche del materiale base a causa del processo di saldatura, il quale è assoggettato ad una vasta quantità di difettologie.

Notando il passaggio da una tensione di snervamento compresa tra 200 ÷ 250 MPa data dalla placchetta 6082 ad una tensione di snervamento compresa tra 130 ÷ 160 MPa possiamo quantificare la perdita delle prestazioni la quale, tradotta in perdita percentuale, vede un calo di circa il 45 %.

Possiamo osservare, oltre a problematiche legate alle proprietà meccaniche, anche quelle chimiche soprattutto nella configurazione FS dove il materiale d'apporto, differente rispetto agli elementi da collegare, viene incorporato nel cordone di saldatura creando problemi di diffusione dei precipitati: il cordone risulterà più duro e fragile. Si potrebbe pensare che con l'utilizzo del wobbling possa migliorare la diffusione dei precipitati ma da un'analisi più approfondita non trattata all'interno di questa tesi risulta esattamente il contrario.

Possiamo inoltre affermare che la saldatura laser risulta estremamente competitiva nella realizzazione di cordoni di saldatura su piastre dissimili visto che può raggiungere velocità, in determinate condizioni, superiori a 35 mm/s

In generale anche se abbiamo una perdita sostanziale delle prestazioni meccaniche dovute al processo di saldatura e problematiche di affinità chimiche dei componenti, possiamo affermare che la tecnica di saldatura laser risulta comunque valida per la giunzione di piastre di alluminio dissimili.

8. Bibliografia e Sitografia

8.1 Bibliografia

- [1] Marco V. Boniardi, Andrea Casaroli, L'alluminio e le sue leghe versione 4 19-02-2013.
- [2] Donati L. (2022) – Tecnologia meccanica A. Università di Bologna.
- [6] Gianotti “Alluminio e sue leghe” Torino.
- [7] Edoardo Cappello, Le lavorazioni industriali mediante laser di potenza, la tecnologia, le applicazioni e i sistemi. 2003.
- [8] Alessandro Ascari, Alessandro Fortunato, Introduzione ai processi di saldatura 2014.
- [12] Erica Liverani, Alessandro Ascari, Alessandro Fortunato, The role of filler wire and scanning strategy in laser welding of difficult-to-weld aluminum alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2023) 128:763–777.
- [13] Telenko, Cassandra & Seepersad, Carolyn. (2010). Assessing Energy Requirements and Material Flows of Selective Laser Sintering of Nylon Parts.
- [14] Bharath C., Shamanth V., Hemanth K., Studies on mechanical behaviour of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting and A360 alloy by die casting. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 78-81.
- [16] Fondazione promozione acciaio, quaderno di progettazione strutturale, unione saldate parte 1.

8.2 Sitografia

- [3] https://it.wikipedia.org/wiki/Difetto_cristallino [Ultimo accesso 06/09/2023].
- [4] http://mypoliuni.weebly.com/uploads/8/1/6/8/81687434/4._deformazione.pdf [Ultimo accesso 06/09/2023].
- [5] <https://www.chimica-online.it/download/geminazione.htm> [Ultimo accesso 06/09/2023].
- [9] <https://aqm.it/it/failure-analysis/imperfezioni-e-difetti-di-saldatura/> [Ultimo accesso 06/09/2023].
- [10] <https://fractory.com/welding-defects-types-causes-prevention/> [Ultimo accesso 06/09/2023].
- [11] https://sv.rkriz.net/classes/MSE2094_NoteBook/97ClassProj/exper/bailey/www/bailey.html [Ultimo accesso 06/09/2023].

[15] https://techguide.gom.com/en/gom-software-2022/article/general_dic_strain_computation_basics.html?serial=0 [Ultimo accesso 08/09/2023].

8.3 Indice delle figure

<i>Figura 1: Riassunto dei vari trattamenti sulle leghe d'alluminio. [2]</i>	<i>p.15</i>
<i>Figura 2: Rappresentazione di un reticolo cristallino con la presenza di vacanze al suo interno. [3]</i>	<i>p.16</i>
<i>Figura 3: Rappresentazione delle varie tipologie di dislocazioni. [4]</i>	<i>p.17</i>
<i>Figura 4: Reticolo che ha subito geminazione. [5]</i>	<i>p.17</i>
<i>Figura 5: Rappresentazione d'impurezze in un reticolo cristallino di una lega d'alluminio. [2]</i>	<i>p.18</i>
<i>Figura 6: a) Precipitati ne fini ne uniformi b) Precipitati fini ed uniformi. [2]</i>	<i>p.22</i>
<i>Figura 7: Generica onda elettromagnetica. [7]</i>	<i>p.24</i>
<i>Figura 8: Spettro delle radiazioni elettromagnetiche. [7]</i>	<i>p.24</i>
<i>Figura 9: Schema generico di una sorgente laser con movimentazione tramite robot antropomorfo. [7]</i>	<i>p.26</i>
<i>Figura 10: Schema sorgente Yb: vetro in fibra. [7]</i>	<i>p.27</i>
<i>Figura 11: Cordone di saldatura. [8]</i>	<i>p.28</i>
<i>Figura 12: Sezione trasversale di un cordone di saldatura. [8]</i>	<i>p.29</i>
<i>Figura 13: Direzione accrescimento strutture dendritiche rispettivamente in sezione trasversale e parallela alla saldatura. [8]</i>	<i>p.29</i>
<i>Figura 14: Trasformazioni metalogiche che il materiale subisce dopo il processo di saldatura. [8]</i>	<i>p.30</i>
<i>Figura 15: Sezione trasversale di un generico cordone di saldatura. [8]</i>	<i>p.32</i>
<i>Figura 16: Ritiro qualitativo a causa delle tensioni residue all' interno del cordone di saldatura. [8]</i>	<i>p.32</i>
<i>Figura 17: Rappresentazione delle possibili disposizioni delle cricche. [9]</i>	<i>p.34</i>
<i>Figura 18: [a] Porosità; [b] Fusione incompleta; [c] Penetrazione incompleta; [d] Incisione marginale. [10]</i>	<i>p.35</i>
<i>Figura 19: A sinistra saldatura lineare con filo d'apporto; a destra saldatura con tecnica wobbling e filo d'apporto. [12]</i>	<i>p.36</i>

<i>Figura 20: A sinistra saldatura lineare; a destra saldatura con tecnica wobbling. [12]</i>	<i>p.37</i>
<i>Figura 21: Micrografia FEG-SEM che mostra la microstruttura di un provino saldato con tecnica wobbling e materiale d'apporto. [12].</i>	<i>p.38</i>
<i>Figura 22: Rappresentazione di uno stato tensionale monoassiale.</i>	<i>p.39</i>
<i>Figura 23: Macchina per la prova di trazione. [2]</i>	<i>p.40</i>
<i>Figura 24: Differenza tra la rottura di provini fragili e duttili. [11]</i>	<i>p.45</i>
<i>Figura 25: Schema rappresentativo di una macchina SLS. [13]</i>	<i>p.48</i>
<i>Figura 26: Procedimento di realizzazione di un layer. [13]</i>	<i>p.48</i>
<i>Figura 27: [a]rappresentazione di un impianto produttivo a camera calda; [b] rappresentazione di un impianto produttivo a camera fredda. [2]</i>	<i>p.50</i>
<i>Figura 28: Immagine SEM dei grani di polvere di AlSi10Mg. [12]</i>	<i>p.52</i>
<i>Figura 29: Schema di fabbricazione dei provini. [12]</i>	<i>p.54</i>
<i>Figura 30: Rappresentazione dell'analisi eseguita sui provini.</i>	<i>p.55</i>
<i>Figura 31: Scomposizione in parte lineare e rotazionale di una generica componente. [15]</i>	<i>p.57</i>
<i>Figura 32: Rappresentazione dell'operazione sul tensore U. [15]</i>	<i>p.58</i>
<i>Figura 33: Rappresentazione della compensazione planare. [15]</i>	<i>p.59</i>
<i>Figura 34: Topologia della distribuzione puntuale. [15]</i>	<i>p.60</i>
<i>Figura 35: Rappresentazione grafica dell'angolo di taglio. [15]</i>	<i>p.61</i>
<i>Figura 36: Rappresentazione del passaggio ad un sistema principale. [15]</i>	<i>p.62</i>
<i>Figura 37: Formulario utilizzato per il calcolo delle sigma e delle tau. [16]</i>	<i>p.62</i>

8.4 Indice dei grafici

<i>Grafico 1: Variazione qualitativa delle caratteristiche di allungamento percentuale (A%), coefficiente percentuale di strizione (Z%), durezza Brinell (HB), carico di snervamento (Rp0.2). [1]</i>	<i>p.12</i>
<i>Grafico 2: Variazione numerica-qualitativa delle caratteristiche di allungamento percentuale (A%), durezza Brinell (HB), carico di rottura (R) per leghe d'alluminio. [1]</i>	<i>p.13</i>

<i>Grafico 3: Variazione qualitativa delle proprietà di saldabilità e resistenza alla corrosione. [1]</i>	<i>p.13</i>
<i>Grafico 4: Valutazione qualitativa che mette in relazione la durezza e il tempo dei vari processi di trattamento termico. [1]</i>	<i>p.14</i>
<i>Grafico 5: Diagramma di stato della lega 2XXX. [6]</i>	<i>p.19</i>
<i>Grafico 6: Diagramma di stato della lega 6XXX. [6]</i>	<i>p.20</i>
<i>Grafico 7: Diagramma di stato della lega 7XXX. [6]</i>	<i>p.21</i>
<i>Grafico 8: Diagramma di stato di una genetica lega d'alluminio. [2]</i>	<i>p.22</i>
<i>Grafico 9: Relazione tra tempo e temperatura in diverse curve d'invecchiamento. [2]</i>	<i>p.23</i>
<i>Grafico 10: Variazione dell'assorbimento in funzione della variazione della lunghezza d'onda. [7]</i>	<i>p.25</i>
<i>Grafico 11: Valutazione qualitativa delle tensioni all'interno del cordone di saldatura. [8]</i>	<i>p.31</i>
<i>Grafico 12: Relazione tra apporto energetico filo d'apporto e porosità all'interno del cordone. [12]</i>	<i>p.36</i>
<i>Grafico 13: Relazione tra apporto energetico e porosità all'interno del cordone. [12]</i>	<i>p.37</i>
<i>Grafico 14: Differenza di risultati di due provini con dimensioni diverse nel diagramma Forza/Spostamento. [2]</i>	<i>p.41</i>
<i>Grafico 15: [a] diagramma Carico/Allungamento di un materiale con snervamento evidente; [b] diagramma Carico/Allungamento di un materiale con snervamento non evidente. [2]</i>	<i>p.42</i>
<i>Grafico 16: confronto tra grafici di Tensione/Deformazione e Carico/Allungamento. [2]</i>	<i>p.43</i>
<i>Grafico 17: Confronto tra i vari sistemi di acquisizione dati nella prova di trazione. [2]</i>	<i>p.44</i>
<i>Grafico 18: Differenza tra un materiale duttile ed uno fragile sul grafico Tensioni/Deformazioni [2]</i>	<i>p.45</i>
<i>Grafico 19: Stesso provino ma con incrudimenti diversi. [2]</i>	<i>p.45</i>
<i>Grafico 20: Influenza della temperatura sul grafico Tensione/Deformazioni. [2]</i>	<i>p.46</i>
<i>Grafico 21: Influenza della velocità sul grafico Tensioni/Deformazioni [2]</i>	<i>p.46</i>

Grafico 22: Risultati della prova di trazione su diverse leghe d'alluminio. [2] p.47

Grafico 23: Confronto tra i risultati dei provini utilizzati nell'articolo; in nero sono rappresentati i provini stampati in SLS verticalmente; in verde sono rappresentati i provini stampati in SLS orizzontalmente; mentre in arancione i provini pressofusi. [14]

p.51

Grafico 24: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 13sf_3 p.66

Grafico 25: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14sf_1 p.67

Grafico 26: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14sf_2 p.67

Grafico 27: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14sf_3 p.68

Grafico 28: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 14W_A_3 p.68

Grafico 29: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 18W_A_2 p.69

Grafico 30: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 18W_A_3 p.69

Grafico 31: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 16_1 p.70

Grafico 32: Diagramma Tensioni/Deformazione per il provino 16_2 p.70

Grafico 33: Diagramma Tensioni/Deformazione per la famiglia dei provini 14sf_ p.71

Grafico 34: Diagramma Tensioni/Deformazione per la famiglia dei provini 18W_A_ p.71

p.71

Grafico 35: Diagramma Tensioni/Deformazione per la famiglia dei provini 16_ p.72

Grafico 36: Diagramma Tensioni/Deformazione generale di tutti i provini. p.72

8.5 Indice delle tabelle

Tabella 2: Influenza dei principali elementi di lega sulle caratteristiche meccaniche delle leghe d'alluminio (\uparrow Migliora, \downarrow Peggiora, = Rimane invariata). [1] p.11

Tabella 2: Risultati analitici delle prove di trazione. [14] p.51

Tabella 3: Analisi chimica delle due diverse leghe. [14] p.51

Tabella 4: Parametri di fabbricazione per la stampa dei provini. [12] p.52

Tabella 5: Parametri fonte laser. [12] p.53

Tabella 6: Parametri di fabbricazione provini. [12] p.54

Tabella 7: Riassunto dei risultati della σ di snervamento ottenuti dalle prove sperimentali. p.73

